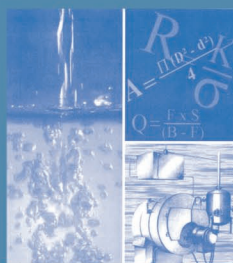




# Guide sur la Vapeur

Tome 2 : Chaufferie vapeur



# Sommaire

<b>Chapitre 1 - Traitement de l'eau</b>	<b>5</b>
<b>1.1 L'eau et ses impuretés</b>	<b>5</b>
1.1.1 Solides dissous	6
1.1.2 Solides en suspension	6
1.1.3 Gaz dissous	6
1.1.4 Substances formant de l'écume	6
<b>1.2 Dureté de l'eau</b>	<b>7</b>
1.2.1 Dureté alcaline (dureté temporaire)	7
1.2.2 Dureté non alcaline et carbonates (dureté permanente)	7
1.2.3 Dureté totale	7
1.2.4 Sels ne formant pas de tartre	8
1.2.5 Unités comparatives	9
1.2.6 Qualité de l'eau brute	9
<b>1.3 Valeurs du pH</b>	<b>9</b>
1.3.1 Abaque du pH	10
<b>1.4 Traitement de l'eau</b>	<b>10</b>
1.4.1 Objectifs	10
1.4.2 Eliminer le tartre	11
1.4.3 Eliminer la corrosion et les attaques chimiques	11
1.4.4 Une vapeur de bonne qualité	11
1.4.5 Sécurité	11
<b>1.5 Traitements externes d'eau</b>	<b>12</b>
1.5.1 Echanges d'ions	12
1.5.2 Adoucissement par permutation ionique	13
1.5.3 Décarbonatation	13
1.5.4 Décarbonateur	14
1.5.5 Déminéralisation	15
1.5.6 Osmose inverse	16
1.5.6.1 Fonctionnement de l'osmose inverse	16
1.5.6.2 Avantages d'une eau osmosée	17
1.5.6.3 Inconvénients d'une eau osmosée	17
<b>Chapitre 2 - Les différents types de chaudière</b>	<b>18</b>
<b>Economiseurs - Brûleurs -</b>	
<b>2.1 Généralités sur les chaudières vapeur</b>	<b>18</b>
2.1.1 Avantages	18
<b>2.2 Différents combustibles</b>	<b>19</b>
2.2.1 Charbon	19
2.2.2 Fuel	19
2.2.3 Gaz	19
<b>2.3 Chaudières à tubes de fumées</b>	<b>20</b>
2.3.1 Chaudière compacte	21
2.3.2 Chaudière compacte 3 passes	22
2.3.3 Chaudière à tubes de fumées équipée	22
2.3.4 Limites d'emploi des chaudières à tubes de fumées	23
2.3.4.1 Pression limite	23
2.3.4.2 Dimensions limites	23
2.3.4.3 Nomenclature chaudière à tubes de fumées	24

<b>2.4</b>	<b>Chaudières à tubes d'eau</b> .....	<b>25</b>
2.4.1	Variantes .....	26
<b>2.5</b>	<b>Chaudière à ballon longitudinal</b> .....	<b>26</b>
<b>2.6</b>	<b>Chaudière à ballon transversal</b> .....	<b>27</b>
<b>2.7</b>	<b>Chaudière à tubes cintrés</b> .....	<b>27</b>
<b>2.8</b>	<b>Chaudière à production instantanée</b> .....	<b>28</b>
<b>2.9</b>	<b>Economiseurs</b> .....	<b>29</b>
<b>2.10</b>	<b>Brûleurs</b> .....	<b>31</b>
2.10.1	Brûleur tout ou rien .....	31
2.10.1.1	Démarrage à pleine puissance .....	31
2.10.1.2	Démarrage à débit limité .....	31
2.10.1.3	Démarrage à petite allure .....	31
2.10.2	Brûleur 2 allures .....	32
2.10.3	Brûleur tout ou peu progressif .....	32
2.10.4	Brûleur modulant .....	33
2.10.5	Brûleur low NOx .....	35
2.10.5.1	Brûleur Low NOx par recyclage des gaz .....	35
2.10.6	Réglage de la forme de la flamme .....	37
2.10.7	Stabilité de la flamme dans le foyer d'une chaudière .....	37
2.10.7.1	Pulvérisation du combustible pour les brûleurs à combustion liquide .....	37
2.10.7.2	Mélange de combustible air .....	37
2.10.7.3	Contrepression dans la chaudière .....	37
2.10.7.4	Un grand excès d'air .....	38
2.10.7.5	Les analyseurs de fumée et le réglage des chaudières .....	38
2.10.8	Cycle de démarrage du brûleur d'une chaudière vapeur .....	40
2.10.8.1	Phase balayage .....	40
2.10.8.2	Phase allumage .....	40
2.10.8.3	Ouverture du volet d'air .....	40
2.10.8.4	Phase marche normale .....	40
2.10.9	Rendement énergétique d'une chaudière .....	41

## **Chapitre 3 - Stockage de la bâche alimentaire** ..... **42**

### **Dégazeur thermique**

<b>3.1</b>	<b>Stockage</b> .....	<b>42</b>
3.1.1	Bâche alimentaire .....	42
3.1.2	Température de service .....	42
3.1.3	Conception de la bâche alimentaire .....	44
3.1.4	Matériaux de la bâche alimentaire .....	44
3.1.5	Débit de la bâche alimentaire .....	46
3.1.6	Construction de la bâche alimentaire .....	46
3.1.7	Raccordements de la bâche alimentaire .....	46
<b>3.2</b>	<b>Traitement de conditionnement</b> .....	<b>48</b>
3.2.1	Les gaz dissous .....	48
<b>3.3</b>	<b>Dégazeur thermique</b> .....	<b>49</b>
3.3.1	Désaération dans les chaudières .....	49
3.3.2	Les dégazeurs thermiques de type plateau .....	49
3.3.3	Les dégazeurs thermiques de type spray .....	50

# Chapitre 4 - Déconcentration et extraction de fond ..... 51

<b>4.1</b>	<b>Taux de salinité</b> .....	<b>51</b>
4.1.1	Mesure du TDS .....	51
4.1.2	Méthode de la masse volumique relative .....	51
4.1.3	Méthode par conductivité .....	51
<b>4.2</b>	<b>Comparaison des unités utilisées pour mesurer les TDS</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3</b>	<b>Choisir le TDS optimum de l'eau de chaudière</b> .....	<b>52</b>
<b>4.4</b>	<b>Calcul du taux de déconcentration</b> .....	<b>54</b>
4.4.1	Exemple .....	54
<b>4.5</b>	<b>Prise d'échantillon de l'eau de chaudière</b> .....	<b>55</b>
4.5.1	Refroidisseur d'échantillon .....	55
<b>4.6</b>	<b>Déterminer le TDS de chaudière en utilisant la méthode de la conductivité électrique</b> .....	<b>55</b>
<b>4.7</b>	<b>Régulation automatique du TDS</b> .....	<b>56</b>
<b>4.8</b>	<b>Réguler le taux de déconcentration</b> .....	<b>58</b>
4.8.1	Régulation de débit .....	58
4.8.2	Régulation de perte de charge.....	58
4.8.3	Vanne de déconcentration continue.....	59
4.8.4	Systèmes de régulation électronique en boucle fermée .....	60
<b>4.9</b>	<b>Mesure de conductivité dans la chaudière</b> .....	<b>61</b>
<b>4.10</b>	<b>Conversion d'une mesure de conductivité en résistance</b> .....	<b>61</b>
4.10.1	Constante cellulaire.....	61
4.10.2	Exemple .....	62
4.10.3	Mesurer la résistance.....	62
<b>4.11</b>	<b>Récupération d'énergie de la déconcentration de chaudière</b> .....	<b>62</b>
4.11.1	Energie de la déconcentration .....	62
4.11.2	Vapeur de revaporisation .....	63
<b>4.12</b>	<b>Comment récupérer et utiliser la vapeur de revaporisation ?</b> .....	<b>65</b>
<b>4.13</b>	<b>Equipements nécessaires</b> .....	<b>66</b>
4.13.1	Un vase de revaporisation.....	66
4.13.2	Un purgeur de vapeur pour purger le vase .....	66
4.13.3	Un casse-vide .....	66
4.13.4	Un distributeur .....	66
<b>4.14</b>	<b>Récupération de chaleur provenant des échangeurs de chaleur</b> .....	<b>67</b>
4.14.1	Refroidissement de l'eau de déconcentration résiduelle .....	67
4.14.2	Conception .....	68
4.14.3	Echangeur de chaleur approprié .....	68

<b>4.15</b>	<b>Extraction de fond de chaudière</b> .....	<b>69</b>
4.15.1	Solides en suspension .....	69
<b>4.16</b>	<b>Extraction de fond automatique associée à un séquenceur</b> .....	<b>69</b>
<b>4.17</b>	<b>Ballon de récupération des purges</b> .....	<b>70</b>
4.17.1	Pression et température de service .....	70
4.17.2	Taille .....	70
4.17.3	Fonctionnement.....	70
4.17.4	Mise à l'atmosphère .....	70
4.17.5	Prise pour installer un manomètre .....	70
4.17.6	Système de refroidissement.....	70

## **Chapitre 5 - Régulations de niveau d'eau et ..... 71** **alarmes pour générateurs de vapeur**

<b>5.1</b>	<b>Niveaux d'eau de chaudière</b> .....	<b>71</b>
5.1.1	Changements de niveau dûs à la circulation dans la chaudière .....	72
<b>5.2</b>	<b>Régulations de niveau pour générateurs de vapeur</b> .....	<b>74</b>
5.2.1	Régulation de niveau.....	74
5.2.2	Alarme de niveau bas.....	74
5.2.3	Alarme de niveau haut .....	74
<b>5.3</b>	<b>Méthodes de détection automatique du niveau</b> .....	<b>75</b>
5.3.1	Régulations de niveau à sonde .....	75
5.3.2	Sondes de conductivité .....	77
5.3.2.1	Résumé sur les sondes de conductivité.....	80
5.3.3	Sondes capacitives .....	81
5.3.3.1	Résumé sur les sondes capacitives.....	84
<b>5.4</b>	<b>Méthodes de régulation automatique de niveau</b> .....	<b>85</b>
5.4.1	Régulation Tout ou Rien.....	85
5.4.1.1	Résumé sur les régulations Tout ou Rien.....	86
5.4.2	Régulation modulante .....	86
5.4.3	Recirculation.....	87
5.4.4	Régulation modulante de niveau avec pompe d'alimentation à vitesse variable.....	87
5.4.5	Régulation de niveau d'eau à élément unique.....	88
5.4.6	Régulation de niveau à deux éléments .....	89
5.4.6.1	Résumé d'une régulation de niveau à deux éléments.....	89
5.4.7	Régulation de niveau à trois éléments .....	90
5.4.8	Résumé des régulations modulantes de niveau.....	90
<b>5.5</b>	<b>Les applications des différents types de régulation de niveau</b> .....	<b>92</b>
	<b>d'eau de chaudières</b>	
<b>5.6</b>	<b>Installations des régulations de niveau</b> .....	<b>93</b>
5.6.1	Chambres externes .....	93
5.6.2	Tubes de protection ou de tranquillisation (régulations montées directement).....	95

# Chapitre 1

## Traitement de l'eau

### 1.1 L'eau et ses impuretés

Avant d'étudier et de comprendre la déconcentration de chaudière, il est nécessaire de donner une définition de l'eau, des impuretés et des termes qui les concernent, comme la dureté, le pH., etc. L'eau est la matière brute la plus importante sur terre. Elle maintient la vie, elle est aussi utilisée pour le transport, elle sert de solvant et elle stocke l'énergie.

L'eau pure ( $H_2O$ ) est insipide, inodore et incolore. Virtuellement, l'eau pure n'existe pas. Toutes les eaux naturelles contiennent différents types et quantités d'impuretés.

L'eau potable n'est pas forcément bonne pour la chaudière. Les minéraux de l'eau potable sont immédiatement absorbés par le corps humain ; les chaudières ont plus de mal à en venir à bout. Ces minéraux causent de nombreux dommages dans une chaudière de vapeur si elle n'est pas contrôlée.

97% de l'eau présente sur terre se trouve dans les océans, et une part significative se trouve dans les glaciers polaires - seulement 0,65% est disponible pour l'usage domestique et industriel.

Cette faible proportion serait rapidement consommée s'il n'y avait pas de cycle d'eau. Après évaporation, l'eau se transforme en nuages qui se condensent partiellement pendant leurs voyages et retombent en pluie sur terre. Nous pouvons considérer l'eau de pluie comme de l'eau pure mais elle contient des impuretés, telles que l'acide carbonique, l'azote et dans les zones industrielles du dioxyde sulfurique.

Chargée de ces ingrédients, l'eau commence à s'écouler. Elle passe dans les couches supérieures de la terre vers les nappes phréatiques ou s'écoule à la surface de la terre dissolvant et collectant les impuretés présentes. Ces impuretés peuvent former des dépôts sur les surfaces de transfert thermique provoquant la corrosion du métal, la réduction du transfert thermique et la surchauffe correspondante qui réduit les caractéristiques mécaniques des métaux.

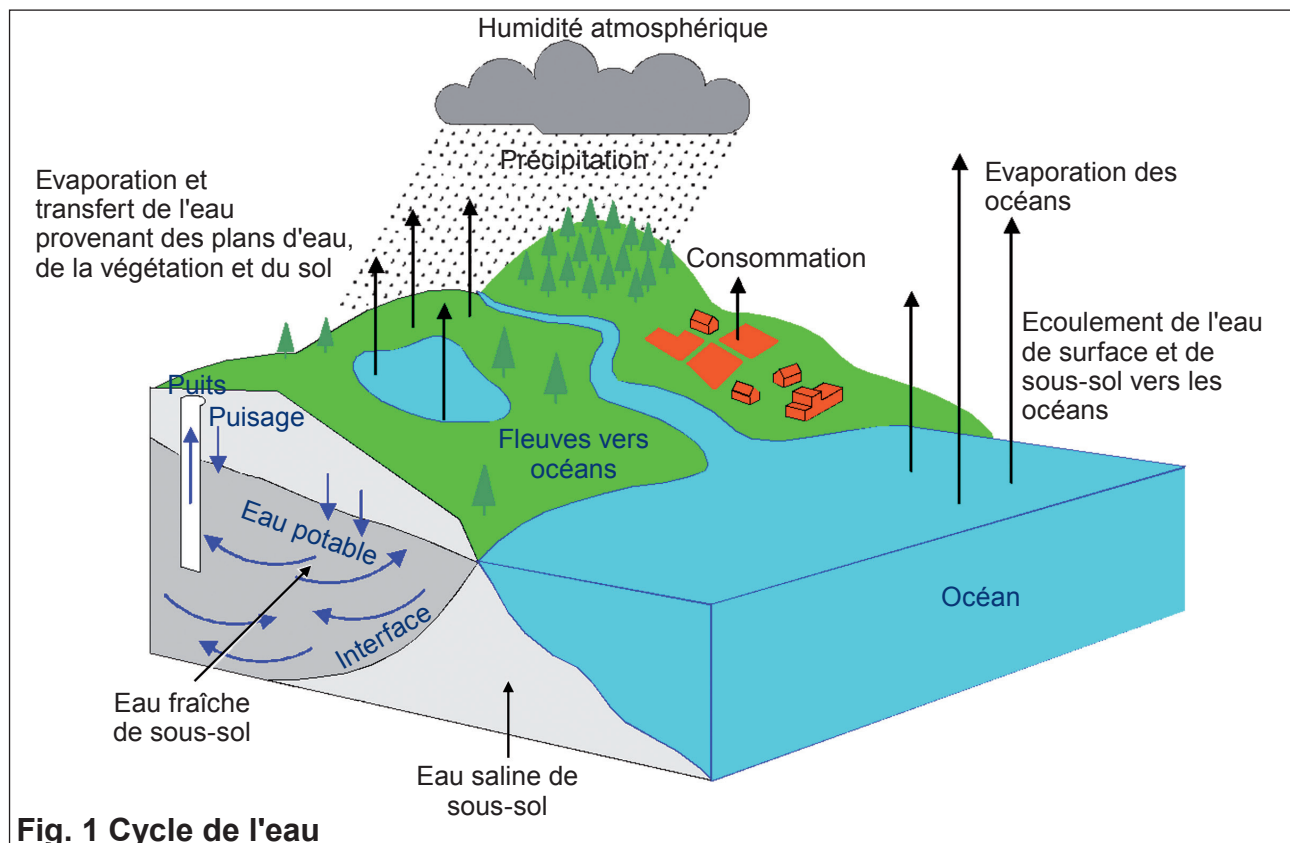


Fig. 1 Cycle de l'eau

**Tableau 1**

<b>Nom</b>	<b>Symbole</b>	<b>Nom commun</b>	<b>Effet</b>
<b>Bicarbonate de calcium</b>	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$		Tartre doux + $\text{CO}_2$
<b>Bicarbonate de magnésium</b>	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	Sulfate de magnésium	Tartre, corrosion
<b>Bicarbonate de sodium</b>	$\text{NaHCO}_3$	Soude de cuisson	Primage, mousse
<b>Carbonate de calcium</b>	$\text{CaCO}_3$	Craie, calcaire	Tartre doux
<b>Carbonate de magnésium</b>	$\text{MgCO}_3$		Tartre doux
<b>Carbonate de sodium</b>	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	Soude de lavage ou cendres de soude	Alcalinité
<b>Chlorure de calcium</b>	$\text{CaCl}_2$		Corrosion
<b>Chlorure de sodium</b>	$\text{NaCl}$	Sel commun	Electrolyse
<b>Dioxyde de silicate</b>	$\text{SiO}_2$	Silice	Tartre dur
<b>Hydroxyde de sodium</b>	$\text{NaOH}$	Soude caustique	Alcalinité, fragilisation
<b>Sulfate de calcium</b>	$\text{CaSO}_4$	Gypse, plâtre de Paris	Tartre dur
<b>Sulfate de magnésium</b>	$\text{MgSO}_4$	Magnésite	Corrosion
<b>Sulfate de sodium</b>	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Sels Glauber	Alcalinité

Le Tableau 1 présente, avec leurs noms techniques et leurs noms communément utilisés, leurs symboles chimiques et leurs effets, les impuretés courantes que l'on retrouve dans l'eau brute, à savoir : -

### **1.1.1 Solides dissous**

Substances formant du tartre ; les carbonates et sulfates de calcium et de magnésium sont les principaux. Tous les solides dissous ne fabriquent pas du tartre.

### **1.1.2 Solides en suspension**

Substances formant de la boue ; généralement des minéraux solides ou des particules organiques en suspension. Ces substances ne sont généralement pas un problème pour la plupart des eaux.

### **1.1.3 Gaz dissous**

Impuretés corrosives ; l'oxygène et le dioxyde de carbone peuvent se dissoudre rapidement dans l'eau.

### **1.1.4 Substances formant de l'écume**

Les impuretés minérales forment de la mousse ou de l'écume ; c'est généralement de la soude sous la forme de carbonates, de chlorures ou de sulfates.

En pratique, toutes les substances formant du sel dans la chaudière doivent être contrôlés chimiquement car ils peuvent produire des solides en suspension ou des boues plutôt que du tartre. La quantité d'impuretés présente est extrêmement faible et, dans toute analyse d'eau, ils sont exprimés sous forme de parties par million (ppm), au poids, ou en milligrammes par litre (mg/l).

## 1.2 Dureté de l'eau

L'eau est dite soit 'dure' soit 'douce'. L'eau dure contient des impuretés formant du tartre alors que l'eau douce contient peu ou pas d'impuretés. La différence entre les deux est facilement décelable en utilisant du savon. Il faut beaucoup plus de savon pour faire mousser de l'eau dure que pour faire mousser de l'eau douce.

La dureté est due à la présence de sels minéraux de calcium et de magnésium. Ces minéraux favorisent la formation du tartre.

Il y a deux classifications de dureté :-

### 1.2.1 Dureté alcaline (dureté temporaire)

Les bicarbonates de calcium et de magnésium sont responsables de la dureté alcaline. Ils se dissolvent dans l'eau pour former une solution alcaline, et lorsqu'on la chauffe, ils se décomposent en formant du dioxyde de carbone, du tartre mou ou de la boue. Le nom dureté temporaire est quelquefois utilisé car la dureté disparaît avec l'ébullition. (voir les Figures 2 et 3, page 10 - la dernière présente la situation dans la chaudière).

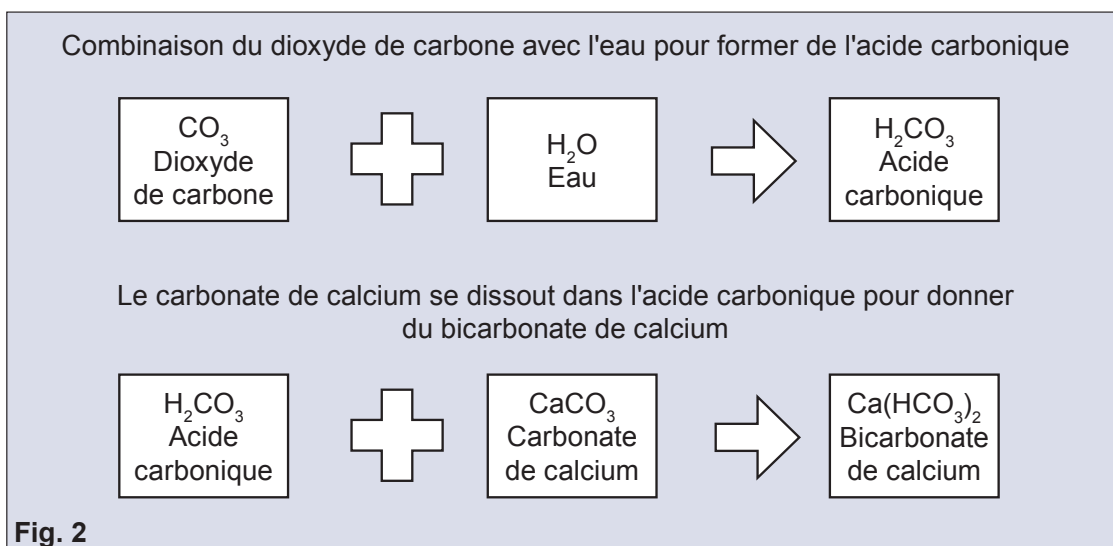
### 1.2.2 Dureté non alcaline et carbonates (dureté permanente)

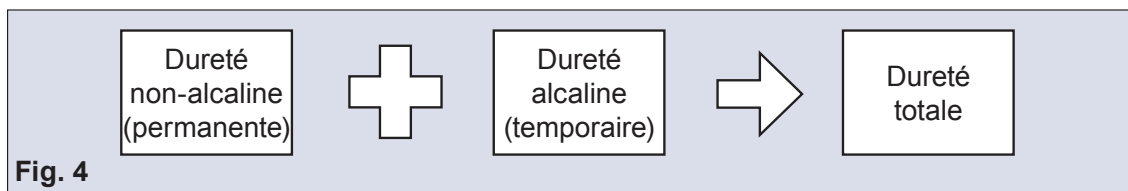
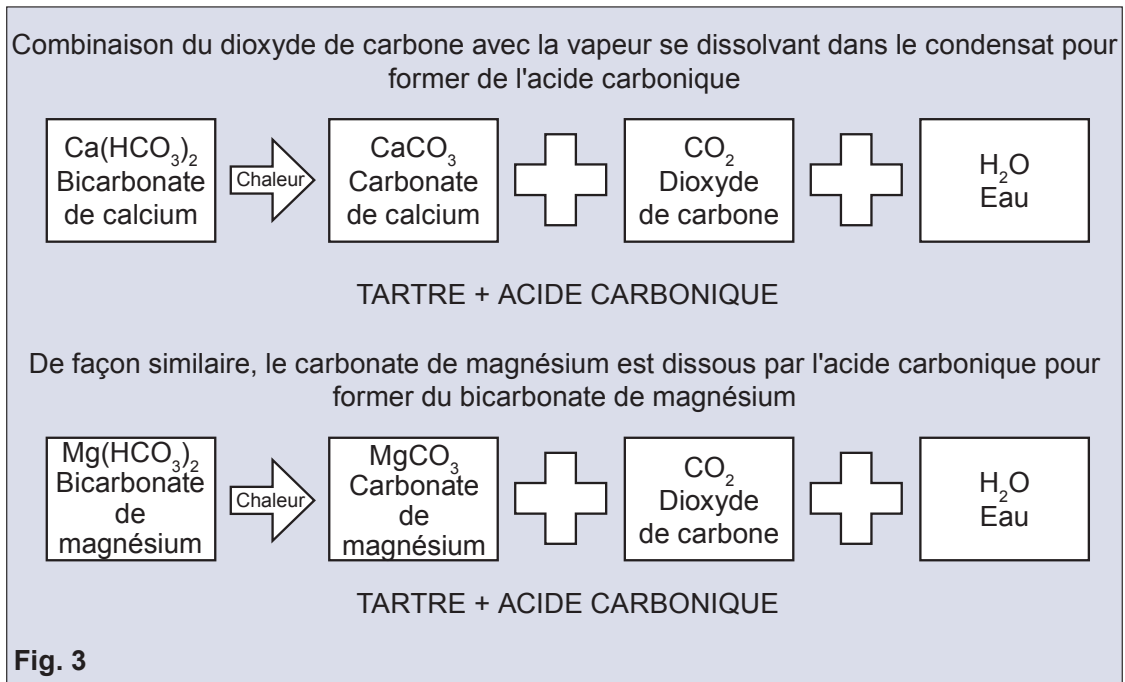
Elle est encore due aux sels de calcium et de magnésium mais cette fois, il s'agit des sulfates et des chlorures. Ils sont précipités à cause de leur solubilité réduite lorsque la température augmente et rend difficile l'évacuation du tartre dur.

La présence de silice dans l'eau de chaudière peut entraîner du tartre dur et il peut réagir avec les sels de calcium et de magnésium pour former des silicates qui retardent sévèrement le transfert thermique et provoquent une surchauffe du métal.

### 1.2.3 Dureté totale

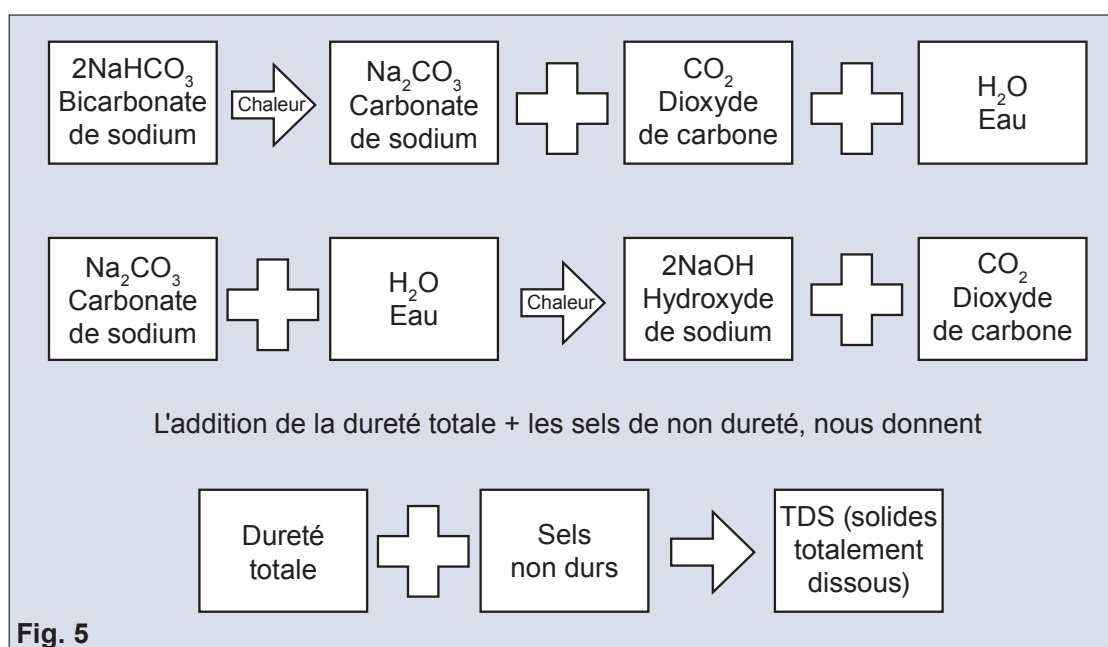
La dureté totale n'est pas classifiée comme étant un type de dureté, mais comme la somme des concentrations en ions calcium et magnésium présents lorsqu'ils s'expriment  $\text{CaCO}_3$ . Si l'eau est alcaline, une proportion de cette dureté, égale à la valeur de l'alcalinité totale qui est également exprimée  $\text{CaCO}_3$ , est considérée comme dureté alcaline, et le reste comme dureté non-alcaline (voir Figure 4).





### 1.2.4 Sels ne formant pas de tartre

Des sels non durs, comme les sels de sodium sont aussi présents, et sont bien plus solubles que les sels de calcium ou de magnésium et ne forment généralement pas de tartre sur les surfaces d'une chaudière, comme présenté Figure 5.



### 1.2.5 Unités comparatives

Lorsque les sels se dissolvent dans l'eau, ils forment des particules électriquement chargées d'ions.

Les parties métalliques (calcium, sodium, magnésium, etc.) peuvent être identifiées comme des cations car elles sont attirées par la cathode et transportent des charges électriques positives.

Les anions ne sont pas métalliques et transportent des charges négatives - bicarbonates, carbonates, chlorures, sulfates, etc. : ils sont attirés par les anodes.

Chaque impureté s'exprime généralement en une quantité équivalente de carbonate de calcium dont le poids moléculaire est de 100.

### 1.2.6 Qualité de l'eau brute

Ville	Titre hydrotimétrique	Ville	Titre hydrotimétrique
Angers	9 °f	La Rochelle	34 °f
Angoulême	17 °f	Lille	48 °f
Auxerre	26 °f	Nantes	9 °f
Bordeaux	25 °f	Niort	21 °f
Caen	28 °f	Paris	24 °f
Châteauroux	24 °f	Rochefort	40 °f
Cognac	25 °f	Rennes	9 °f

## 1.3 Valeurs du pH

Le pH est une autre valeur que nous devons considérer. Ce n'est ni une impureté ni un constituant mais simplement une valeur numérique représentant la concentration en ion hydrogène dans un liquide – c'est une mesure de la nature acide ou alcaline. L'eau, H<sub>2</sub>O, a deux types d'ions, des ions hydrogènes (H<sup>+</sup>) et hydroxydes (OH<sup>-</sup>).

Tableau 2

Valeur du pH	Concentration en ions hydrogènes H <sup>+</sup>	Concentration en ions hydroxydes OH <sup>-</sup>	Nature
0	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-14</sup>	Acide
7	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>	neutre
14	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>0</sup>	Alcaline

S'il y a plus d'ions hydrogènes, la solution sera acide avec un pH entre 0 et 6. S'il y a plus d'ions hydroxydes, la solution sera alcaline avec un pH entre 8 et 14. S'il y a égalité d'ions hydrogènes et hydroxydes, la solution sera dite neutre avec un pH de 7.

Les acides et les alcalins augmentent plus la conductivité de l'eau qu'une solution neutre ne le fait. Par exemple, un échantillon d'eau avec un pH de 12 a une conductivité plus élevée qu'un échantillon qui a un pH de 7.

### 1.3.1 Abaque de pH

La Figure 6 montre un abaque de pH, qui illustre les valeurs de pH, déjà mentionnées numériquement et en relation avec des substances ordinaires.

pH : une échelle de l'acidité et de l'alcalinité

pH < 7 = acide, pH 7 = neutre, pH > 7 = alcalin

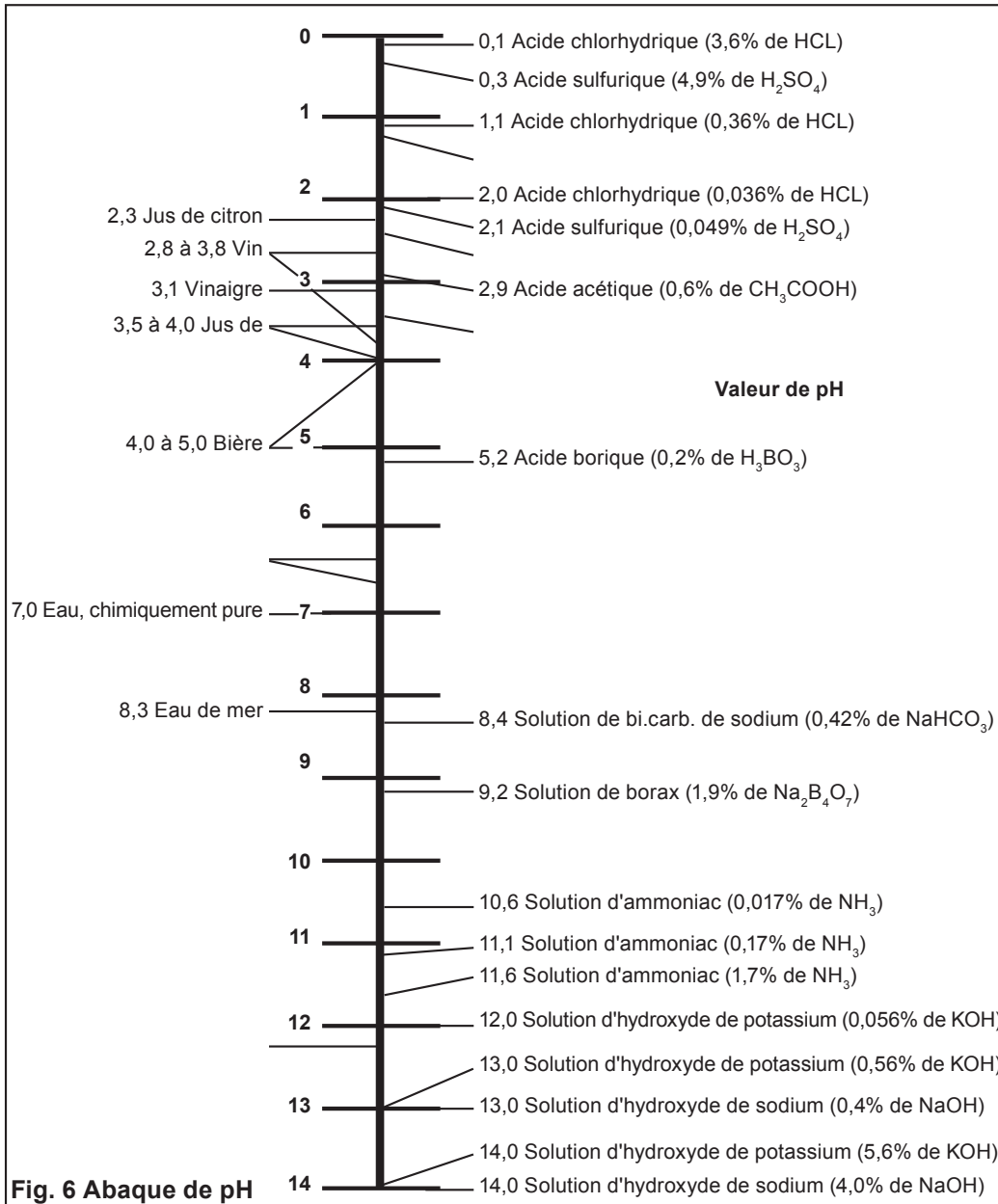


Fig. 6 Abaque de pH

## 1.4 Traitement de l'eau

### 1.4.1 Objectifs

Voilà ce qu'on attend d'une installation avec chaudière de vapeur :

- Longue durée de vie.
- Rendement maximal.
- Fonctionnement sans danger.
- Minimum d'entretien.

La qualité du traitement donné à l'eau utilisée pour produire la vapeur de la chaudière, aidera à déterminer si ce qu'on attend est atteint. Il faut agir selon les critères suivants :

### **1.4.2 Eliminer le tartre**

Si l'eau d'alimentation est dure et si elle n'est pas contrôlée chimiquement, les surfaces de transfert thermique s'entartrent, ce qui réduira le transfert et le rendement, et nécessitera le nettoyage de la chaudière. Dans les cas extrêmes, des zones à très fortes températures peuvent entraîner des détériorations mécaniques et même la destruction des tubes de la chaudière.

### **1.4.3 Eliminer la corrosion et les attaques chimiques**

Si l'eau contient des gaz dissous, particulièrement de l'oxygène, les surfaces de la chaudière, la tuyauterie et les autres appareils seront sujets à la corrosion. Si le pH de l'eau est trop bas, la solution acide que cela provoque attaquera les surfaces métalliques.

Si elle est trop alcaline, cela entraîne d'autres problèmes comme la production de mousses (primage chimique), ce qui sera expliqué plus loin.

La fragilisation caustique ou les craquelures caustiques, qui provoque des craquelures du métal, doivent également être évitées pour éviter la détérioration des métaux. Les craquelures et la fragilisation sont provoquées par une concentration trop élevée en hydroxydes de sodium. Les chaudières modernes soudées sont moins sensibles que les anciennes assemblées par des rivets, en dehors des extrémités des tubes.

### **1.4.4 Une vapeur de bonne qualité**

Si les impuretés de l'eau d'alimentation de la chaudière ne sont pas correctement traitées, elles peuvent être entraînées dans le réseau vapeur. L'entraînement peut être provoqué par deux causes.

- a. le primage ou la mousse. Le primage est l'éjection de l'eau de la chaudière au niveau du départ vapeur et résulte généralement de la façon dont la chaudière fonctionne :
  - Fonctionnement de la chaudière avec un niveau d'eau trop élevé.
  - Fonctionnement de la chaudière en dessous de sa pression de service ; ce qui augmente le volume spécifique de la vapeur et donc la vitesse.
- b. La deuxième cause de l'entraînement est la mousse qui est due aux conditions chimiques de l'eau. Les bulles de vapeur restent petites, n'éclatent pas et sont entraînées dans le système.

L'entraînement de solides dans le réseau vapeur peut provoquer des dépôts et développer la corrosion. Les vannes et les purgeurs de condensat se bloquent.

### **1.4.5 Sécurité**

Les dangers de surchauffe provoqués par le tartre, et les dangers de corrosion provoqués par les gaz dissous sont faciles à comprendre.

Dans les cas extrêmes, la formation de mousse, de tartre et de boue peut mener à un fonctionnement incorrect des régulations de niveau.

Lorsqu'une chaudière génère de la vapeur, toute impureté existant dans l'eau d'alimentation qui n'est pas entraînée par l'évaporation avec la vapeur se concentrera dans l'eau de chaudière. Selon la nature des impuretés et les conditions existant à l'intérieur de la chaudière, de telles impuretés peuvent former du tartre sur les surfaces chaudes de la chaudière, elles peuvent précipiter et finalement se diviser en particules solides en suspension ou en une boue ou elles peuvent rester dissoutes dans l'eau de la chaudière comme solides dissous.

Le traitement de l'eau d'alimentation de chaudière qui sera étudié plus loin dans ce guide, est nécessaire pour minimiser la corrosion, pour éviter le tartre, minimiser le primage et l'entraînement de l'eau de chaudière dans le réseau de vapeur.

## 1.5 Traitements externes d'eau

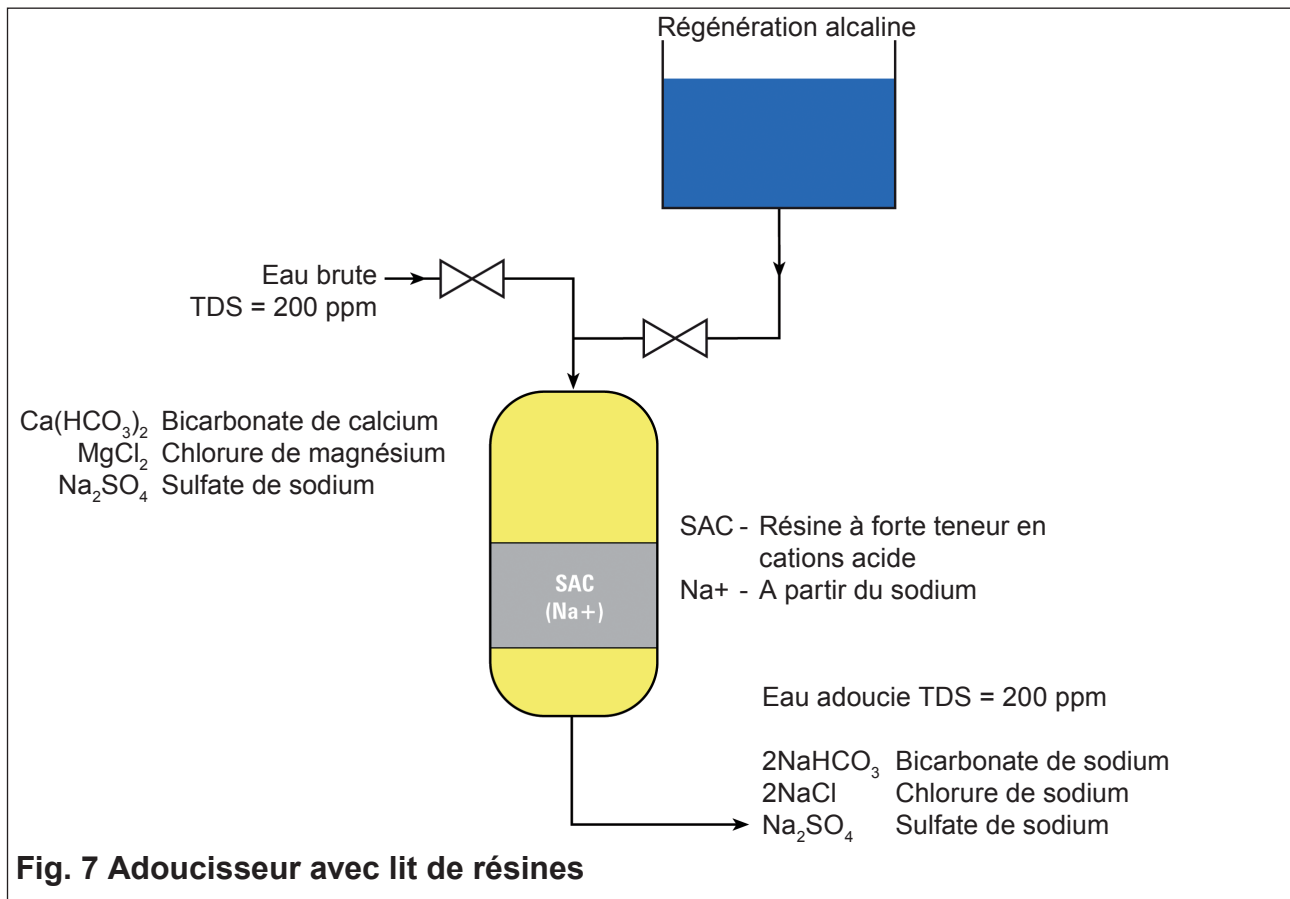
Voici la liste des différents traitements externes d'eau :

1. Adoucissement avec chaux ou avec soude et chaux
2. Echange d'ions :
  - a - Echange à base d'ions
  - b - Décarbonatation
  - c - Déminéralisation
3. Osmose inverse

Avec le traitement (1), adoucissement avec chaux, la chaux hydratée (hydroxyde de carbone) réagit avec les bicarbonates de calcium et de magnésium pour former une boue qui peut être évacuée. Ce traitement réduit la dureté alcaline (temporaire). L'adoucissement avec la chaux et la soude (cendres de soude) réduit la dureté non alcaline (permanente) par réaction chimique.

L'osmose inverse (3) est un process par lequel on force l'eau pure à passer dans une membrane semi-perméable qui retient une solution concentrée d'impuretés qui sera évacuée.

Mais les méthodes les plus utilisées sont celles présentées dans le groupe 2 - échanges d'ions - et nous allons donc nous concentrer sur celles-ci avec plus d'attention.



### 1.5.1 Echange d'ions

Un échangeur d'ions est normalement constitué d'un matériau non soluble se présentant sous la forme de couche de résines de 0,5 à 1,0 mm de diamètre. Les couches de résines sont normalement utilisées sous forme de couches contenues dans un réservoir en plastique armé fibre de verre résistant à la pression. Les couches de résines sont poreuses et hydrophiles - ce qui signifie qu'elles absorbent l'eau. La structure des couches de résines contient des groupes ioniques fixes associés avec des ions mobiles de charges opposées. Ces ions mobiles peuvent être remplacés par des ions de même charge provenant des sels dissous dans l'eau entourant les couches de résines.

### **1.5.2 Adoucissement par permutation ionique**

C'est la forme la plus simple d'échange d'ions et aussi la plus utilisée. Le lit de résine est initialement activé ou chargé en passant au travers une solution à 7 - 12 % de saumure (chlorure de sodium ou sel commun), qui remplit la résine d'ions sodium. Après, l'eau qui doit être adoucie est pompée à travers les couches de résine, et l'échange d'ions a lieu. Les ions calcium et magnésium entraînent les ions sodium présents dans la résine, laissant l'eau riche en sels de sodium. Il faut se souvenir que les ions sodium restent en solution à des concentrations et des températures très élevées et ne forment pas de tartre nuisible dans la chaudière.

La Figure 7 nous permet de voir que les ions de dureté totale sont échangés avec le sodium. Avec un adoucissement par échange à base de sodium, le niveau de solides totalement dissous (TDS en part par million ou ppm) n'est pas modifié et le pH ne change pas. Ce que nous avons fait est d'échanger un groupe de tartre potentiellement nuisible par des sels non nuisibles ne formant pas de tartre. Comme le niveau de TDS ne change pas, l'épuisement du lit de résine ne peut pas être détecté par une augmentation de la conductivité (TDS et conductivité sont liés). La régénération est donc activée en fonction du temps de fonctionnement, soit en fonction du débit total.

Les adoucisseurs sont relativement abordables. Ils fonctionnent et produisent de l'eau traitée pendant de nombreuses années. Ils peuvent être utilisés avec succès même dans des zones à dureté alcaline élevée mais temporaire s'il y a un grand pourcentage de retour de condensat - > 50 %. Lorsqu'il a peu ou pas de retour de condensat, un type plus sophistiqué d'échanges d'ions est préférable.

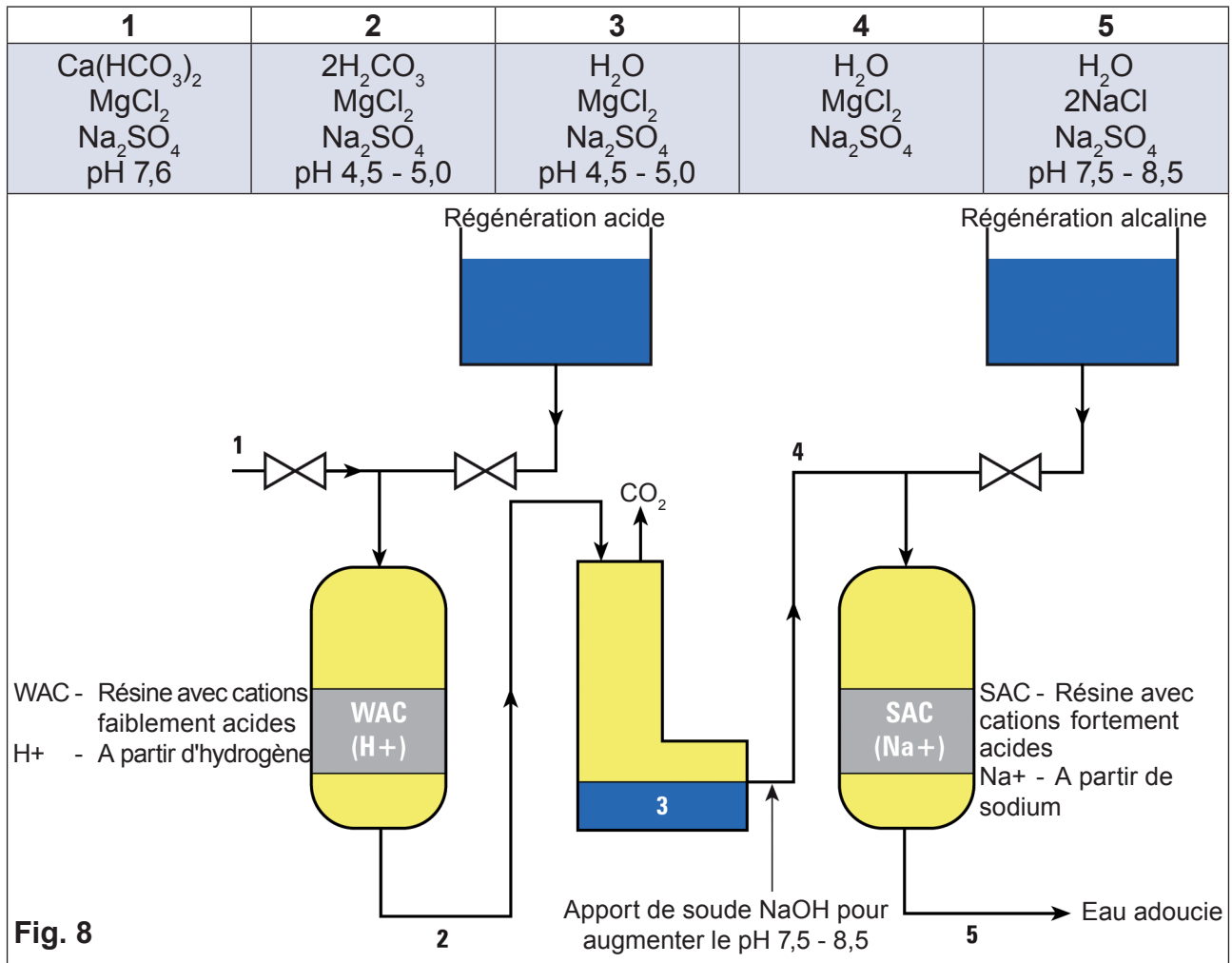
**Quelquefois un pré-traitement adoucissant calcaire/soude est employé avant l'échange à base d'ions. Cela réduit la charge sur la résine.**

### **1.5.3 Décarbonatation**

L'inconvénient d'un adoucissement sur base d'échange d'ions, c'est qu'il ne réduit ni les TDS ni l'alcalinité. Pour réduire l'alcalinité, on peut utiliser un décarbonateur.

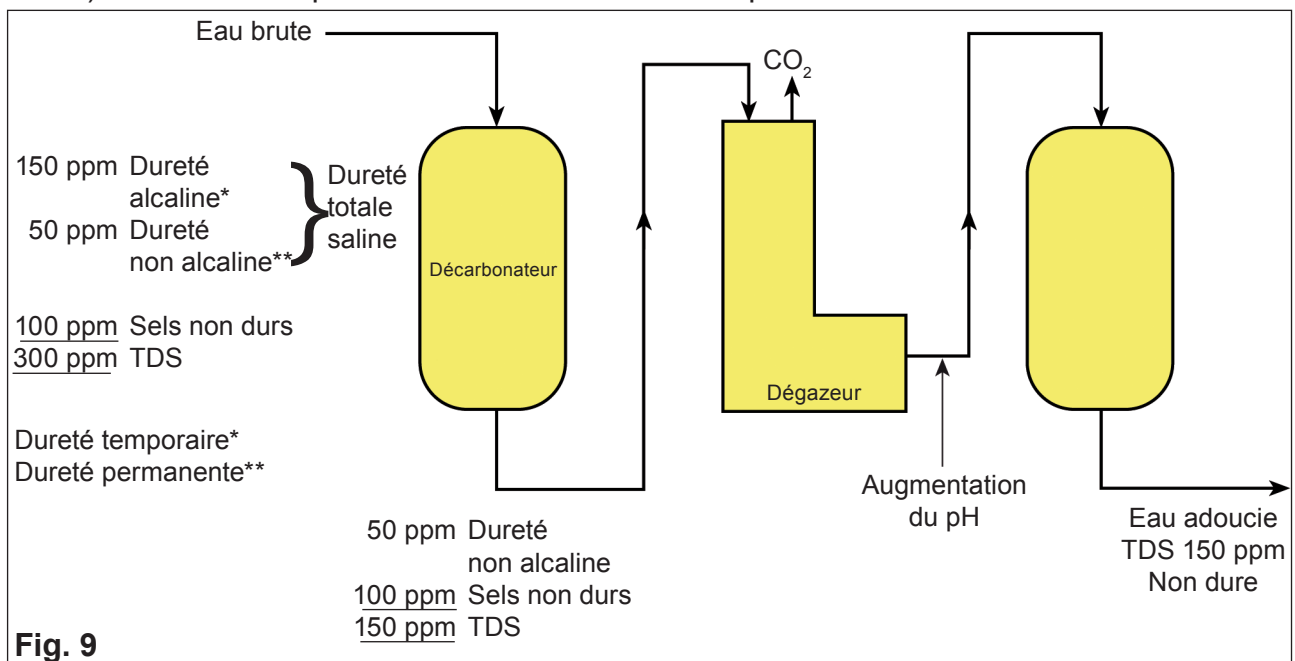
Il existe différents types de décarbonatation mais le plus courant est présenté Figure 8. C'est un ensemble de trois unités, une décarbonatation, suivi par un dégazeur et d'un adoucisseur sur la base d'échange d'ions.

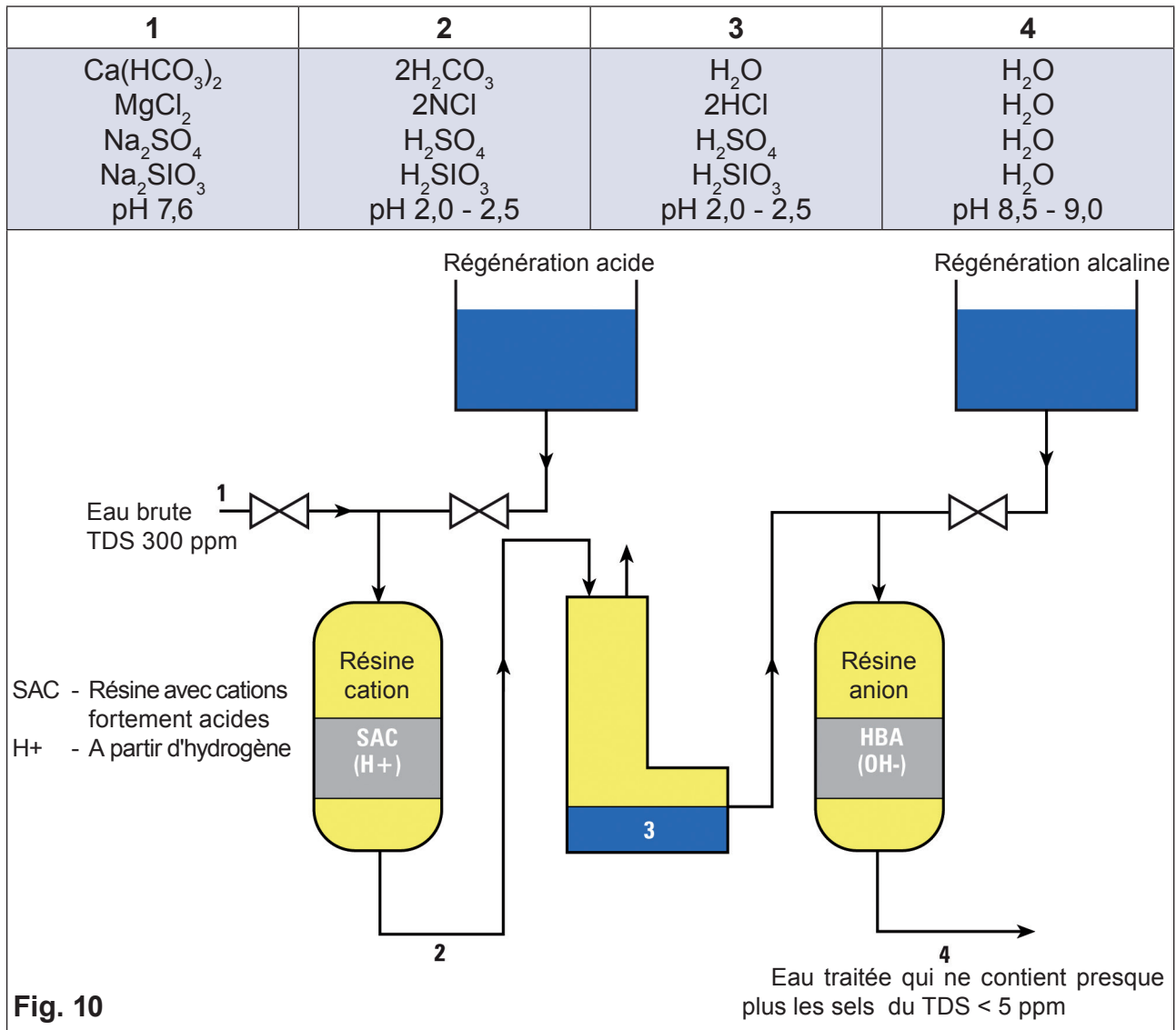
Une unité de décarbonatation permet d'évacuer temporairement la dureté, comme on peut le voir sur la Figure 9. Ce système sera généralement employé lorsqu'on utilise une grande quantité d'eau d'appoint.



### 1.5.4 Décarbonateur

Le système présenté ci-dessus est parfois appelé adoucisseur à écoulement "split". Une décarbonatation est rarement utilisée seule (c'est à dire sans un adoucisseur par échange d'ions) car la solution produite est de nature acide et peut causer de la corrosion.





### 1.5.5 Déminéralisation

Le process évacue virtuellement tous les sels. Cela implique de faire passer de l'eau brute sur des résines d'échange cationiques et anioniques. (Figure 10). Quelquefois les résines peuvent être contenues dans un seul réservoir qui est appelé déminéralisation par "couches mixtes".

Le process évacue virtuellement tous les minéraux et produit de l'eau de très bonne qualité qui ne contient presque pas de solides dissous. Elle est utilisée pour des chaudières à très haute pression comme celles que l'on trouve dans les centrales électriques.

Si l'eau brute contient une grande quantité de solides suspendus, elle va rapidement infecter le matériau d'échange d'ions, et augmenter drastiquement les coûts de fonctionnement. Dans ces cas, prétraiter l'eau brute - par clarification ou filtration - peut être nécessaire.

### 1.5.6 Osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de traitement de l'eau par lequel l'eau est poussée à travers une membrane semi-perméable dont les pores sont minuscules. Ainsi, les impuretés qui sont trop grosses pour passer à travers la membrane sont retenues puis évacuées.

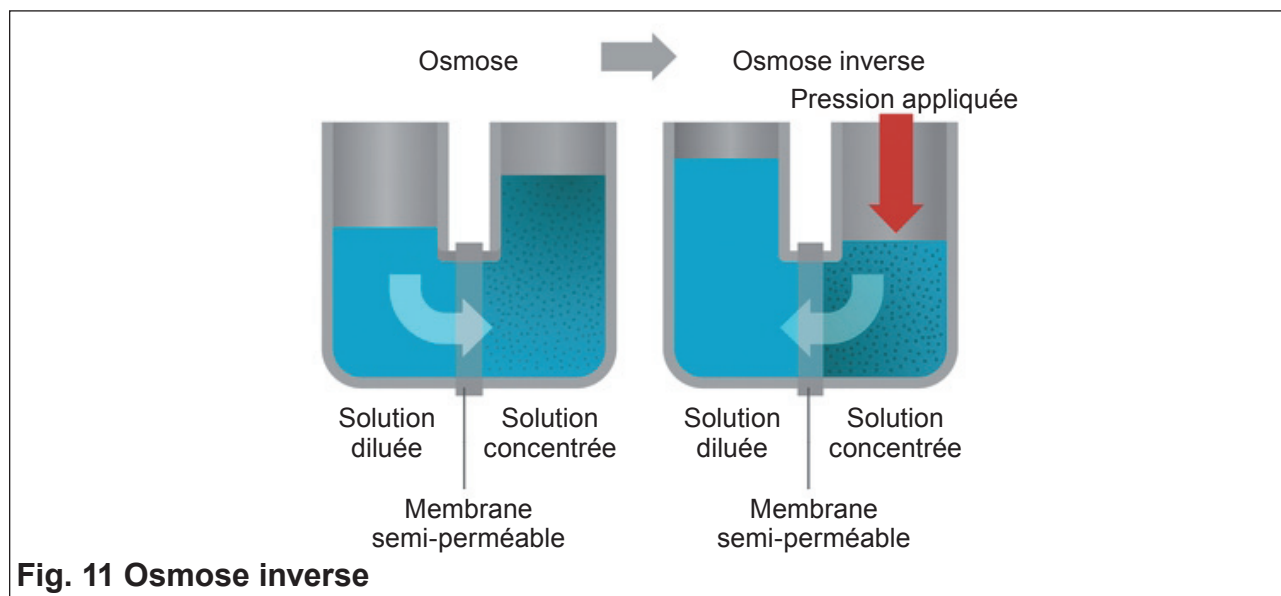


Fig. 11 Osmose inverse

#### 1.5.6.1 Fonctionnement de l'osmose inverse

Si l'eau brute à traiter provient d'un puits ou d'une autre source privée, il faudra peut être au préalable, désinfecter et préfiltrer l'eau en amont de l'appareil d'osmose inverse, pour éliminer le chlore, les particules et les sédiments, et retenir les contaminants susceptibles de souiller ou d'endommager la membrane.

Ce système permet une filtration de 90 à 99,9% des contaminants.

Le procédé est dit "inverse" car il nécessite une pression suffisante pour "forcer" l'eau pure à passer à travers la membrane.

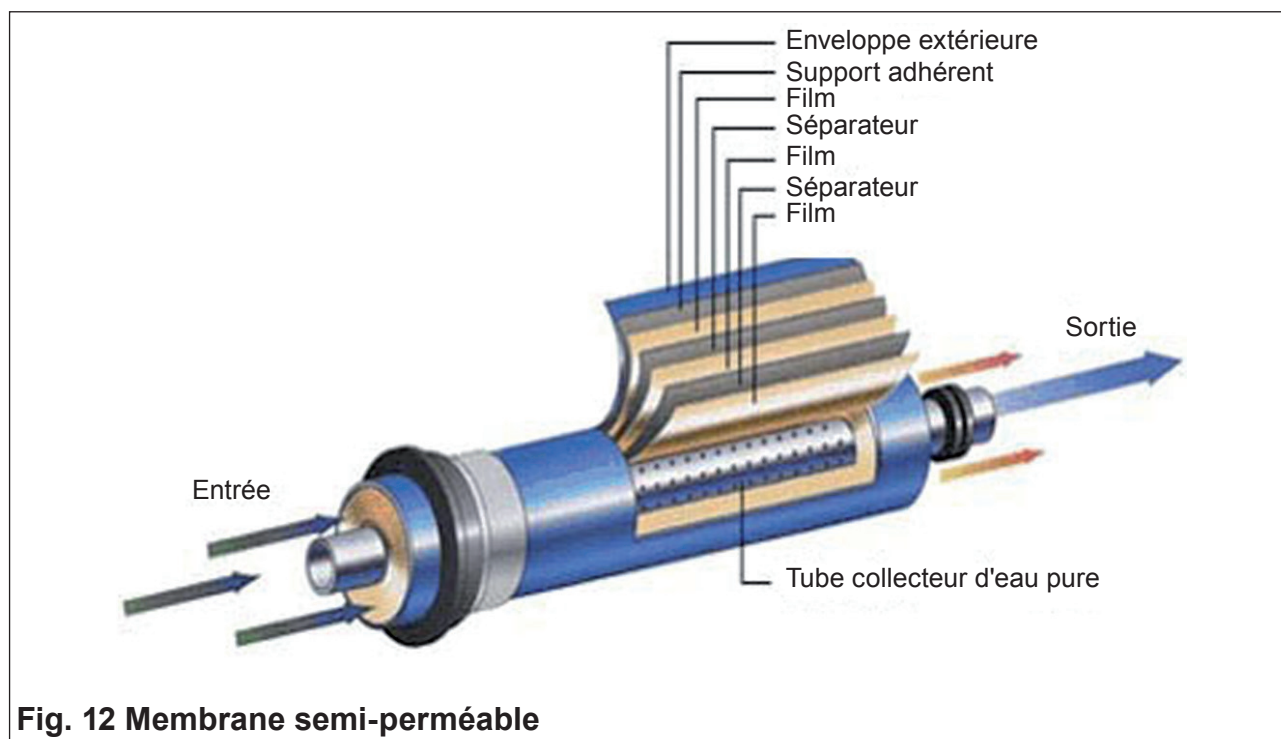


Fig. 12 Membrane semi-perméable

L'osmose inverse s'effectue généralement en quatre étapes :

1. Durant le processus de filtration initiale, l'eau du robinet ou du puits (pressurisé par une pompe relais) passe à travers un pré-filtre à sédiments qui retient les plus grosses particules qui pourraient obstruer la membrane d'osmose inverse.
2. L'eau est ensuite acheminée vers un pré-filtre au charbon actif qui emprisonne les minéraux et les contaminants comme le chrome, le mercure, le cuivre, le chloramine et les pesticides. Il retient aussi le chlore, une fonction importante puisque le chlore abrège la durée utile de la membrane.
3. L'eau est transférée sous pression dans le module d'osmose inverse, où sont séparés le flux d'eau pure et le flux d'eau chargée de contaminants indésirables. Le diamètre des pores des membranes d'osmose inverse sont de l'ordre du millème de micromètre (un micromètre est égal à  $10^{-6}$ m soit 1 millème de millimètre). Grâce à la pression de l'eau et de la membrae, un phénomène d'osmose de l'eau se produit.
4. L'eau traitée aboutit dans réservoir ou une citerne de stockage.

Le bon fonctionnement de la membrane peut être vérifié grâce au testeur de TDS qui mesure la totalité résiduelle des solides dissous dans l'eau osmosée en comparaison avec l'eau non osmosée.

#### **1.5.6.2 Avantages d'une eau osmosée**

- Opération à température ambiante ce qui évite la dégradation de molécules fragiles dans le domaine agro-alimentaire.
- Pas d'intervention de réactifs chimiques comme des agents d'extraction qui sont des sources de pollution.
- Consommation énergétique faible vis à vis de la distillation pour le dessalement de l'eau.

#### **1.5.6.3 Inconvénients d'une eau osmosée**

- Baisse de la perméabilité et modification de la sélectivité en cas de colmatage des membranes.
- Sélectivité entre les espèces chimiques "soluté" toujours inférieure à 100%.
- Durée de vie limitée des membranes soit par perte de résistance mécanique soit par suite d'une mauvaise tenue aux réactifs utilisés pour le nettoyage.
- La filtration est telle que quasiment tous les minéraux sont supprimés de l'eau. Il convient donc de reminéraliser l'eau après la filtration par la membrane osmotique.
- Les pertes en eau. En effet, le concentrat qui contient tous les sels qui n'ont pas traversé la ou les membranes, représente environ 20% du débit entrant, pour des installations industrielles. Cette eau contient alors trop de sel pour l'agriculture et est donc inutilisable.

# Chapitre 2

## Les différents types de chaudière - Economiseurs - Brûleurs -

### 2.1 Généralités sur les chaudières vapeur

Les chaudières vapeur sont les éléments les plus importants d'un réseau vapeur ; avant tout, c'est l'endroit où se crée la vapeur. Une chaudière peut être définie comme un réservoir dans lequel l'énergie d'un combustible est cédée et transférée à un liquide pris dans le cas des chaudières vapeur ; l'énergie produite permet de changer l'état d'une phase liquide à une phase gazeuse.

Historiquement, les chaufferies vapeur ont toujours nécessité un haut niveau de surveillance pour obtenir un degré de sécurité suffisant. De nos jours, les installations doivent travailler d'une manière efficace et pouvoir répondre aux attentes des utilisateurs aussi souvent que possible.; cela signifie que certaines chaudières travaillent en continu ou sont arrêtées longtemps ou au contraire s'arrêtent sur des intervalles courts.

Dans tous les cas, les technologies modernes exigent que la chaudière soit dans le régime le mieux adapté à l'application avec des éléments de régulation efficaces pour fournir le rendement et la sécurité requis.

Une chaudière est souvent l'élément le plus gros d'une installation vapeur. Sa plage de fonctionnement est définie en fonction des paramètres de l'installation. Souvent, plusieurs chaudières sont utilisées pour répondre aux fortes demandes quand des variations de charge existent.

Les chaudières modernes se fabriquent dans des gammes importantes pour répondre à des débits importants ou faibles.

Généralement, lorsque plusieurs chaudières sont nécessaires pour répondre à la demande vapeur, il est plus économique d'installer les éléments dans une chaufferie centralisée afin de diminuer le coût de chaudières locales.

#### 2.1.1 Avantages :

- Choix du combustible et tarif adapté.
- Equipement réduit donc réduction des pièces détachées.
- Système de récupération d'énergie adapté à l'ensemble pour un amortissement plus rapide.
- Supervision réduite permettant aux personnels de vaquer à d'autres fonctions.
- Choix économique de la taille des chaudières.
- Cheminées regroupées et rejets des fumées plus facilement contrôlés.
- Sécurité et efficacité plus facilement contrôlés.

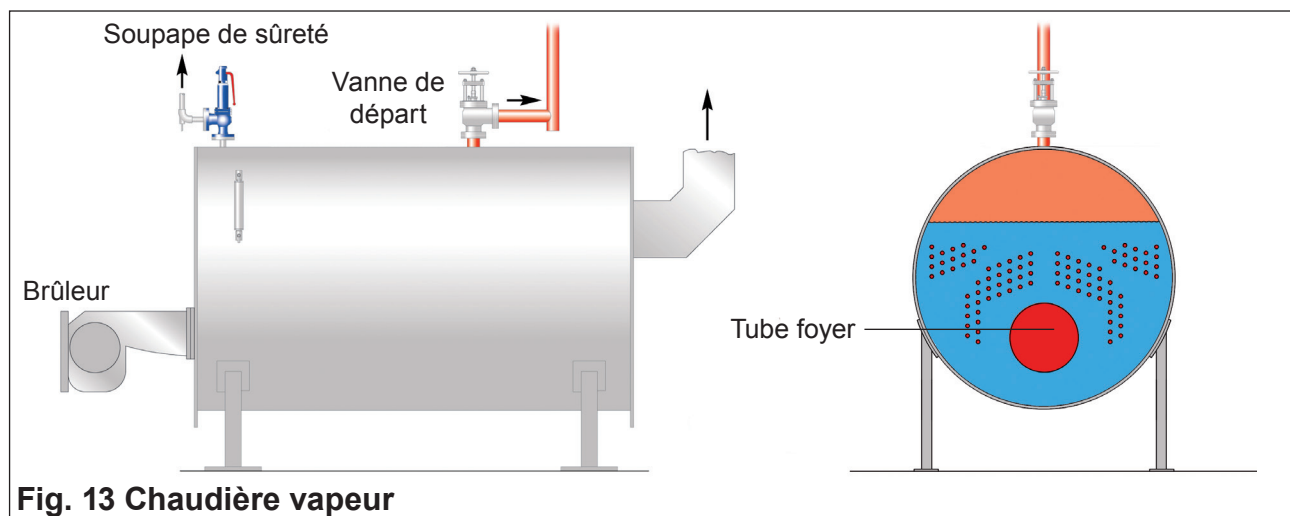


Fig. 13 Chaudière vapeur

## 2.2 Différents combustibles

Les combustibles les plus couramment utilisés sont :

- le gaz naturel
- le fioul
- le charbon

Cependant, certains combustibles de récupération (déchets ou autres) sont également utilisés ainsi que l'électricité. Le combustible est généralement choisi en fonction de la tarification appliquée.

### 2.2.1 Charbon

Ce terme générique correspond à un combustible solide contenant une forte teneur en carbone. Ce combustible n'est plus ou peu utilisé en France actuellement.

- peat
- lignite
- bitume
- semi bitume
- anthracite

En général, 1 kg de charbon permet de produire 8 kg de vapeur.

### 2.2.2 Fioul

Les fiouls sont des résidus de pétrole. Après différents étages de distillation, on retrouvera le fioul léger, la paraffine, le kérosène et le gas oil. Il existe différents grades de fuel :

Classe D : gas oil

Classe E : fioul léger

Classe F : fioul moyen ou peu lourd

Classe G : fioul lourd

En général 14 kg de vapeur sont fabriqués par la combustion d'1 litre de fuel.

### 2.2.3 Gaz

Combustible facilement brûlé avec très peu d'excès d'air comburant.

Deux types de gaz sont disponibles :

- gaz naturel : produit en sous sol. Il est utilisé dans son état naturel mis à part les impûretés à éliminer, il contient du méthane sous sa forme la plus commune.
- gaz liquéfiés : ils sont produits après raffinage du pétrole et sont stockés à l'état liquide sous pression tel que le propane et le butane.

## 2.3 Chaudières à tubes de fumées

Ces chaudières fonctionnent en véhiculant la chaleur dans les tubes situés en position horizontale et en transférant l'énergie à la masse d'eau contenue dans l'enveloppe cylindrique. Il y a différentes configurations possibles en fonction du nombre de passes dans lesquelles, à partir du foyer de la chaudière, les fumées sont véhiculées vers l'extérieur. Une configuration typique est représentée Figure 16 chaudière 2 passes.

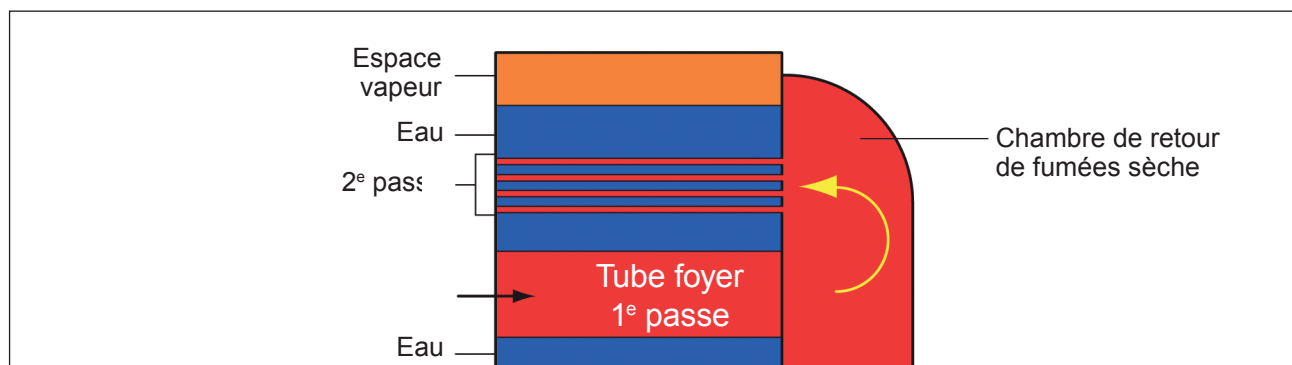
Les Figures 14 et Figures 15 montrent les 2 méthodes pour transférer les fumées vers la 2<sup>ème</sup> passe. Le rendement sera meilleur dans la configuration 3 où la plaque arrière est immergée. La chambre de retour de fumées est positionnée dans la chaudière, ce qui permet une surface de chauffe plus grande ; l'eau capte la chaleur au point le plus élevé, c'est-à-dire à l'arrière de la chambre de retour de fumées.

Il est important de préciser que la température des fumées doit être au maximum de 420°C pour les chaudières en acier noir et de 470°C pour celles en acier allié à l'entrée de la chambre de retour de fumées.

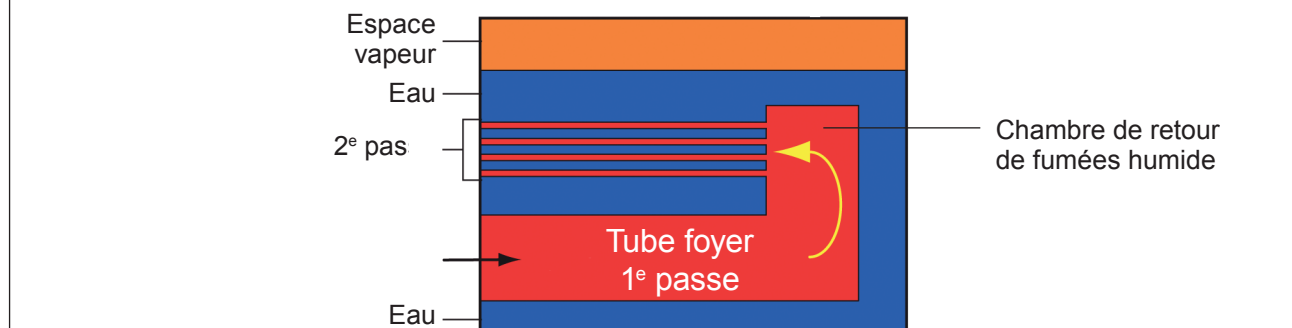
Une température plus élevée entraînerait une surchauffe de la plaque tubulaire.

Ces limitations ont été établies par les fabricants de chaudières et rentrent dans les critères de construction.

Il existe différents types de chaudières à tubes de fumées que nous détaillons ci-après.



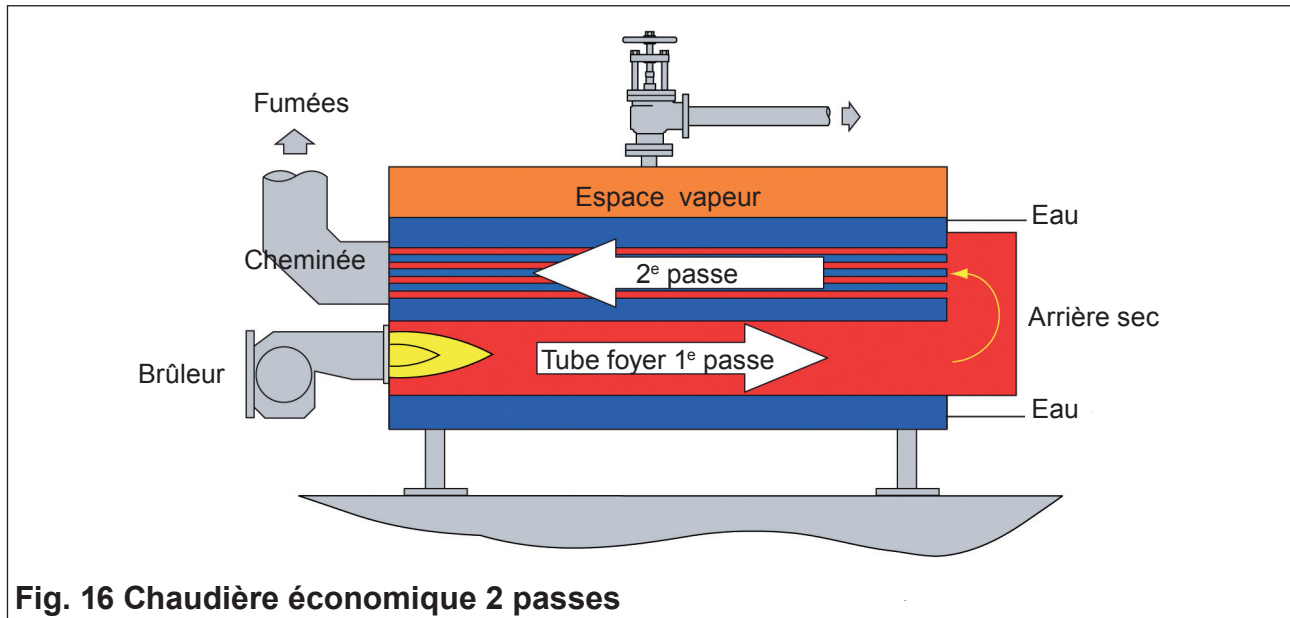
**Fig. 14 Chaudière à plaque arrière sèche**



**Fig. 15 Chaudière à plaque arrière humide**

### 2.3.1 Chaudière compacte

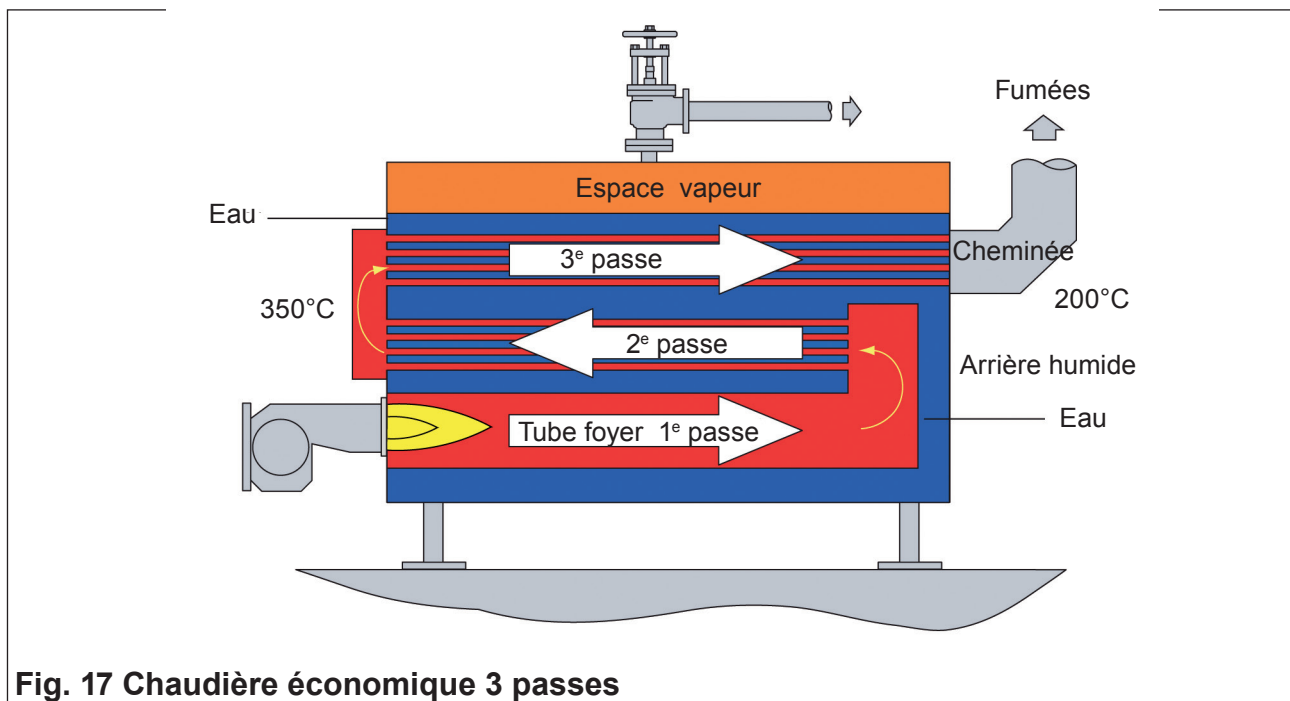
Elle possède une enveloppe externe cylindrique contenant 2 conduits de gros diamètre dans lesquels est placé le foyer. Les gaz de combustion sortent du tube foyer dans une chambre en brique réfractaire et sont véhiculés à travers les tubes de petits diamètres situés de part et d'autre du tube foyer. Ces tubes représentent une grande surface d'échange pour chauffer l'eau. Les fumées sont ensuite extraites de la chaudière en face avant par un extracteur puis à travers la cheminée.



**Fig. 16 Chaudière économique 2 passes**

Les dimensions de ces chaudières 2 passes peuvent être de 3 m de long pour un diamètre de 1,7 m jusqu'à 7 m de long pour un diamètre de 4 m. Elles peuvent produire de 1 000 kg/h à 15 000 kg/h.

Le développement de ces chaudières a permis de réaliser par la suite les générateurs à 3 passes le plus souvent utilisés de nos jours (voir Figure 17).



**Fig. 17 Chaudière économique 3 passes**

### 2.3.2 Chaudière compacte 3 passes

Transfert de chaleur d'une chaudière 3 passes à chambre de retour de fumées immergée.

	Surface d'échange	Température	% de transfert de chaleur
1 <sup>ère</sup> passe	11 m <sup>2</sup>	1600° C	65%
2 <sup>ème</sup> passe	43 m <sup>2</sup>	400° C	25%
3 <sup>ème</sup> passe	46 m <sup>2</sup>	350° C	10%

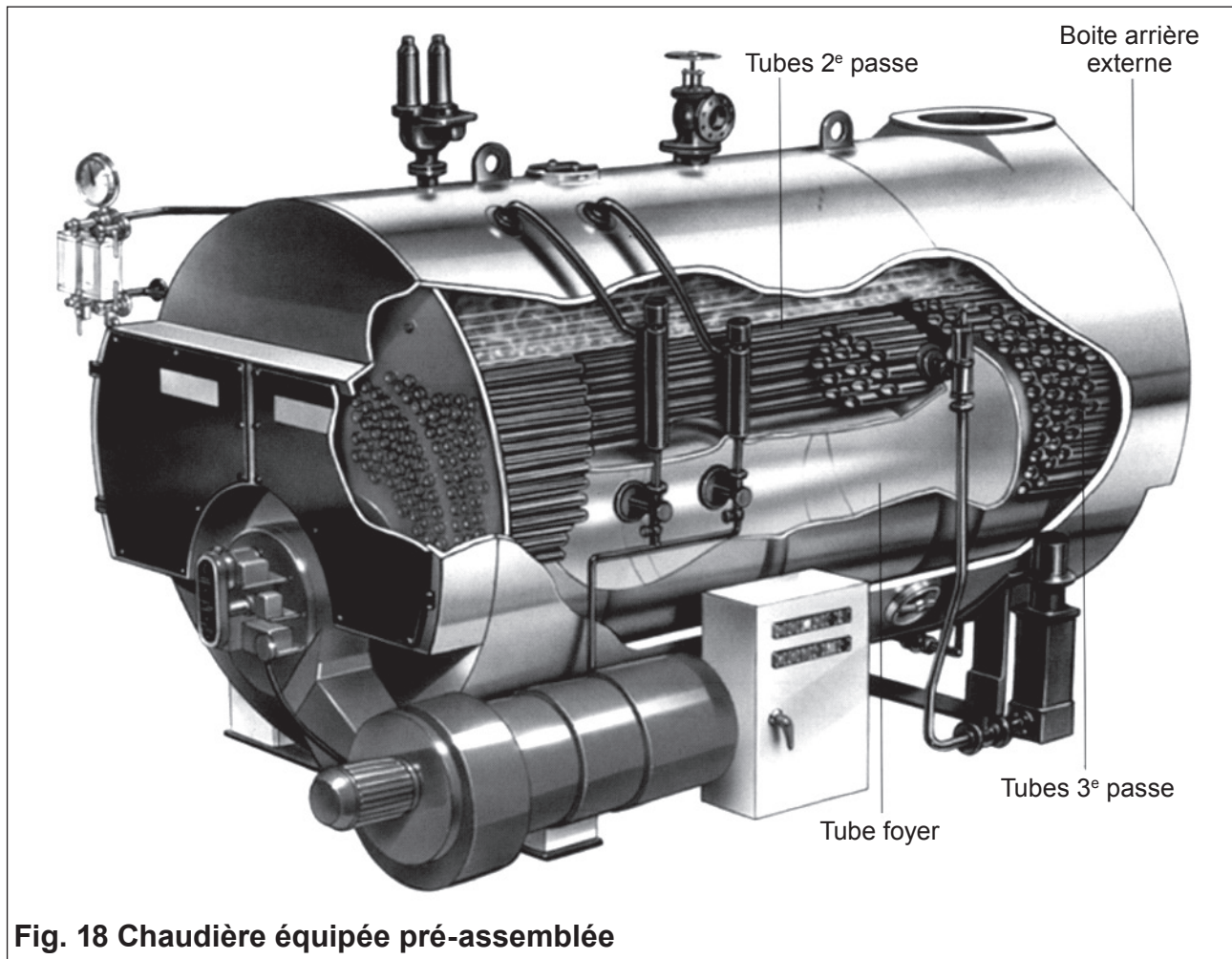


Fig. 18 Chaudière équipée pré-assemblée

### 2.3.3 Chaudière à tubes de fumées équipée

L'évolution des chaudières a permis d'équiper celles-ci d'un nombre de tubes de plus en plus important. Les anciennes chaudières étaient volumineuses et nécessitaient une chaufferie adaptée. En forçant l'évacuation des fumées à travers une série de tubes, les chaudières sont devenues plus compactes et leur rendement s'est amélioré. Les chaudières modernes actuelles sont désormais fournies toutes équipées.

Elles sont livrées en chaufferie et seules les tubulures de liaison côté vapeur, eau d'appoint et purge ainsi que l'alimentation en combustible et électricité doivent être effectuées.

Ces chaudières sont classées par leur nombre de passe. Le tube foyer étant la première passe. La chaudière la plus communément utilisée est montrée Figure 18 chaudière 3 passes avec 2 groupes de tubes de fumées et une évacuation des fumées à l'arrière de la chaudière.

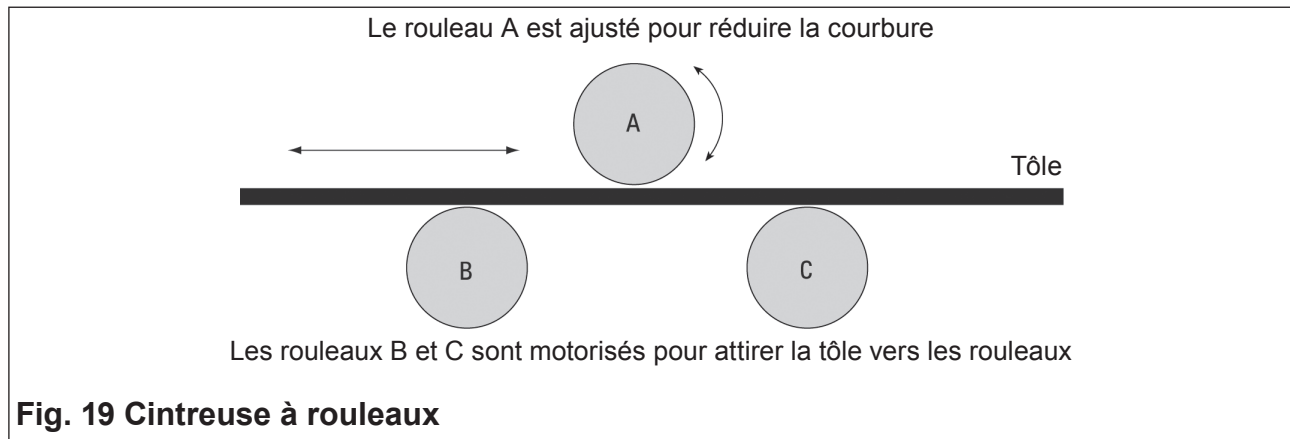
## 2.3.4 Limites d'emploi des chaudières à tubes de fumées

### 2.3.4.1 Pression limite

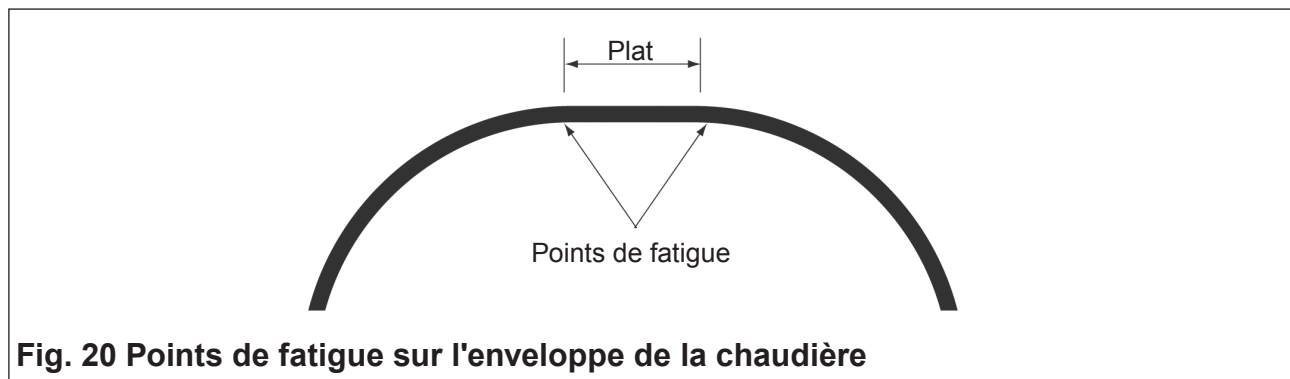
Les contraintes sont imposées par les standards de fabrication. La contrainte maximale se produit sur la circonférence du cylindre. Elle peut se calculer par la formule suivante :

Contrainte circonférentielle : 
$$\frac{\text{pression de service} \times \text{diamètre interne}}{2 \times \text{épaisseur de la tôle}}$$

On peut en déduire que la contrainte augmente lorsque le diamètre croît. Ceci est compensé par des épaisseurs de tôle plus importantes, ce qui entraîne un cintrage plus difficile. L'un des problèmes des fabricants de chaudière est le cintrage de la tôle (voir Figure 19 et Figure 20). Ils ne peuvent pas cintrer les extrémités, ce qui laisse un plat.



Quand les extrémités sont soudées entre elles et que la chaudière est sous pression, l'enveloppe doit avoir une section cylindrique. Quand la chaudière est arrêtée, les tôles reviennent dans leurs positions initiales. Ce phénomène répété plusieurs fois peut produire une fatigue au niveau de la soudure. Les inspecteurs Apave contrôlent régulièrement le bombé au niveau de la soudure.



Ce problème est amplifié lorsque la chaudière s'arrête tous les soirs et redémarre tous les matins. Il est également bon de signaler que le transfert de chaleur à travers le tube foyer se fait par conduction et que l'épaisseur influe sur les performances. Ceci est particulièrement important lorsque la température de la flamme dépasse 1800°C et que le transfert doit se faire très rapidement pour éviter une surchauffe du tube foyer. L'épaisseur limite du tube foyer est entre 18 et 20 mm ce qui entraîne une pression d'utilisation maximale de 27 bar.

### 2.3.4.2 Dimensions limites

Les chaudières modernes à tubes de fumées sont fournies toutes équipées ; elles doivent être transportées par camion ce qui implique une dimension à ne pas dépasser qui correspond à une chaudière de 27 T/h.

### 2.3.4.3 Nomenclature chaudière à tubes de fumées

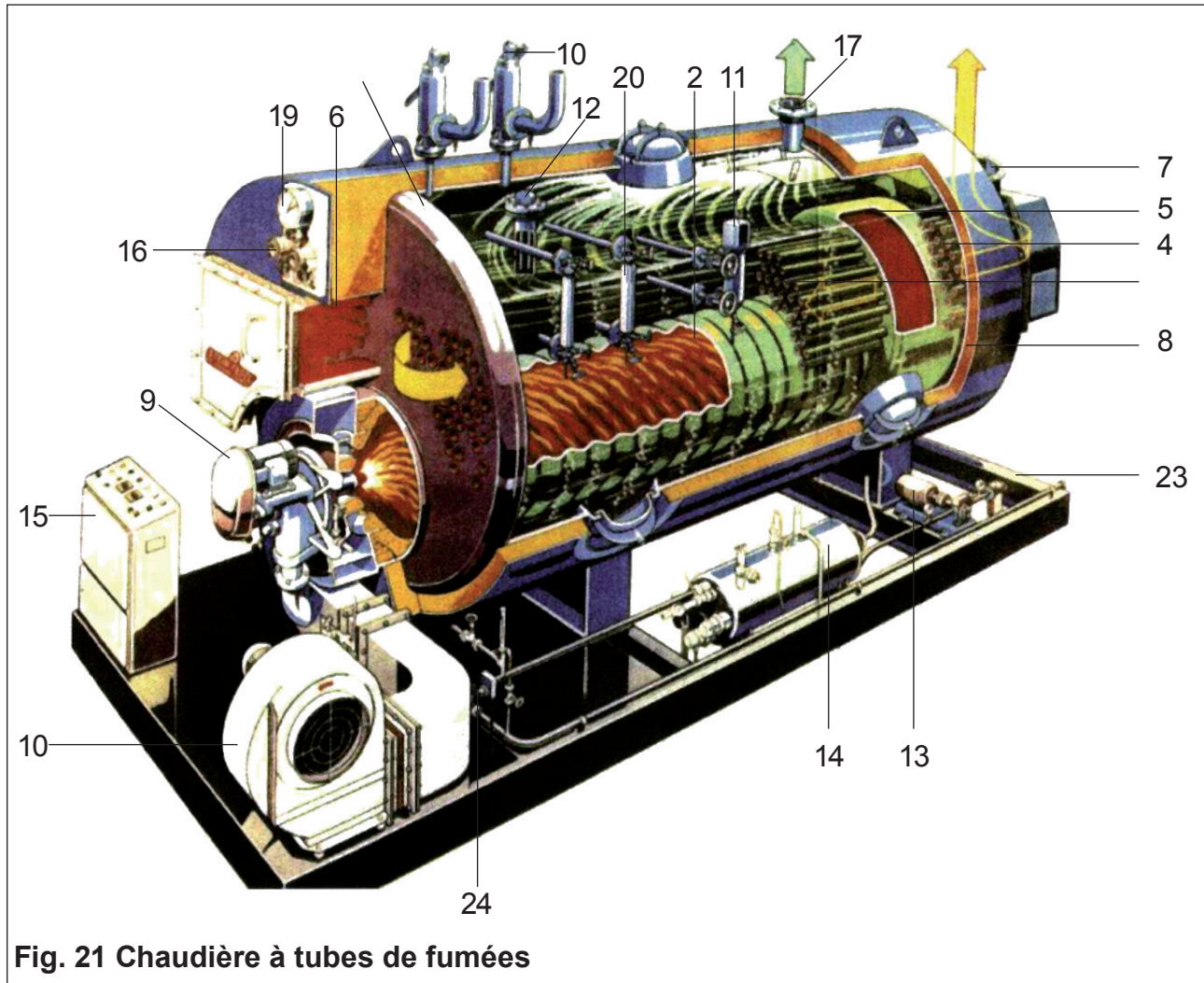


Fig. 21 Chaudière à tubes de fumées

1	Corps de chaudière	13	Pompe fuel
2	Tube-foyer	14	Réchauffeur fuel
3	Tubes de fumées 2 <sup>ème</sup> parcours	15	Pupitre de commande
4	Tubes de fumées 3 <sup>ème</sup> parcours	16	Manostats
5	Boîte de retour arrière refroidie à eau	17	Vanne de vapeur
6	Chambre de fumées avant	18	Soupape de sûreté
7	Départ fumées	19	Manomètre
8	Calorifugeage	20	Niveaux d'eau
9	Brûleur	21	Vanne d'alimentation
10	Ventilateur principal d'air	22	Pompe alimentaire
11	Interrupteur de pompe	23	Châssis de chaudière
12	Limiteur de niveau haut	24	Contrôle de viscosité

## 2.4 Chaudière à tubes d'eau

Les chaudières à tubes d'eau diffèrent des chaudières à tubes de fumées car l'eau circule à l'intérieur des tubes et la source de chaleur est à l'extérieur.

Ceci implique des limites de pression beaucoup plus élevées car la contrainte circonférentielle est plus faible.

Ces chaudières sont utilisées lorsque l'on souhaite des productions vapeur, des pressions importantes ou de la vapeur surchauffée. Ces chaudières sont beaucoup plus onéreuses que les chaudières à tubes de fumées plus compactes.

A travers le monde, nous pouvons retrouver des chaudières à tubes d'eau jusqu'à des pressions de 270 bar.

La gamme des chaudières à tubes d'eau s'étend de 2 000 kg/h à 3 500 T/h.

Les plus petites peuvent être livrées montées en une partie. Les plus grosses sont assemblées sur site.

Les chaudières à tubes d'eau fonctionnent sur le principe de la circulation d'eau.



Fig. 22 Chaudière à tubes d'eau

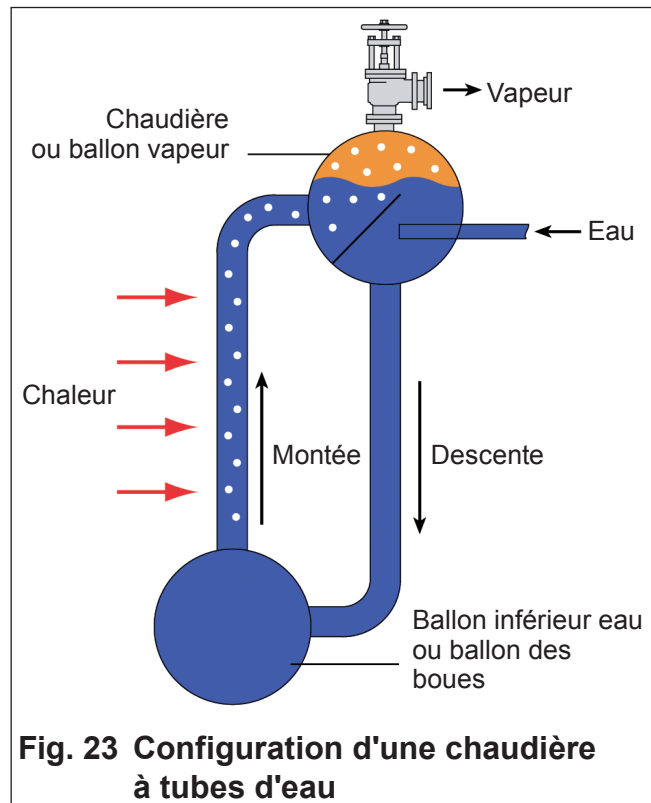


Fig. 23 Configuration d'une chaudière à tubes d'eau

Le diagramme de la Figure 23 explique le fonctionnement.

L'eau froide est introduite dans le ballon vapeur puis retombe dans le ballon inférieur ou ballon des boues car la densité est plus importante que celle de l'eau chaude.

La densité diminue lorsque l'eau est véhiculée dans le tube soumis à la chaleur. L'eau chaude et les bulles de vapeur atteignent à nouveau le ballon supérieur où la vapeur se sépare naturellement de l'eau et peut être distribuée.

Cependant lorsque la pression augmente, la différence entre la densité de l'eau et de la vapeur saturée diminue, ce qui entraîne une diminution de la circulation. Pour conserver le niveau d'eau constant à la pression de calcul, la distance entre les 2 ballons doit être augmentée.

### 2.4.1 Variantes

Les configurations suivantes fonctionnent sur le même principe et permettent des productions vapeur entre 5 000 kg/h et 180 000 kg/h.

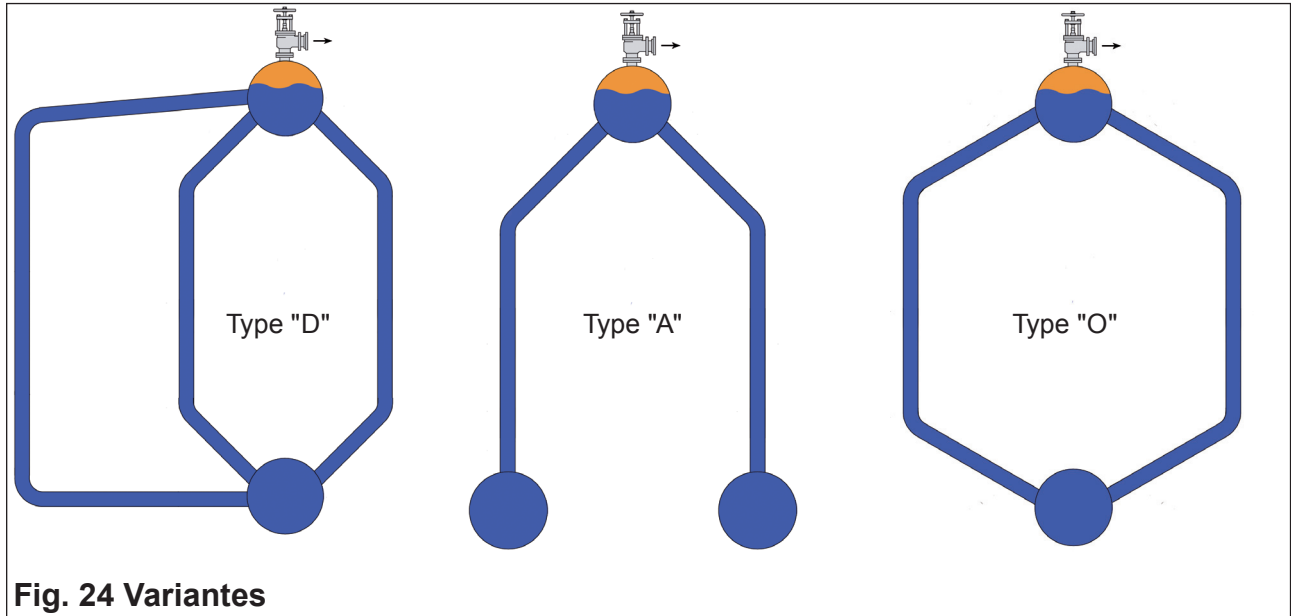


Fig. 24 Variantes

### 2.5 Chaudière à ballon longitudinal

Cette chaudière qui est à l'origine des chaudières à tubes d'eau fonctionne sur le principe de la température et la densité de l'eau (voir Figure 25).

L'eau froide est introduite dans un ballon placé longitudinalement par rapport à la source de chaleur. L'eau froide tombe à l'arrière dans un collecteur raccordé à une panoplie de tubes inclinés. Lorsque la température augmente, la densité diminue créant une circulation d'eau vers un collecteur situé en façade qui remonte vers le ballon.

Dans le ballon la vapeur se sépare de l'eau pour être distribuée.

Ces chaudières peuvent produire de la vapeur entre 2 250 kg/h et 36 000 kg/h.

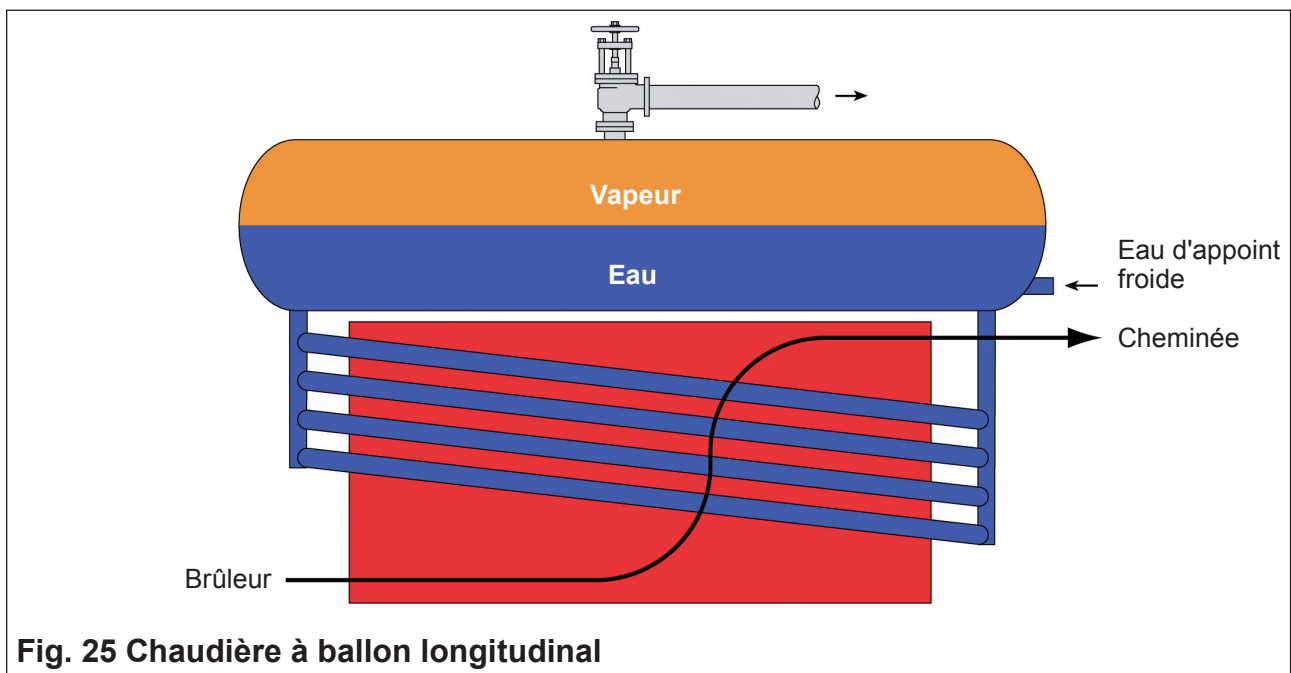


Fig. 25 Chaudière à ballon longitudinal

## 2.6 Chaudière à ballon transversal

Cette chaudière est une variante à la Figure 25 car le ballon est situé transversalement par rapport à la source de chaleur (voir Figure 26, ci-dessous).

Elle fonctionne sur le même principe que la chaudière à ballon longitudinal mais permet une température plus uniforme dans le ballon. Cependant, en cas de très forte demande vapeur, une mauvaise circulation d'eau peut entraîner une corrosion sur le tube supérieur qui peut être non immergé.

Cette chaudière permet d'installer une plus grande panoplie de tubes inclinés de par la position transversale.

Ces chaudières peuvent produire de la vapeur entre 700 kg/h et 240 000 kg/h.

## 2.7 Chaudière à tubes cintrés

Ces chaudières fonctionnent sur le même principe température densité mais utilisent 4 ballons dans la configuration ci-après (Figure 27).

L'eau froide est introduite dans le ballon supérieur gauche et tombe par sa densité élevée dans le ballon inférieur et les tubes de liaison des autres ballons chauffés par la source de chaleur permettent à l'eau de s'écouler vers le haut. Des bulles de vapeur se forment pour être évacuer en vapeur sèche vers la tubulure de départ.

Ce type de chaudière présente une très grande surface de chauffe pour le transfert d'énergie et favorise la circulation naturelle de l'eau.

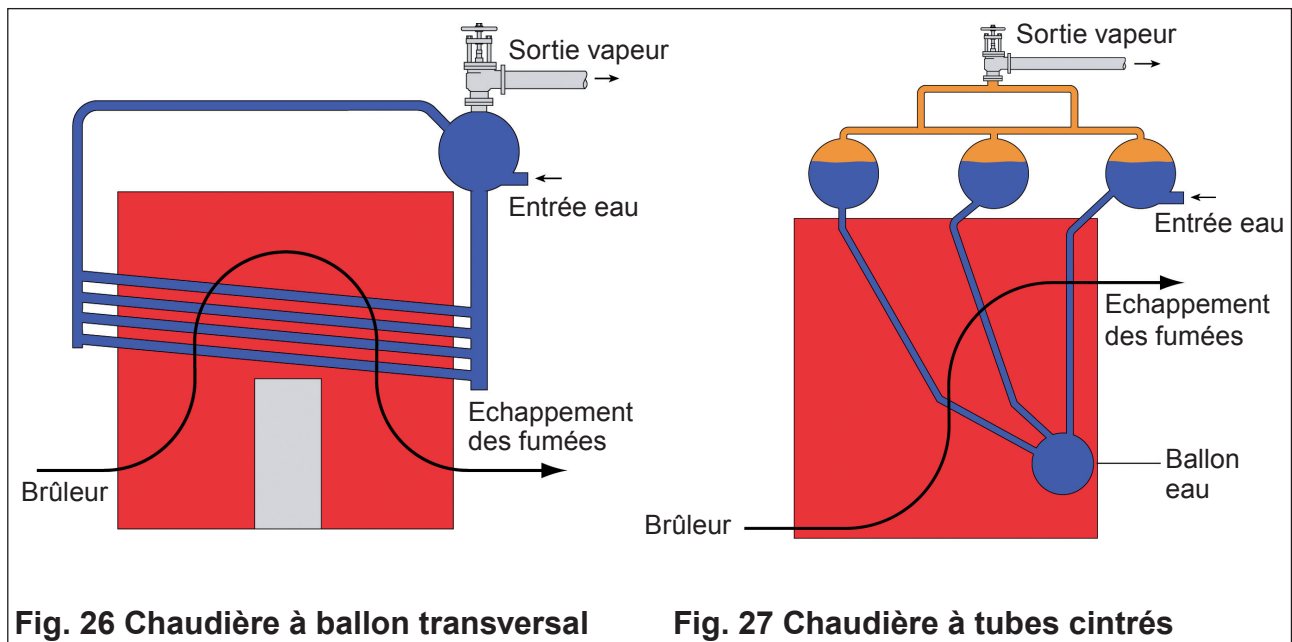


Fig. 26 Chaudière à ballon transversal

Fig. 27 Chaudière à tubes cintrés

## 2.8 Chaudière à production instantanée

Ces chaudières qui rentrent souvent dans la 3<sup>ème</sup> catégorie ont une capacité très faible qui permet une vaporisation très rapide. Elle est composée d'un serpentin de chauffe monotubulaire cintré autour d'une chambre de combustion. L'eau est introduite par une pompe à une vitesse importante et véhiculée à contre-courant dans l'épingle pour être évacuée dans un séparateur où la vapeur peut être distribuée en partie supérieure.

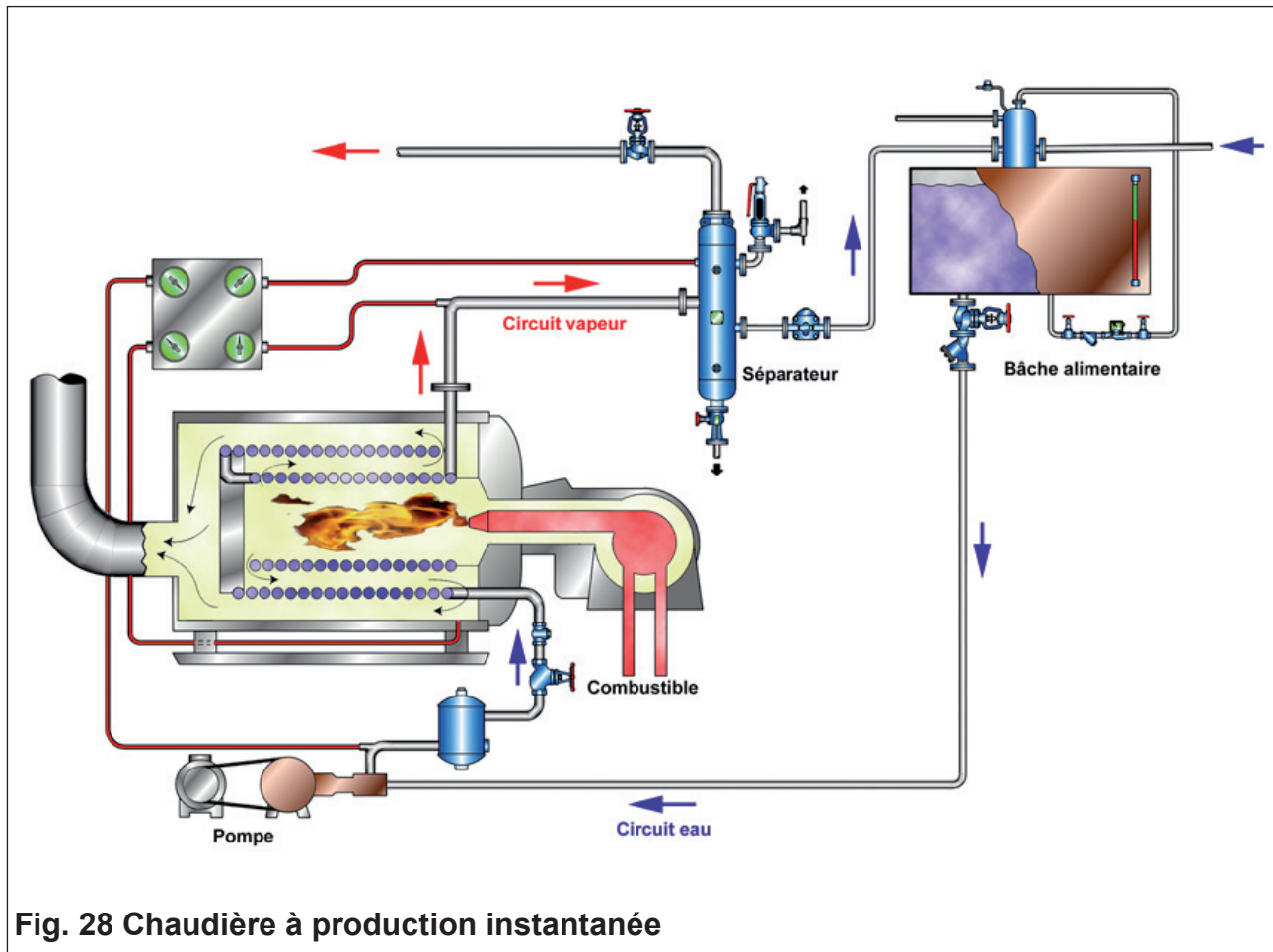


Fig. 28 Chaudière à production instantanée

## 2.9 Economiseurs

Un économiseur (Figure 30) est un échangeur de chaleur intégré au générateur de vapeur ou placé en aval de la chaudière. Dans le cas des chaudières à vapeur, l'économiseur est employé pour préchauffer l'eau alimentaire.

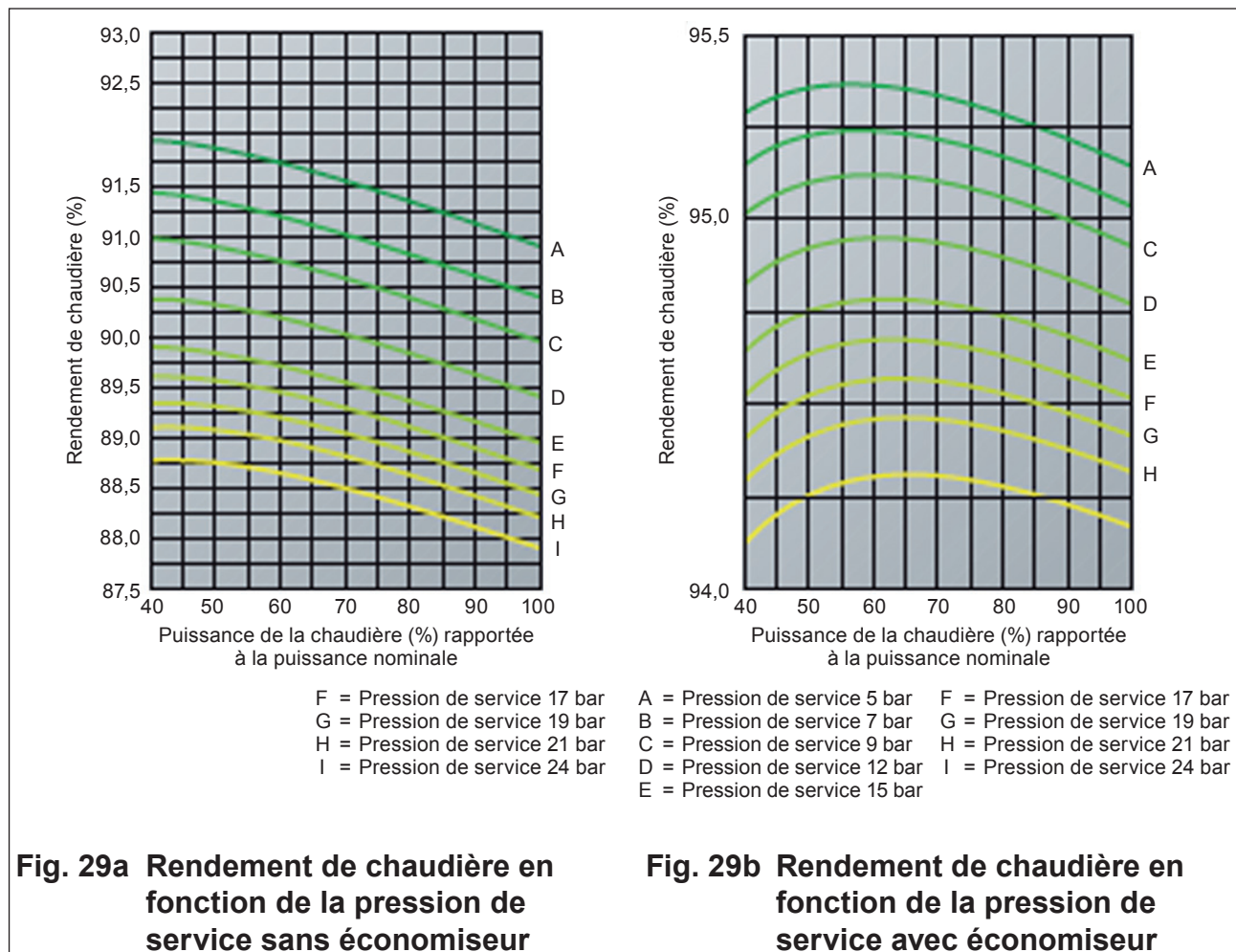
Les températures de fumées à la sortie de la chaudière dépassent de 50°C environ la température de la vapeur saturée. Il est impossible de réduire davantage cette valeur du fait des lois physiques des transmissions thermiques. Cette température de fumées relativement élevée induit un rendement de combustion de 89 à 91%.

Les déperditions par les fumées peuvent ainsi atteindre 11%. Pour réduire ces déperditions, des préchauffeurs d'eau d'alimentation (économiseurs) sont dans de nombreux cas mis en oeuvre avec les générateurs de vapeur.

Les économiseurs sont par principe montés en aval du troisième parcours dans le cas des chaudières à grand volume d'eau. Les fumées y sont refroidies par de l'eau alimentaire circulant à contre-courant. Le dimensionnement est effectué en fonction des paramètres débit et température de fumées, débit et température d'eau d'alimentation et température de fumées désirée en aval de l'économiseur. Selon la taille des surfaces d'échange, la température des fumées est abaissée jusqu'à 130°C environ.

Il est également possible d'atteindre un rendement de combustion de 95%.

L'expérience avec des économiseurs permettent d'affirmer qu'un abaissement de la température des fumées de 20°C améliore le rendement de 1% environ.



L'économiseur intégré se compose de tubes d'acier pourvus d'une ailette spiralée soudée. La liaison totale de l'ailette au tube garantit des transmissions calorifiques optimales entre les fumées et l'eau d'alimentation et permet de réduire les dimensions de l'économiseur.

Dans la pratique, deux emplacements de l'économiseur se sont imposés.

1) L'emplacement préférentiel est l'intégration. L'économiseur est implanté dans le collecteur de fumées de la chaudière à l'usine. L'économiseur est donc relié à la chaudière par la conduite d'alimentation non sectionnable. La chaudière et l'économiseur constituent donc un ensemble réceptionné et homologué comme tel. Il n'y a pas besoin d'organes d'isolement et de sécurité supplémentaires. L'économiseur est pourvu d'un capot de fumées qui selon les exigences du client est équipé de la buse de fumées et de la trappe de ramonage pour le faisceau de tubes.

2) Le second emplacement est un économiseur monté en aval et qui peut être placé en fonction des caractéristiques de la chaufferie. Cet économiseur peut être déconnecté côté eau et être équipé d'un by-pass intégré côté fumées.

Il est employé dans les cas suivants :

- éviter une température inférieure au point de rosée.
- emploi de plusieurs combustibles de composition différente (gaz naturel et fioul lourd contenant du soufre).

La température des fumées en aval de l'économiseur peut être réglée dans cette version par positionnement du by-pass. L'économiseur en aval nécessite en plus des vannes d'arrêt pour l'entrée et la sortie de l'eau d'alimentation, une soupape de sécurité et un manomètre, et est à considérer comme un composant indépendant selon la directive des appareils à pression.

Pour utiliser de manière optimale la chaleur contenue dans les fumées, il est également nécessaire dans le cas de générateurs de chaleur à économiseur d'employer des brûleurs modulants et une régulation d'eau d'alimentation à action progressive.

Cette solution assure que la chaleur des fumées produite pendant le fonctionnement du brûleur soit utilisée en permanence pour préchauffer l'eau d'alimentation.

En égard à l'amélioration du rendement de la chaudière rendu possible avec l'économiseur et aux économies de coûts de combustible induites, les installations nouvelles devraient toujours être équipées d'un économiseur.



**Fig. 30 Economiseur**

## 2.10 Brûleurs

On répertorie quatre modes de fonctionnement des brûleurs gaz pulsés :

- en tout ou rien,
- en 2 allures,
- en tout ou peu progressivement,
- en modulation.

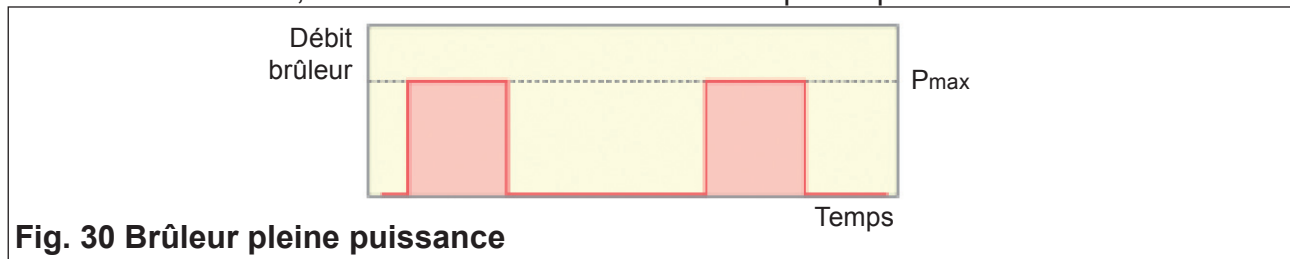
### 2.10.1 Brûleur tout ou rien

On parle de brûleur tout ou rien lorsque toute demande de chaleur, le brûleur s'enclenche, fournit sa pleine puissance, et s'arrête lorsque les besoins sont satisfaits.

Les brûleurs tout ou rien se différencient par leur mode de démarrage :

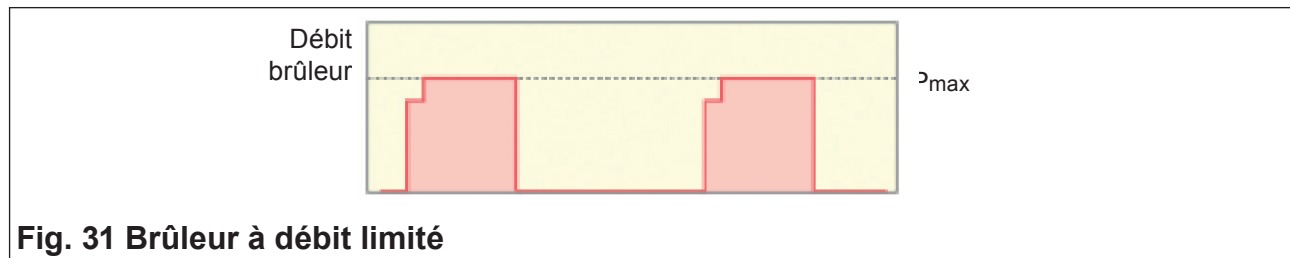
#### 2.10.1.1 Démarrage à pleine puissance

Ce type de brûleur est utilisé pour les puissances inférieures à 100 .. 120 kW. Lors de la demande de chaleur, le brûleur démarre directement à pleine puissance.



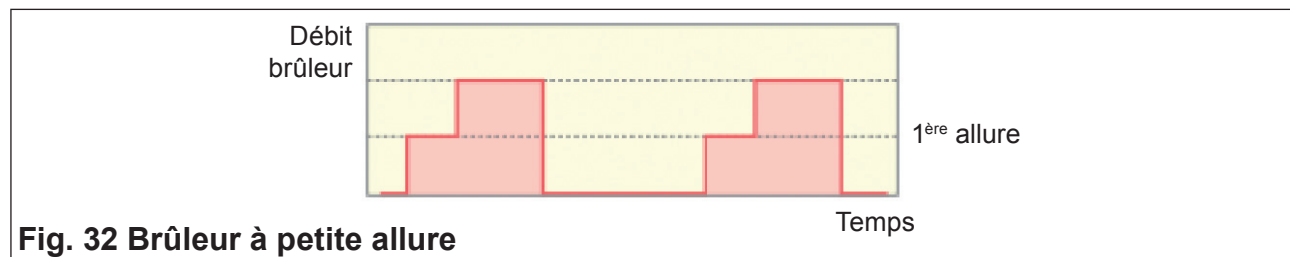
#### 2.10.1.2 Démarrage à débit limité

Lors d'une demande de chaleur et grâce à un jeu d'électrovannes (2 vannes magnétiques ou bien d'une seule vanne à 2 étages), le brûleur démarre avec une puissance de l'ordre de 75% et passe à sa pleine puissance après le temps de post-allumage. Cela permet d'atténuer l'onde de choc provoquée par l'allumage du combustible. Comme dans ce type de brûleur, le réglage du registre d'air est manuel, la phase initiale du démarrage se produit avec un excès d'air trop important et donc une combustion médiocre.



#### 2.10.1.3 Démarrage à petite allure

Ce mode de démarrage repose sur le même principe que dans le cas précédent. Il s'en différencie cependant par la réduction plus importante de la puissance au démarrage. Il s'agit en fait de brûleurs 2 allures mais dont la commande ne permet pas le choix de l'allure en fonction des besoins. Le temps séparant l'allumage du passage à la deuxième allure est fixé (relais programmable).



### 2.10.2 Brûleur 2 allures

En cas de demande de chaleur, le brûleur est enclenché en première allure (qui représente entre 40 et 60% de la puissance nominale). Après un délai déterminé (relais programmable), le brûleur passe à pleine puissance sauf si le régulateur signale que cette pleine puissance n'est pas nécessaire. Dans ce dernier cas, la première allure est maintenue.

Lorsque le brûleur fonctionne en deuxième allure, il est possible que le régulateur estime que la pleine puissance n'est plus requise et le brûleur repasse en première allure. Si la puissance requise est inférieure à la puissance en allure réduite, le brûleur s'arrête. Dans le cas inverse, il repasse en deuxième allure.

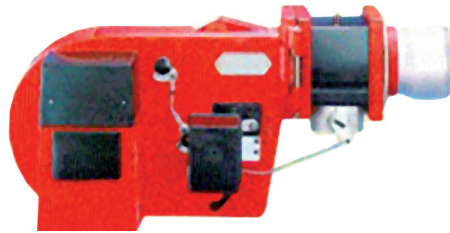


Fig. 33 Brûleur gaz 2 allures

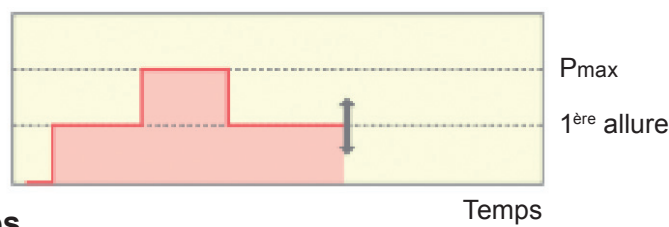


Fig. 34 Brûleur 2 allures

Le brûleur 2 allures présentent des avantages énergétiques indéniables :

- L'adaptation de la puissance aux besoins allonge le temps de fonctionnement du brûleur et diminue le nombre de cycles d'allumage sources d'imbrûlés et d'émissions polluantes.
- Le temps d'arrêt de la chaudière et donc les pertes du même nom sont moindres.
- La diminution de la puissance du brûleur par rapport à la puissance de la chaudière augmente le rendement de combustion. En effet, la taille de l'échangeur augmente par rapport à la puissance de la flamme et donc les fumées sortent plus froides de la chaudière. Un gain de rendement de combustion de 2 .. 2,5% est ainsi possible entre la petite allure (60% de la puissance nominale) et la grande allure.

### 2.10.3 Brûleur "tout ou peu progressif"

Le principe de fonctionnement de ce type de brûleur est semblable à celui d'un brûleur 2 allures. Ce brûleur ne permet que 2 allures. Le passage de la première à la deuxième allure n'est cependant plus brutal, mais progressif (en un temps minimum de 30 secondes).

Si la demande de chaleur est inférieure à la puissance en première allure, le brûleur se met à l'arrêt. Si elle y correspond, le brûleur maintient son fonctionnement en première allure. Si elle en est supérieure, le brûleur passe progressivement en deuxième allure.

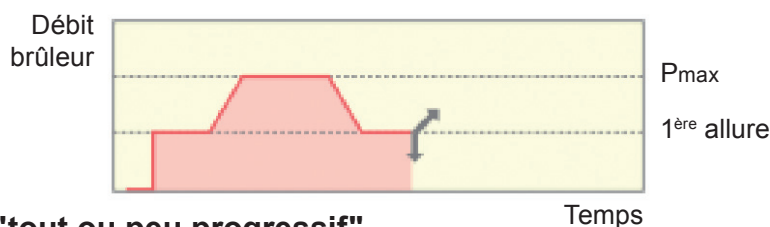
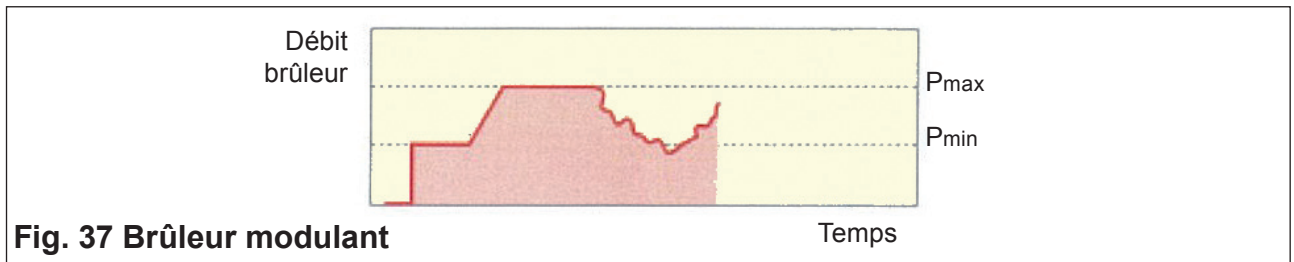
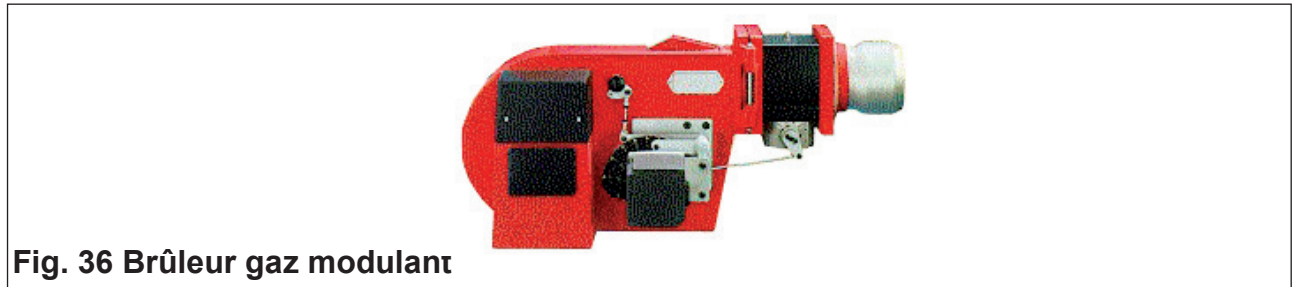


Fig. 35 Brûleur "tout ou peu progressif"

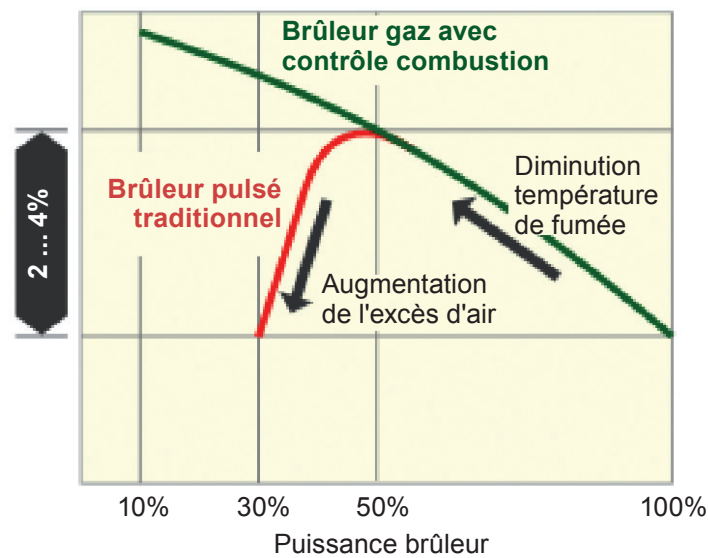
#### 2.10.4 Brûleur modulant

Avec un brûleur modulant, toutes les allures de fonctionnement sont possibles, au-delà d'un minimum souvent de l'ordre de 30%. Les débits d'air et de fioul sont réglés en continu en fonction de la puissance de chauffage requise, ce qui permet un fonctionnement quasi continu.



Les avantages du brûleur modulant sont du même ordre que ceux du brûleur 2 allures. L'adaptation de la puissance est cependant encore plus fine, ce qui limite encore les temps d'arrêt d'un brûleur. La modulation a cependant ses limites. En effet, à basse puissance, le réglage de l'excès d'air devient difficile. De plus, si la puissance du brûleur diminue trop fortement, des condensations risquent d'apparaître dans la chaudière. C'est pourquoi, les brûleurs modulants traditionnels (utilisés sur les chaudières qui ne sont pas à condensation) ne peuvent descendre en dessous d'une puissance de l'ordre de 30% et à ce moment, la chaudière doit le plus souvent fonctionner à haute température.

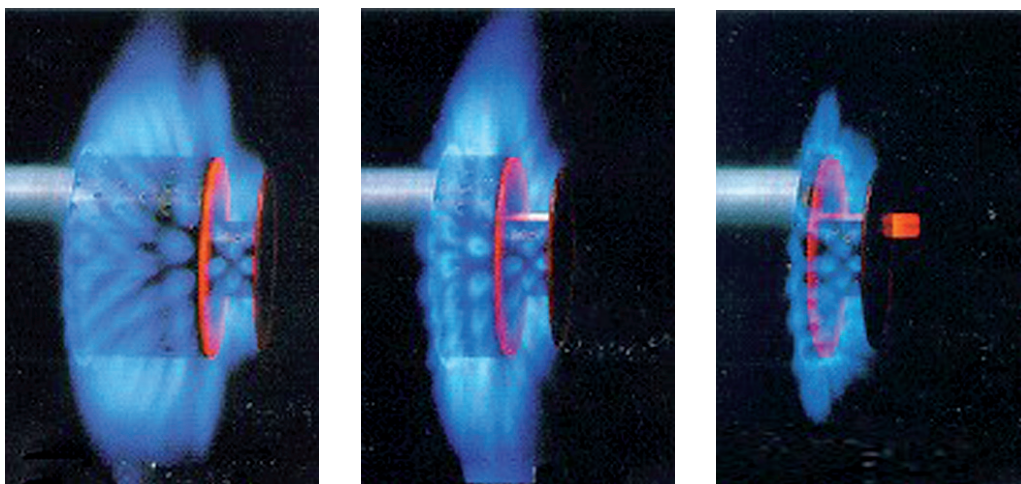
Actuellement, les fabricants de chaudières à condensation ont mis au point des brûleurs gaz modulants pouvant moduler leur puissance jusqu'à 10% de la puissance nominale. Un meilleur contrôle des paramètres de la combustion leur permet en outre de maintenir une qualité optimale du mélange gaz-air sur toute la plage de modulation.



**Fig. 38 Exemple d'évolution du rendement de combustion des brûleurs actuels en fonction de la modulation de sa puissance**

**Pour les brûleurs pulsés modulateurs traditionnels** (fioul ou gaz) (de 30 à 100%) : dans un premier temps, lorsque la puissance du brûleur diminue (à partir de 100% de puissance), la température des fumées diminue et le rendement augmente. A partir d'un certain moment, la diminution de la quantité de particules de combustible et leur dispersion imposent d'augmenter l'excès d'air pour éviter les imbrûlés. Le rendement diminue de nouveau.

**Pour les nouveaux brûleurs gaz modulant avec contrôle de la combustion** : le contrôle de la combustion permet de maintenir un excès d'air correct, sans production d'imbrûlé, sur toute la plage de modulation. On obtient donc une plage de modulation plus grande (10 à 100%) avec une qualité de combustion constante et des fumées qui se refroidissent de plus en plus (pour arriver à la condensation).



**Fig. 39 Exemple de nouveau brûleur pulsé modulant (10 à 100%) : la modulation se fait grâce à un cylindre coulissant découvrant progressivement la tête de combustion.**

### 2.10.5 Brûleurs low NOx

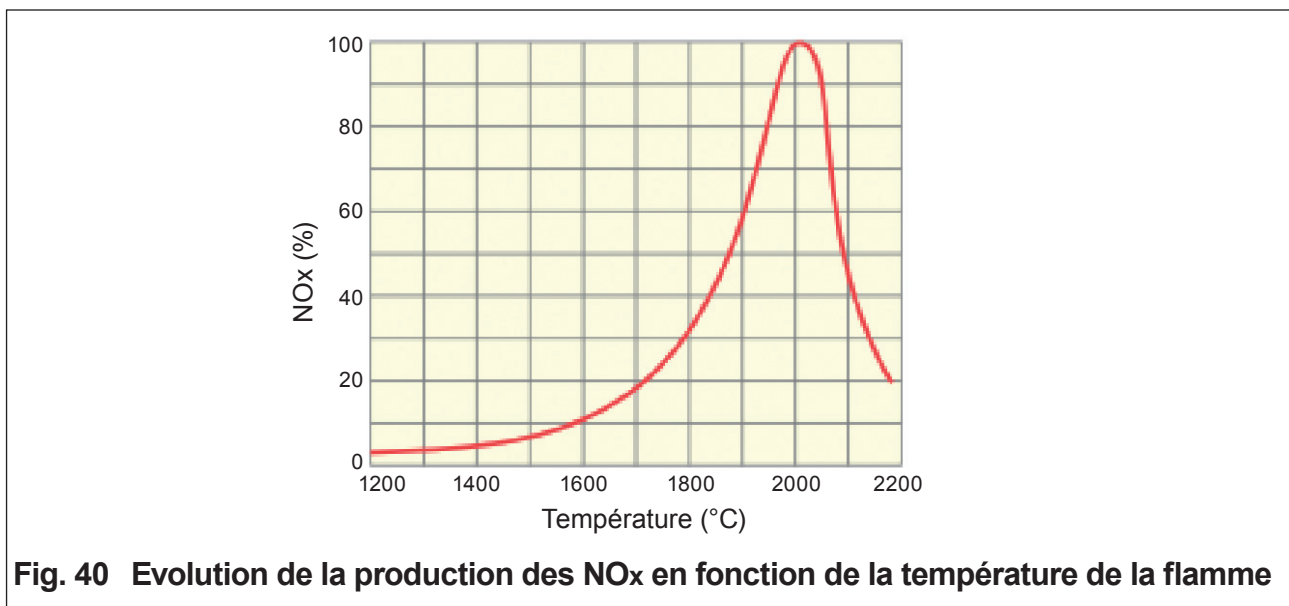
Les derniers développements en matière de brûleur ont principalement visé à diminuer les émissions polluantes comme les imbrûlés, CO, NO<sub>x</sub>. Les technologies appliquées sont semblables pour les brûleurs gaz ou les brûleurs fioul.

Idéalement, lors d'une réaction de combustion, l'azote N<sub>2</sub> contenu dans l'air comburant, est rejeté tel quel sans être modifié. Cependant, sous certaines conditions, il se combine avec l'oxygène pour former des NO<sub>x</sub>. Non seulement ceux-ci peuvent être directement toxiques pour la santé, mais contribuent à la formation d'ozone, de brouillard et de pluies acides. Ils font également partie des gaz à effet de serre. Leur émission doit donc être réduite au minimum.

Les paramètres favorisant la production de NO<sub>x</sub> sont :

- La température élevée de la flamme (supérieure à 1200°C).
- L'excès d'air, c'est-à-dire la présence importante d'oxygène (O<sub>2</sub>) n'ayant pas réagi dans les fumées.
- Le temps de séjour des atomes d'azote (N) dans la zone chaude de la flamme.
- Une concentration plus élevée du combustible en N<sub>2</sub>.

Les deux premiers paramètres dépendent de la conception du brûleur, le troisième dépend de la conception de la chaudière.



**Fig. 40 Evolution de la production des NO<sub>x</sub> en fonction de la température de la flamme**

#### 2.10.5.1 Brûleurs low NOx par recyclage des gaz

Pour les brûleurs pulsés (fioul ou gaz), la technique la plus courante pour diminuer les émissions d'oxyde d'azote est le recyclage des gaz de combustion dans la tête du brûleur.

En fait, cela consiste à mélanger une partie des gaz de fumée à l'air comburant, dans le but de :

- Diminuer la température de la flamme car même avec plusieurs centaines de degrés, les gaz brûlés sont plus froids que la flamme.
- Réduire la concentration en oxygène du mélange.
- Favoriser la vaporisation des combustibles liquides et de modifier favorablement les conditions de combustion.

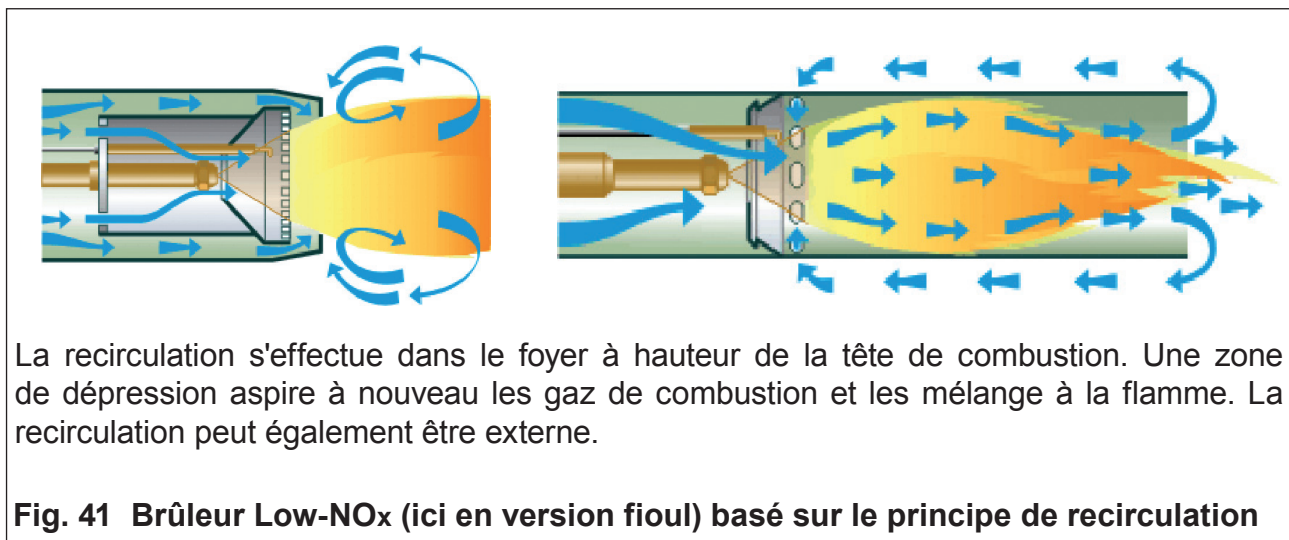
La configuration aéroulrique pour réaliser cette re-circulation des gaz varie selon les constructeurs. D'une manière générale, c'est l'impulsion de l'air de combustion en mouvement qui sert de force motrice au recyclage : un passage plus étroit au niveau de la tête de combustion provoque une accélération du flux de gaz. Cela génère une dépression et amorce la re-circulation des gaz de combustion.

On peut également encore descendre la température de la flamme en élargissant le front de flamme. Dans ce cas, on recherche ainsi à avoir une flamme en forme d'entonnoir, ce qui augmente sa surface de refroidissement et donc diminue sa température.

Par rapport au brûleur "classique", le brûleur Low-NO<sub>x</sub> à recirculation interne des gaz de combustion présente les inconvénients suivants :

- La re-circulation demande de l'énergie. La comparaison entre un brûleur à pulvérisation traditionnel et un brûleur Low-NO<sub>x</sub> (le ventilateur et la chambre de combustion étant identiques) montre que la dépression au niveau de la tête du brûleur Low-NO<sub>x</sub> réduit la puissance calorifique maximale et modifie les caractéristiques intrinsèques du brûleur.
- La vitesse d'écoulement élevée suscite des turbulences à hauteur du venturi. Il peut en résulter un accroissement du niveau sonore.
- La recirculation des gaz de combustion dans la tête du brûleur entraîne un encrassement plus rapide des électrodes d'allumage. Un entretien préventif est dès lors nécessaire.

En revanche, un brûleur Low-NO<sub>x</sub> produit de 20 à 50% d'émissions NO<sub>x</sub> en moins qu'un brûleur traditionnel.



### **2.10.6 Réglage de la forme de la flamme**

La forme de la flamme dans le foyer d'une chaudière dépend principalement du type de combustible, du processus de mélange air hydrocarbure, de la capacité de la chaudière et de la forme du foyer.

Pour les brûleurs à combustible liquide, on peut lire sur le gicleur deux données (gravées) :

- Débit du liquide à brûler exprimé en litres/heure ou en Galons/heure.
- Angle de pulvérisation du combustible liquide.

Ces deux paramètres donnent une idée sur la forme de la flamme dans le foyer de la chaudière. Lors du fonctionnement d'une chaudière, il faut faire attention à ce que la flamme ne touche pas les parois de la chaudière, ou les tubes, la flamme ne doit pas être trop longue jusqu'à ce qu'elle touche le fond du foyer. La longueur de la flamme est réglée par action sur le débit du carburant. Pour les brûleurs à combustion liquide, une vis de réglage sur la pompe permet le contrôle du débit. Pour les brûleurs à gaz, c'est la pression qui contrôle le débit.

La largeur de la flamme est réglée par le choix d'angle du gicleur à combustion liquide.

### **2.10.7 Stabilité de la flamme dans le foyer d'une chaudière**

Une flamme est dite stable lorsque visuellement elle a une forme et un bruit stables.

Si la flamme est instable, on peut observer des perturbations de forme et un bruit anormal en plus de la fumée noire ou blanche que se dégage de la cheminée de la chaudière.

Les composantes suivantes sont importantes pour la stabilité de l'allure des chaudières :

#### **2.10.7.1 Pulvérisation du combustible pour les brûleurs à combustion liquide**

La pompe du carburant doit assurer une pression suffisante pour qu'à la sortie du gicleur on obtienne une bonne pulvérisation entre les fines gouttes du liquide (brouillard du carburant). Le gicleur ne doit pas être encrassé ni au niveau du trou de sortie du carburant ni au niveau des passages du liquide sur le cône intérieur du gicleur. Le carburant liquide doit être pulvérisé sous forme d'un cône bien uniforme et sous forme de brouillard (très fines particules).

#### **2.10.7.2 Mélange de combustible air**

Un bon mélange entre carburant et air est assuré par les mouvements des gaz dans le foyer d'une chaudière. En général, le carburant est injecté par le brûleur en rotation, l'air est aussi soufflé en rotation. Visuellement, on doit observer une flamme tournante dans le foyer de la chaudière.

#### **2.10.7.3 Contrepression dans la chaudière**

En marche normale d'une chaudière, on observe qu'au pied de la cheminée on a une dépression qui est due à la différence de densité de fumée chaude (200°C) environ de celle de la densité de l'air ambiant. C'est cette différence de densité qui laisse la fumée monter vers le haut dans l'air puis retomber quand elle refroidit.

Si la cheminée ou les tubes de fumées sont encrassés par le noir de carbone on n'a plus de dépression, la fumée ou gaz de combustion ne sort plus en sa totalité de la cheminée, mais peut retourner sur le brûleur de la chaudière. La contrepression dans une chaudière est une cause majeure de perturbation d'allure de la flamme.

Avec un manomètre différentiel à 20 mbar, on peut mesurer la dépression dans la cheminée. On relie le manomètre à un tube métallique à travers un tube souple, on place le tube métallique dans la cheminée à travers le trou d'analyse de gaz et on lit la valeur de la pression négative (dépression).

Cette dépression doit être de quelques millibars (3 ou 4 mbar par exemple).

#### 2.10.7.4 Un grand excès d'air

Un grand excès d'air dans la combustion d'une chaudière accélère énormément la vitesse d'écoulement dans la chaudière, refroidit la flamme et entraîne une perturbation de flamme. Un grand excès d'air est indiqué par une fumée blanche à la cheminée ou par analyse de combustion par analyseur de gaz.

#### Fumée blanche de combustion de chaudière - Fumée de chaudière blanche

Le problème de fumée blanche paraît surtout avec les combustibles liquides ou solides. La couleur blanche de fumée provient du carburant évaporé et non brûlé.

Un carburant s'évapore et ne brûle pas dans le foyer d'une chaudière pour les raisons suivantes :

- **Un grand excès d'air** : Un grand excès d'air réduit la température de la flamme, la cinétique de combustion devient lente et le carburant évaporé ne brûle pas, il passe à la cheminée, on observe donc une fumée blanche.  
Le contrôle de l'excès d'air peut être fait par un analyseur de gaz de combustion (à conserver environ un excès d'air de 40% pour les combustibles solides et les fiouls, 20% pour les combustibles liquides et environ 10% pour les gaz).
- **La vitesse d'écoulement longitudinale du mélange pulvérisé est trop importante** : La propagation de la flamme se fait dans le sens contraire de l'écoulement du gaz dans le foyer de la chaudière, c'est-à-dire du bout de la flamme vers le gicleur.  
A une certaine distance de quelques millimètres avant le gicleur, la flamme s'arrête sans toucher au gicleur ou au déflecteur.  
Ce point est défini par la vitesse d'éjection de carburant, la vitesse d'injection d'air, l'angle de pulvérisation du carburant.  
Si on observe que le début de la flamme s'est éloigné de sa position initiale, on revoit l'excès d'air et l'état du gicleur.
- **L'air et le carburant se mélangent mal** : Dans ce cas, des poches de carburant restent imbrûlés et s'évaporent en formant une fumée blanche. Il faut contrôler le gicleur et le déflecteur d'air.
- **Fuite d'eau dans le foyer de chaudière** : Les éventuelles fuites d'eau dans les tubes de chaudière réduisent la température de la flamme et la combustion devient incomplète, le carburant part de la cheminée à l'état de vapeur.

#### 2.10.7.5 Les analyseurs de fumée et le réglage des chaudières

Analyse des gaz de combustion d'une chaudière, analyseur de fumée réglage du brûleur, réglage du brûleur de la chaudière. Les analyseurs de gaz de combustion sont des outils utilisés pour le diagnostic et le contrôle des chaudières.

Il y a deux gammes de paramètres qu'on peut contrôler avec les analyseurs de gaz de combustion :

- Paramètres d'optimisation énergétique de la combustion.
- Paramètres de contrôle des émissions atmosphériques (environnement).

## 1) Optimisation énergétique de la combustion

Les analyseurs de gaz sont des appareils électroniques composés de :

- **Une sonde de prélèvement de fumée** : C'est un tube métallique intégrant un thermocouple. Ce tube sera pénétré dans le trou d'aspiration de gaz de la cheminée pour un prélèvement d'échantillons de gaz. Cette partie de l'analyseur doit supporter la température de fumée, en général pour les chaudières elle est inférieure à 500°C.
- **Un indicateur-afficheur** : L'indicateur est généralement portable, en plus des fonctions affichage et commande, il contient une pompe d'aspiration de gaz, les cellules d'analyse de gaz, des éléments de traitement de fumée avant analyse tel que les filtres refroidisseurs de gaz, les séparateurs de condensat.

### Optimisation énergétique des chaudières

Les principaux paramètres contrôlés pour une optimisation énergétique sont : la température ambiante, la température de fumée, la concentration en oxygène et la concentration en CO. Les analyseurs de gaz de combustion électroniques calculent l'excès d'air, le rendement de la combustion et les pertes.

### Interprétation des résultats d'une analyse de gaz

- **Température de fumée** : ce paramètre dépend de la construction 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.
- **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.
- **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. Le gaz CO présente une forme de carburant imbrûlé et peut exploser à des concentrations supérieures à 30 000 ppm.

## 2) Contrôle des émissions atmosphériques

Plusieurs analyseurs de gaz comportent des modules de contrôle des gaz toxiques tels que les oxydes d'azote NO et NO<sub>2</sub>, les oxydes de soufre SO<sub>2</sub>, les imbrûlés CXHY.

### **2.10.8 Cycle de démarrage du brûleur d'une chaudière vapeur**

Par mesure de sécurité, certaines conditions doivent être réunies pour autoriser le démarrage du brûleur d'une chaudière :

- Un niveau minimum d'eau dans la chaudière
- Une pression maximale dans la chaudière

ou

- Une température maximale d'eau dans la chaudière

Le brûleur de chaudière peut ne pas démarrer par mesure de protection contre la surchauffe des tubes de chaudière ou l'excès de montée de pression dans le faisceau tubulaire.

Le cycle de démarrage d'une chaudière commence par une étape de balayage suivie de l'allumage, une première allure de flamme, une éventuelle deuxième allure ou même une troisième allure du brûleur.

#### **2.10.8.1 Phase balayage**

Au cours de cette étape, l'électrovanne du carburant liquide ou gaz est fermée. Il n'y a pas de passage de carburant, le volet d'air est ouvert au fond et le ventilateur du brûleur refoule le maximum d'air dans le foyer de chaudière.

Cette étape est importante au niveau de la sécurité d'utilisation de chaudière. Elle permet d'éviter le risque d'explosion par les imbrûlés dans le foyer de la chaudière.

Le temps de balayage nécessaire est calculé en fonction du volume du foyer et tubes de fumée et en fonction du débit du ventilateur de soufflage.

Il faut s'assurer du balayage total d'éventuel gaz ou résidu imbrûlé dans le foyer de chaudière avant de déclencher l'étincelle allumage du brûleur.

La phase balayage est répétée avant chaque allumage du brûleur.

#### **2.10.8.2 Phase allumage**

Après le temps de balayage, le volet d'air du ventilateur du brûleur se ferme pour permettre un minimum de passage d'air. L'électrovanne de première allure de carburant gaz ou liquide s'ouvre puis l'étincelle enclenche la flamme.

Un dispositif de sécurité vérifie l'enclenchement de la flamme et sa continuité. Ce dispositif peut être un détecteur infrarouge, une cellule UV, une sonde d'ionisation ou même un thermocouple.

En cas d'absence ou disparition de la flamme, le dispositif de sécurité coupe l'électrovanne d'alimentation de gaz au brûleur.

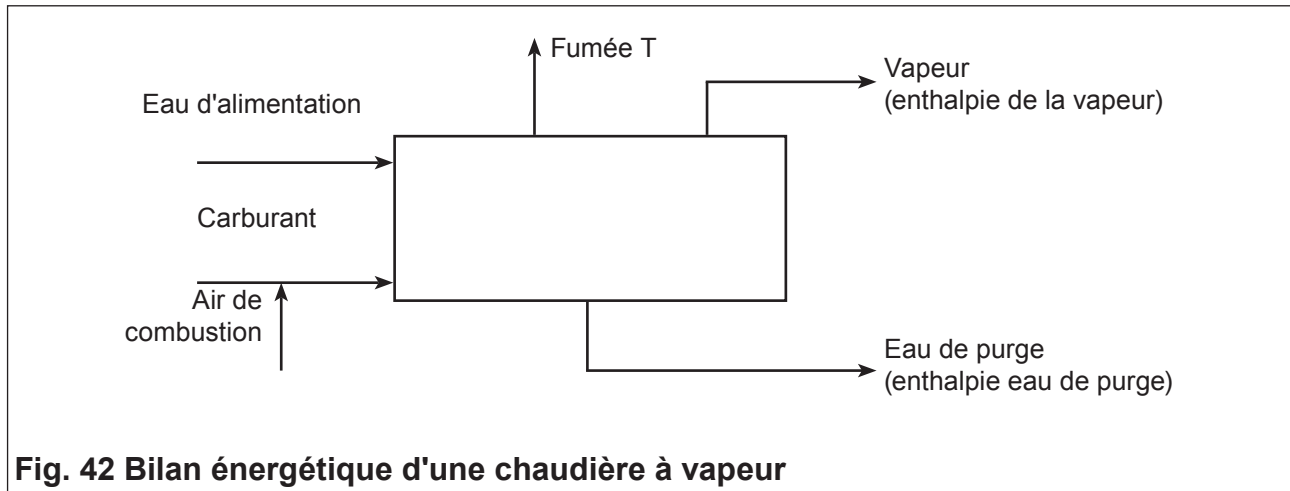
#### **2.10.8.3 Ouverture du volet d'air**

Une fois que la flamme est enclenchée, le volet d'air s'ouvre pour prendre la position optimale (pré-réglée par un analyseur de gaz).

#### **2.10.8.4 Phase marche normale**

Au cours de la marche normale, le régulateur choisit le régime de marche en première, deuxième allure..., ou en ajustement contenu selon l'écart en consigne de la température ou la pression introduit.

## 2.10.9 Rendement énergétique d'une chaudière



**Fig. 42 Bilan énergétique d'une chaudière à vapeur**

### Rendement de la combustion

Les analyses des gaz de combustion permettent de mesurer le rendement de la combustion dans une chaudière.

Le rendement de combustion est calculée selon le type de combustible, la température ambiante, la température de fumée, la concentration en oxygène dans la fumée ou l'excès d'air. Le rendement de combustion exprime la partie de la chaleur dégagée par la combustion et absorbée par l'eau de chaudière.

Les pertes de combustion sont les calories ou joules qui partent avec la fumée, puisque celle-ci part à une température supérieure à la température ambiante.

On note que l'excès d'air est une source principale des pertes de combustion, puisqu'on fait entrer de l'air frais dans le foyer de la chaudière et on le fait sortir à la température de fumée.

# Chapitre 3

## - Stockage de la bâche alimentaire - - Dégazeur thermique -

### 3.1 Stockage

#### 3.1.1 Bâche alimentaire

L'importance de la bâche alimentaire, dans laquelle l'eau d'appoint est stockée et dans laquelle le condensat retourne, est souvent sous-estimée. La plupart des éléments d'une chaufferie sont dupliqués, mais il est rare d'avoir deux bâches alimentaires. Cet élément crucial est souvent le dernier à être pris en considération.

Une bâche alimentaire dans une chaufferie de production vapeur est généralement la zone de rencontre et de mélange de l'eau froide d'appoint et du retour des condensats. Le mieux sera de répartir les deux débits, ainsi que la vapeur de revaporisation de la déconcentration par l'intermédiaire de diffuseurs bien en dessous du plan d'eau. Les diffuseurs doivent être en acier inoxydable et munis de supports résistants pour absorber les vibrations.

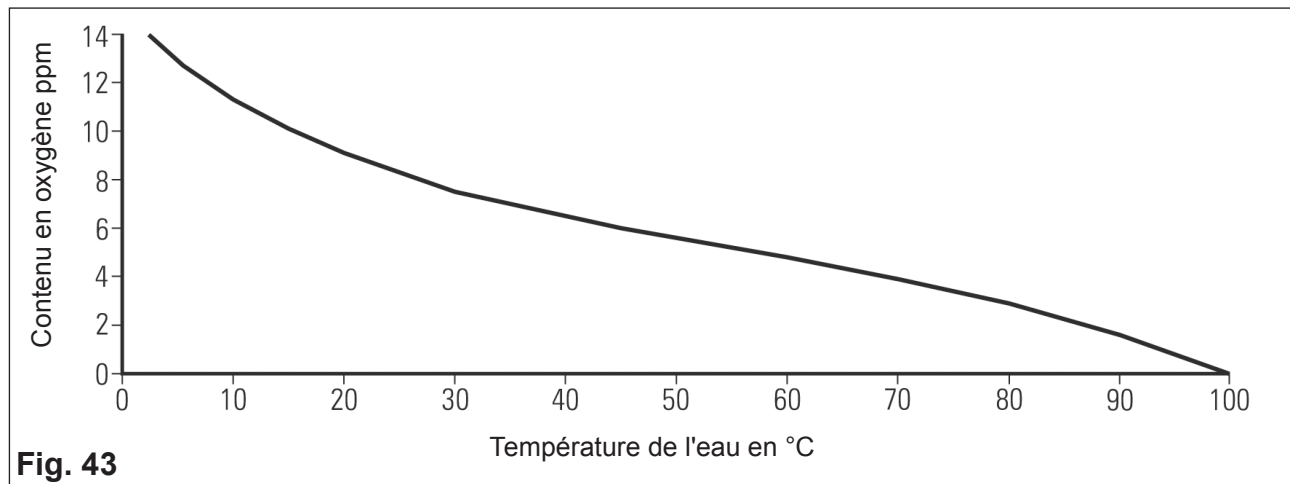


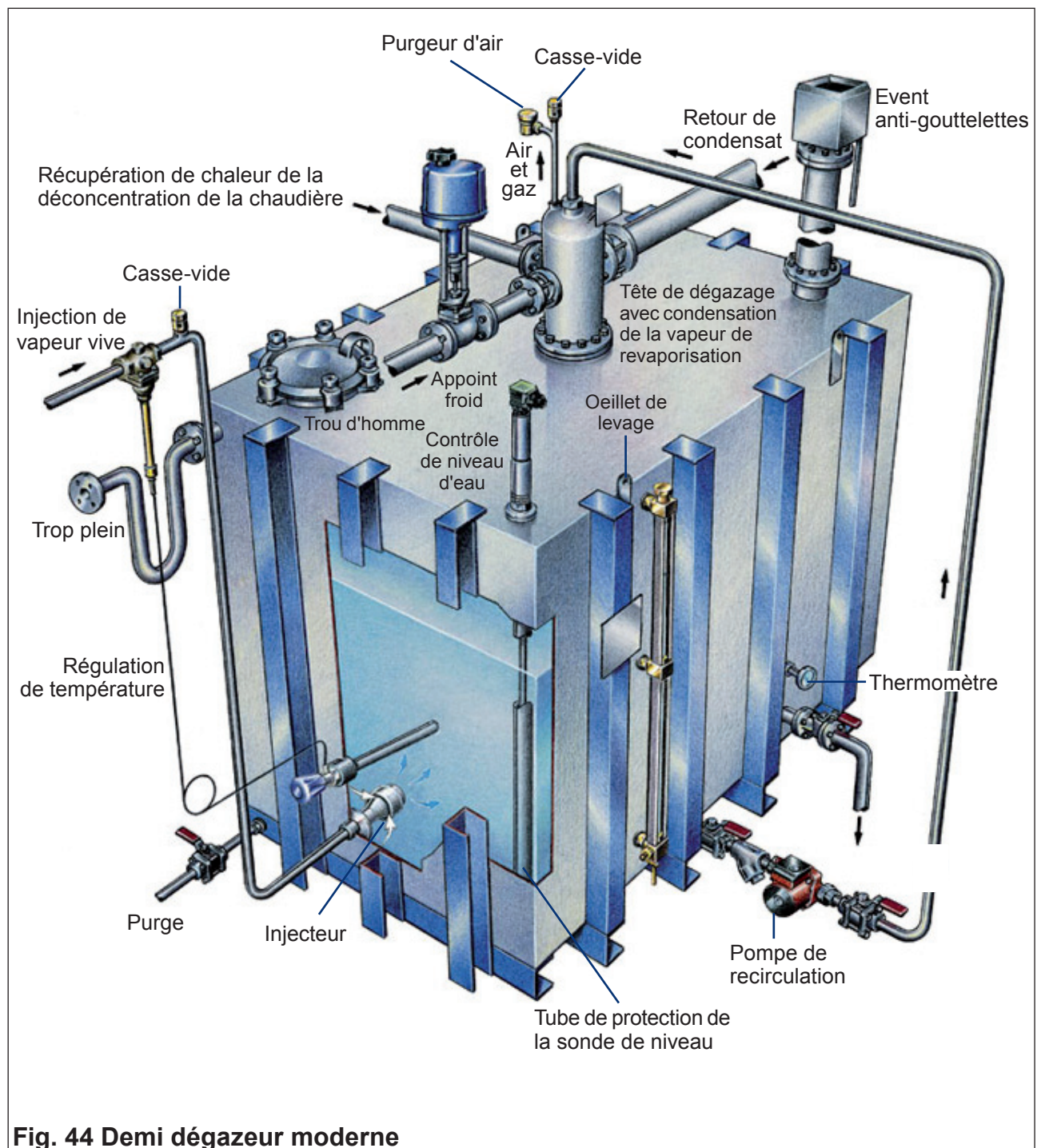
Fig. 43

#### 3.1.2 Température de service

Il est important de maintenir la bâche alimentaire à une température raisonnablement élevée pour pouvoir réaliser ce qui suit :

- **Éviter la corrosion de la chaudière et de l'installation vapeur provoquée par l'oxygène dissous et les autres gaz.** Ces gaz sont facilement absorbés par l'eau froide mais sont évacués en cas de réchauffage, à environ 85°C (voir Figure 43). Le réchauffage de l'eau d'alimentation, pour éliminer la masse d'oxygène permet de réduire jusqu'à 75% la quantité de produits de traitement contre les gaz dissous. En même temps, le rendement du générateur est amélioré grâce à une réduction du débit de déconcentration.
- **Éviter la détérioration de la chaudière.** La chaudière subit des chocs thermiques lorsque de l'eau froide est introduite sur les parois et les tubes chauds de la chaudière.
- **Maintenir le débit de vapeur nominal.** En alimentant la chaudière avec de l'eau froide, le débit de vapeur produit diminue. Les débits de vapeur de chaudière sont indiqués pour une température d'eau alimentaire de 100°C. Si l'eau alimentaire est froide, le débit de vapeur de la chaudière diminuera significativement.

- **Éviter d'endommager les appareils auxiliaires.** Si l'eau proche de son point d'ébullition entre dans une pompe, il y a risque de revaporisation sur les aubes de la pompe. Cette cavitation peut sérieusement endommager la pompe. Dans ce phénomène, les bulles de vapeur se forment lorsque la pression diminue, explosent lorsque la pression augmente de nouveau. L'eau s'écoulant dans les bulles se déplace à des vitesses très élevées et peuvent rapidement éroder le rotor de la pompe. Nous sommes dans une situation où il faut éviter la revaporisation, et cela est obtenu lorsqu'on maintient une hauteur de charge adéquate sur la pompe - garder une hauteur de charge d'aspiration positive nette (NPSH) créant une pression statique au-dessus de la tension de vapeur correspondant à la température de l'eau.



**Fig. 44 Demi dégazeur moderne**

### **3.1.3 Conception de la bête alimentaire**

De nombreux aspects de la bête alimentaire (Figure 44) influencent la manière dont la chaufferie fonctionne. Il est essentiel d'étudier consciencieusement la conception de la bête alimentaire et ses auxiliaires pour réaliser des économies substantielles en matière d'énergie et de traitement chimique afin d'augmenter réellement la sécurité.

Bien que les bêtes alimentaires cylindriques, verticales ou horizontales soient courantes, particulièrement pour les petites tailles, la forme rectangulaire est la plus régulièrement utilisée. Elle offre le volume optimal de stockage d'eau par rapport à son encombrement au sol.

### **3.1.4 Matériaux de la bête alimentaire**

#### **Acier au carbone**

C'est probablement le matériau le plus largement utilisé pour la construction des bêtes alimentaires. Non revêtu, c'est un matériau de coût relativement faible mais sujet à la corrosion. Cette faiblesse peut être améliorée par l'application de revêtements appropriés sur la surface interne, mais le coût peut se révéler supérieur à celui du réservoir. L'enduit doit être entretenu régulièrement.

#### **Plastique**

Ce matériau n'est généralement pas approprié aux bêtes alimentaires à cause du coût important des matériaux capables de supporter des températures très élevées. Le plastique convient toutefois aux réservoirs d'eau froide d'appoint.

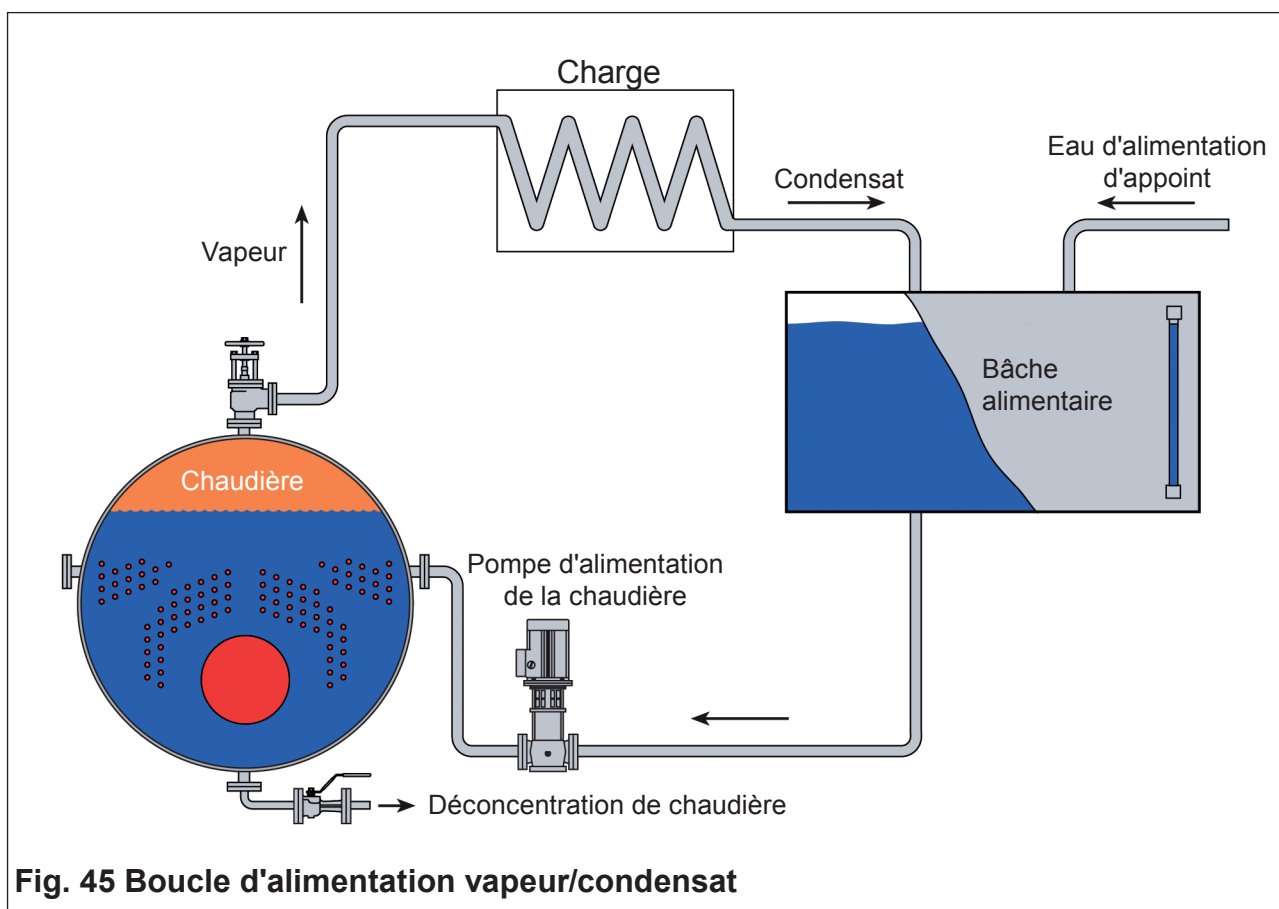
#### **Acier inoxydable austénitique**

Bien qu'ayant un coût initial élevé, l'augmentation de la durée de vie d'une bête alimentaire en acier inoxydable austénitique se justifie. Le grade 304L est généralement accepté et est l'option la plus appropriée. Son seul inconvénient technique est qu'il est sujet à la corrosion due aux chlorures en haute concentration à des températures supérieures à 60°C. Si cela est le cas, il faut en discuter avec un spécialiste du traitement d'eau.

Avec des chaufferies équipées de très grosses chaudières, on installe quelquefois des dégazeurs sous pression et on utilise de la vapeur vive pour réchauffer l'eau d'alimentation légèrement au-dessus de 100 °C, et ainsi évacuer l'oxygène dissous. L'oxygène et les autres gaz sont alors évacués sans danger à l'atmosphère.

Les dégazeurs thermiques doivent être construits comme des réservoirs sous pression avec tous les accessoires de contrôles et de sécurité nécessaires. De ce fait, leur coût est très élevé. En prenant en compte, tous ces facteurs, il existe néanmoins un compromis : Spirax Sarco a développé un ensemble pouvant être installé sur n'importe quelle bêche alimentaire pour évacuer le plus possible d'oxygène à la pression atmosphérique. Il ne sera peut-être pas tout à fait aussi efficace qu'un dégazeur thermique, mais il se révélera d'un coût bien plus avantageux dans de nombreuses applications.

La Figure 45 présente une bêche alimentaire dans le circuit d'une chaufferie.



### **3.1.5 Débit de la bêche alimentaire**

La bêche alimentaire donne une réserve d'eau pour couvrir l'interruption de l'alimentation vers les pompes d'alimentation. Une pratique traditionnelle est d'avoir une bêche alimentaire dont le débit est suffisant pour permettre une production de vapeur pendant une heure lorsque la production de vapeur de la chaudière est maximale. Pour les unités plus importantes, ce sera plus difficile et une alternative sera d'avoir une bêche alimentaire plus petite avec un stockage indépendant d'eau froide traitée. Il faut aussi que la bêche ait une capacité supplémentaire suffisante par rapport au niveau normal de service pour s'adapter aux anomalies du débit de retour de condensat. Cela a souvent lieu au démarrage de l'installation lorsque le condensat est resté dans les procédés et les tuyauteries pendant la nuit et est soudainement retourné à la bêche, ce qui pourrait obliger à évacuer cet excès de retour par le trop-plein.

### **3.1.6 Construction de la bêche alimentaire**

#### **Raidisseurs**

Le réservoir doit être complètement soudé et il est très important d'utiliser des raidisseurs adéquats pour renforcer les parois et le haut du réservoir. Il faut également des supports sur la base. En l'absence de tels renforts, lors de fonctionnement sous des conditions difficiles, des fatigues anormales de la structure peuvent se produire.

#### **Raccordements des conduites**

Tous les raccordements à brides dépassent de 150 mm pour faciliter le calorifugeage. Tous les raccordements taraudés doivent dépasser de 30 mm.

#### **Anneaux de levage**

Il est essentiel d'installer des anneaux de levage pour permettre une installation facile et sans danger.

### **3.1.7 Raccordements de la bêche alimentaire**

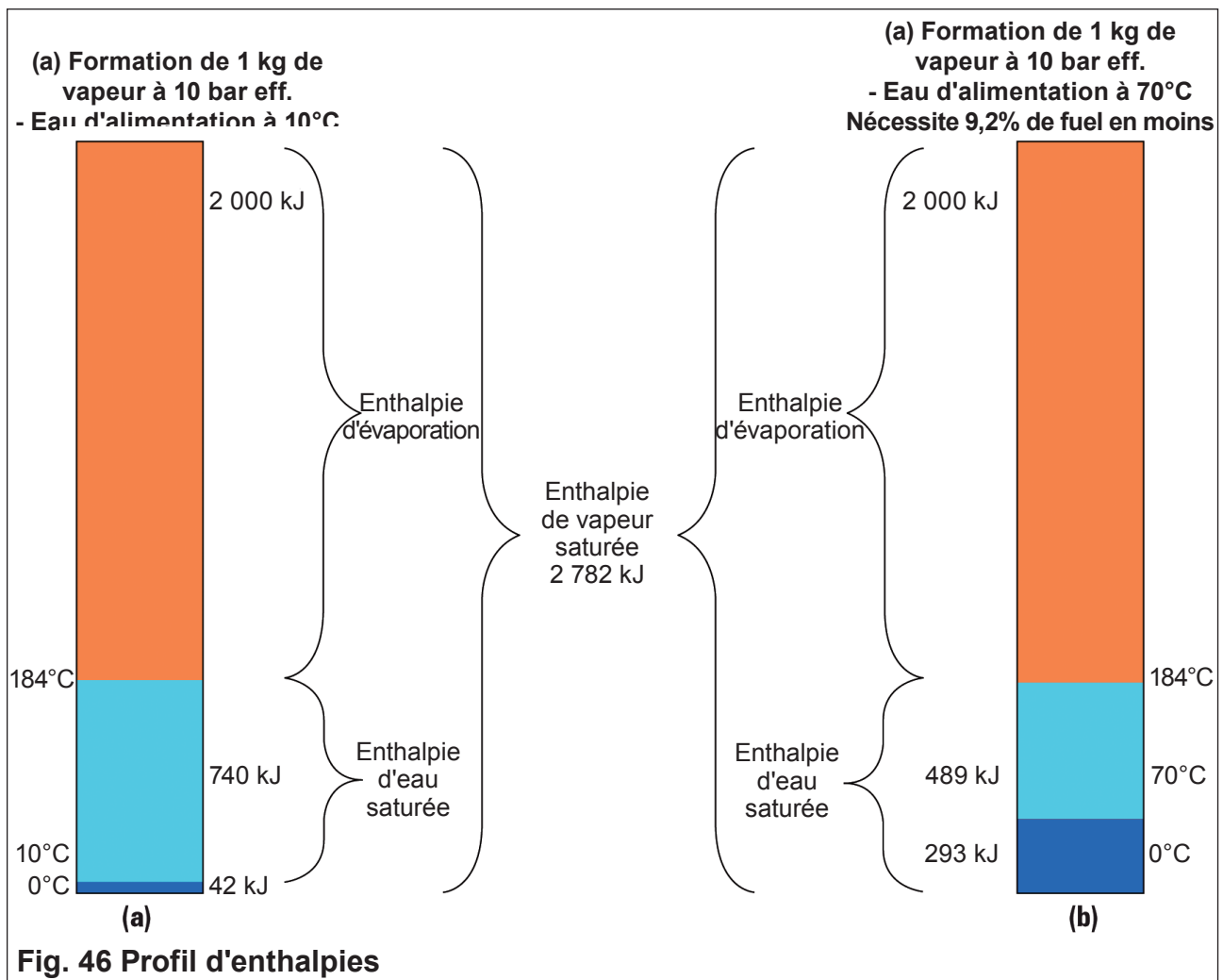
#### **Retour de condensat**

Le retour de condensat est l'une des économies d'énergie potentielle qui peuvent être réalisées dans une chaufferie. Le condensat a un contenu de chaleur élevé et environ 1% de combustible en moins est nécessaire pour chaque augmentation de 6°C de température dans la bêche alimentaire.

La Figure 46 (a) présente la formation de la vapeur à 10 bar eff., lorsque la chaudière est alimentée en eau à 10°C. La portion du bas du schéma représente l'enthalpie relativement faible disponible dans l'eau d'alimentation. On a rajouté 740 kJ/kg d'énergie thermique dans la chaudière pour atteindre la température de saturation à 10 bar eff.

La Figure 46 (b) montre la formation de vapeur à 10 bar eff., mais cette fois la chaudière est alimentée en eau à 70°C car il y a plus de retour de condensat.

L'augmentation de l'enthalpie contenue dans l'eau d'alimentation signifie que la chaudière doit seulement ajouter 489 kJ/kg d'énergie thermique pour atteindre la température de saturation à 10 bar eff. Ce qui représente une économie de 9,2% du coût du fuel. Le condensat retourné est virtuellement de l'eau pure, ce qui réduit non seulement le coût de l'eau mais aussi les produits chimiques de traitement d'eau et diminue les pertes associées à la déconcentration.



Si du condensat sous pression est retourné, la vapeur de revaporisation est évacuée dans la bêche alimentaire. La vapeur de revaporisation doit être condensée pour assurer que la chaleur et la quantité d'eau équivalente sont récupérés. La méthode traditionnelle est d'introduire la vapeur de revaporisation dans la bêche alimentaire par des tubes de diffusion. Utiliser une tête de désaéragage qui mélange l'eau d'appoint froide avec la condensation de la vapeur de revaporisation, et le retour de condensat est une méthode plus moderne et beaucoup plus fonctionnelle (voir Figure 44).

## 3.2 Traitement de conditionnement

Un traitement supplémentaire complète le traitement externe. Il est réalisé en dosant les produits chimiques dans la tuyauterie d'eau d'alimentation avant d'entrer dans la chaudière. Ce traitement améliore encore le traitement de l'eau brute après qu'elle soit passée dans la chaîne principale de traitement d'eau. En bref, c'est un soutien au travail déjà fait, ce qui, inévitablement, réduit les impuretés dans le système principal de traitement d'eau.

Les objectifs sont :

- Eviter la formation de tartre à partir des faibles particules de calcaire qui peuvent être passées.
- Gérer les impuretés spécifiques présentes.
- Maintenir l'équilibre chimique correct dans l'eau de chaudière - elle ne doit être ni alcaline ni acide, pour éviter la corrosion.
- Conditionner toutes les matières en suspension.
- Donner une protection anti-mousse.
- Ôter toute trace de gaz dissous.

'Un traitement interne' doit aussi être utilisé pour protéger le réseau de retour de condensat par des dépôts d'amines etc.

Une grande variété de produits chimiques est utilisée pour réaliser tout ceci, les exemples incluent les phosphates, les tannins, les amidons et les polymères synthétiques plus modernes. Le traitement de l'eau de chaudière a pour but de changer les sels se transformant en tartre en boues souples et mobiles. Les conditionneurs de boues utilisés dans les produits chimiques évitent que ces solides se déposent sur les surfaces métalliques, et les gardent en suspension. Avec des pressions et des températures élevées, la silice peut présenter de réels problèmes provoquant des points chauds importants sur les parties métalliques de la chaudière. Des polymères synthétiques permettent d'éviter ces problèmes.

Les niveaux d'alcalinité déjà mentionnés présents dans la chaudière, sont particulièrement importants. Ils sont régulés par l'addition d'hydroxyde de sodium. Maintenir un niveau de pH entre 9 et 11 permettra d'éviter des problèmes de corrosion en fournissant des conditions stables pour la formation d'un film de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en une couche fine mais dense sur les surfaces métalliques, les protégeant des attaques corrosives.

Il est important de savoir que la plupart des produits chimiques ajoutés pendant le traitement d'eau augmente le niveau de TDS de l'eau de chaudière.

### 3.2.1 Les gaz dissous

Ce sont principalement l'oxygène et le dioxyde de carbone et la présence de ces gaz dissous dans les chaudières entraîne la corrosion. Il est donc nécessaire de les évacuer et/ou de les neutraliser si on veut éviter toute détérioration. Le dioxyde de carbone dissous sous la forme d'acide carbonique, est souvent présent dans l'eau d'alimentation et il provoque la chute du pH. Une régulation correcte du pH corrigera cette chute mais le dioxyde de carbone est aussi dégagé dans les chaudières à cause de la température et d'autres réactions chimiques, il faut prendre en compte ce problème en utilisant un inhibiteur pour éviter une attaque corrosive massive du réseau de condensat.

Le gaz dissous le plus nocif reste l'oxygène, qui provoque des piqûres de corrosion dans le métal. De toutes petites quantités d'oxygène peuvent entraîner des catastrophes. Il peut être évacué mécaniquement et chimiquement. La quantité d'oxygène dissous présente dépend de la température de l'eau d'alimentation, plus elle est basse, plus le volume d'oxygène dissous est important. On peut donc évacuer l'oxygène de l'eau d'alimentation en la chauffant et en la maintenant à des températures élevées. Dans de nombreux cas, il peut être évacué en utilisant des dégazeurs sous pression, ou atmosphériques.

Tout oxygène restant sera évacué par l'addition d'un éliminateur chimique d'oxygène comme le sulfite de sodium catalysé  $2\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ . L'addition de ce composé chimique fait partie du TDS de chaudière.

D'autres éliminateurs d'oxygène impliquent des composés organiques ou de l'hydrazine. Cette dernière, toutefois, est toxique et n'est généralement pas utilisée dans les installations à petite ou moyenne pression.

### 3.3 Dégazeur thermique

#### 3.3.1 Désaération dans les chaudières

La désaération peut être accomplie en utilisant des moyens physiques tels que des dégazeurs thermiques ou des dégazeurs sous vide ou un moyen chimique tels que les réducteurs d'oxygène (traitement d'affinage) ou les résines catalytiques. Les contracteurs à membrane sont de plus en plus employés. Le dioxyde de carbone est souvent éliminé en utilisant un moyen physique. Le but d'un dégazeur est de réduire les gaz dissous, particulièrement l'oxygène, à un niveau faible et d'améliorer l'efficacité thermique de l'installation en augmentant la température de l'eau. De plus, ils permettent le stockage de l'eau et fournissent des conditions d'aspiration adéquates des pompes d'eau d'alimentation.

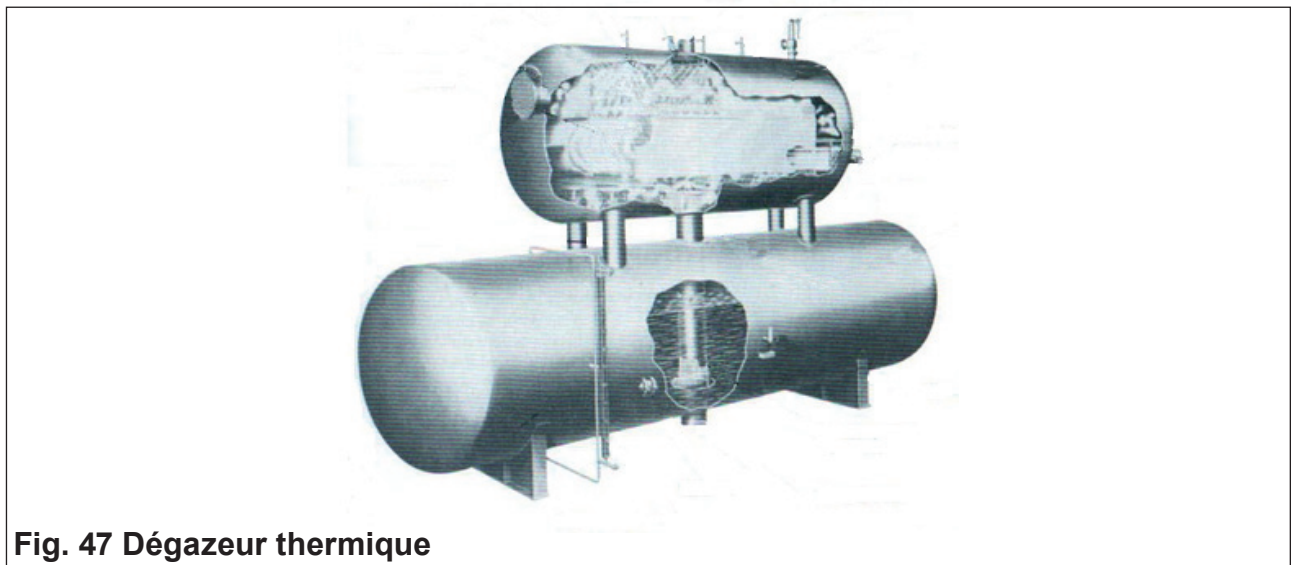


Fig. 47 Dégazeur thermique

Les dégazeurs à pression peuvent être classés dans deux grandes catégories : type plateau et type spray.

#### 3.3.2 Les dégazeurs thermiques de type plateau

Ils se composent d'une coque, de pulvérisateurs pour distribuer et diffuser l'eau, de colonne de plateau et une paroi protectrice inter-cuve. La cuve est constituée d'acier à faible teneur en carbone, mais de l'acier inoxydable, plus résistant à la corrosion, est utilisé pour les pulvérisateurs et les autres parties.

L'eau entrante est pulvérisée dans l'atmosphère de vapeur, où elle est chauffée jusqu'à peu de degrés de la température de vapeur saturée. La plupart des gaz non-condensables (principalement l'oxygène et le dioxyde de carbone libre) sont relâchés dans la vapeur pendant que l'eau est pulvérisée dans l'unité. Les joints empêchent la recontamination de l'eau des colonnes de plateau par le gaz provenant de la pulvérisation. L'eau descend de plateau en plateau, se décompose en fines gouttelettes qui entrent en contact avec la vapeur entrante.

La vapeur chauffe l'eau jusqu'à la température de saturation de vapeur et élimine les dernières traces d'oxygène. L'eau désaérée tombe alors dans l'espace de stockage, où un isolant à vapeur protège de la recontamination. Il est habituellement stocké dans un réservoir séparé. La vapeur entre dans le désaérateur dans le compartiment à plateau, circule vers le bas dans les colonnes de plateaux parallèles. Une très faible quantité de vapeur se condense dans cette section pendant que la température de l'eau s'élève jusqu'à la température de saturation de vapeur. Le reste de la vapeur balaie l'eau en cascade. Avant de quitter le compartiment à plateau, la vapeur circule entre la coque et les parois par la section de diffusion. La plupart de la vapeur est condensée et devient une partie de l'eau dégazée.

Une faible portion de cette vapeur, qui contient un gaz non-condensé relâché par l'eau, est mis à l'air libre. Il est essentiel que cette ventilation soit effectuée à tous moments ou la désaération sera incomplète. La vapeur circulant à travers les colonnes de plateau peut être de courant croisé, à co-courant ou à contre-courant avec l'eau.

### 3.3.3 Les dégazeurs thermiques de type spray

Ils sont composés d'une coque, de soupape de sécurité à ressort, d'une section de condensation à contact direct et d'un bouilleur pour le dégazage final; la coque doit être en acier à faible teneur en carbone, les valves de diffusion et la section de condensation sont en acier inoxydable. L'eau entrante est pulvérisée dans une atmosphère de vapeur et chauffée jusqu'à peu de degré de la température de saturation de vapeur. La plupart des gaz non-condensables sont relâchés dans la vapeur, et l'eau chaude tombe des joints d'eau et des drains jusqu'à la section inférieure du bouilleur. L'eau est balayée par une grande quantité de vapeur et chauffée jusqu'à la température de saturation régnant à ce point. Pendant que le mélange eau-vapeur augmente dans le bouilleur, l'eau dégazée est à peu de degré en dessous de la température de saturation, dû à une légère perte de pression. De cette manière, une faible quantité d'évaporation est produite, ce qui facilite le dégagement des gaz dissous. L'eau dégazée déborde des bouilleur à vapeur jusqu'à la section de stockage.

La vapeur entre dans le désaérateur par le côté et s'écoule dans le bouilleur. Après l'écoulement dans le bouilleur, elle passe dans le compartiment de réchauffage pour chauffer l'eau entrant. La majeure partie de la vapeur se condense dans la section de pulvérisation pour devenir une partie de l'eau dégazée. Une faible portion des gaz est ventilée à l'atmosphère pour éliminer les gaz non-condensés.

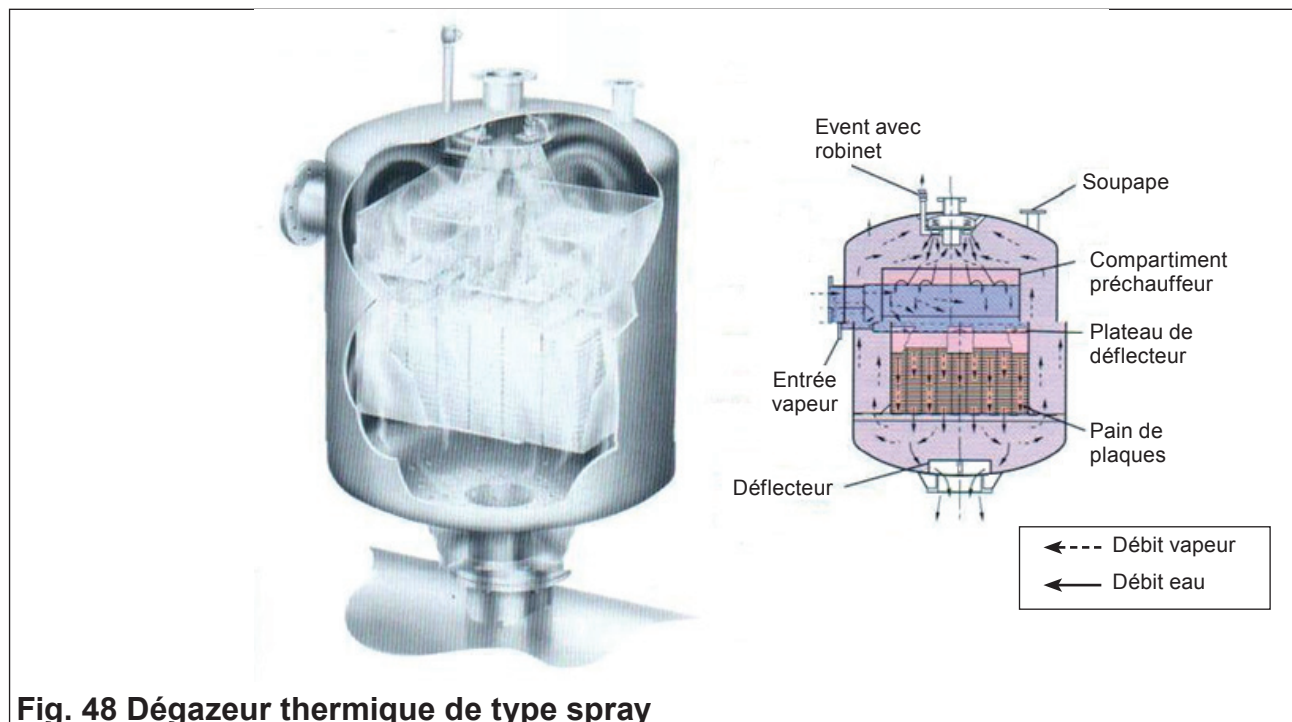


Fig. 48 Dégazeur thermique de type spray

# Chapitre 4

## Déconcentration et extraction de fond

### 4.1 Taux de salinité

#### 4.1.1 Mesure du TDS

La concentration des sels à partir de laquelle de la mousse peut se créer, varie selon les chaudières. Ces solides dissous peuvent être mesurés par des méthodes chimiques, en mesurant précisément la masse volumique avec un hydromètre ou la conductivité de l'eau de chaudière avec un conductivimètre.

#### 4.1.2 Méthode de la masse volumique relative

La masse volumique relative est liée au contenu en solides dissous. La masse volumique de l'eau brute, de l'eau d'alimentation et des condensats est si proche de celle de l'eau pure qu'il est impossible de bien la mesurer avec un hydromètre. On peut toutefois employer un hydromètre pour mesurer les eaux de chaudières. On obtient une mesure approximative des solides dissous car pour les eaux de chaudières, chaque augmentation de 0,0001 de la masse volumique à 15,5°C est environ égale à 110 ppm. Il faut un hydromètre très sensible qui doit être manipulé et utilisé avec attention si on veut obtenir une mesure satisfaisante du TDS. La procédure est généralement la suivante :

- Filtrer l'échantillon d'eau de chaudière pour évacuer tous les solides en suspension qui fausseraient la lecture.
- Refroidir à 15,5°C.
- Ajouter quelques gouttes d'un agent humidificateur pour éviter que les bulles n'adhèrent à l'hydromètre.
- Mettre l'hydromètre dans l'échantillon et agiter lentement pour évacuer les bulles.
- Lire la masse volumique relative.

Calculer les TDS en ppm ainsi :

$$\text{TDS} = (\text{masse volumique relative à } 15,5 \text{ °C} - 1) \times 1,1 \times 10^6$$

ou bien lire les TDS sur le tableau fourni avec l'hydromètre.

#### 4.1.3 Méthode par conductivité

L'hydromètre est un appareil sensible qui peut facilement être abîmé. Pour éviter des erreurs de lecture, il faut régulièrement vérifier qu'il ne contient pas d'eau distillée.

L'hydromètre n'est plus très populaire car la conductivité est une quantité plus facile et plus précise à mesurer.

La manière la plus facile et la plus rapide pour obtenir les TDS d'un échantillon est d'utiliser un conductivimètre équipé d'une batterie à compensation de température.

Le conductivimètre présenté Figure 49, est prévu pour être utilisé jusqu'à une température de 45°C. Il peut donc mesurer des niveaux de conductivité d'un échantillon d'eau froide refroidie de chaudière.



Fig. 49 Conductivimètre

## 4.2 Comparaison des unités utilisées pour mesurer les TDS

Le tableau suivant donne des conversions approximatives du TDS en ppm en d'autres unités. Les degrés Baumé et les degrés Twaddle (ou Twaddell) sont d'autres échelles pour les hydromètres.

**Tableau 3**

Solides totalement dissous ppm	Conductivité classique en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25 °C		Masse volumique relative à 15,5°C	Degrés Baumé °Be	Degrés Twaddle °Tw
	neutralisé	non-neutralisé			
600	857	1 200	1,000 5	0,079	0,109
800	1 143	1 600	1,000 7	0,105	0,145
1 000	1 429	2 000	1,000 9	0,132	0,182
1 200	1 714	2 400	1,001 1	0,158	0,218
1 400	2 000	2 800	1,001 3	0,184	0,255
1 600	2 286	3 200	1,001 5	0,221	0,291
1 800	2 571	3 600	1,001 6	0,237	0,327
2 000	2 857	4 000	1,001 8	0,263	0,364
2 200	3 143	4 400	1,002 0	0,289	0,400
2 400	3 428	4 800	1,002 2	0,316	0,436
2 600	3 714	5 200	1,002 3	0,342	0,473
2 800	4 000	5 600	1,002 5	0,368	0,509
3 000	4 286	6 000	1,002 7	0,394	0,545
3 200	4 571	6 400	1,002 9	0,421	0,582
3 400	4 857	6 800	1,003 1	0,447	0,618
3 600	5 143	7 200	1,003 3	0,473	0,655
3 800	5 428	7 600	1,003 5	0,499	0,691
4 000	5 714	8 000	1,003 7	0,525	0,727
4 200	6 000	8 400	1,003 8	0,552	0,764
4 400	6 285	8 800	1,004 0	0,578	0,800
4 600	6 571	9 200	1,004 2	0,604	0,836
4 800	6 857	9 600	1,004 4	0,630	0,873
5 000	7 143	10 000	1,004 6	0,656	0,909
5 200	7 428	10 400	1,004 8	0,682	0,945
5 400	7 714	10 800	1,005 0	0,708	0,982
5 600	8 000	11 200	1,005 2	0,734	1,018
5 800	8 285	11 600	1,005 3	0,761	1,055
6 000	8 571	12 000	1,005 5	0,787	1,091

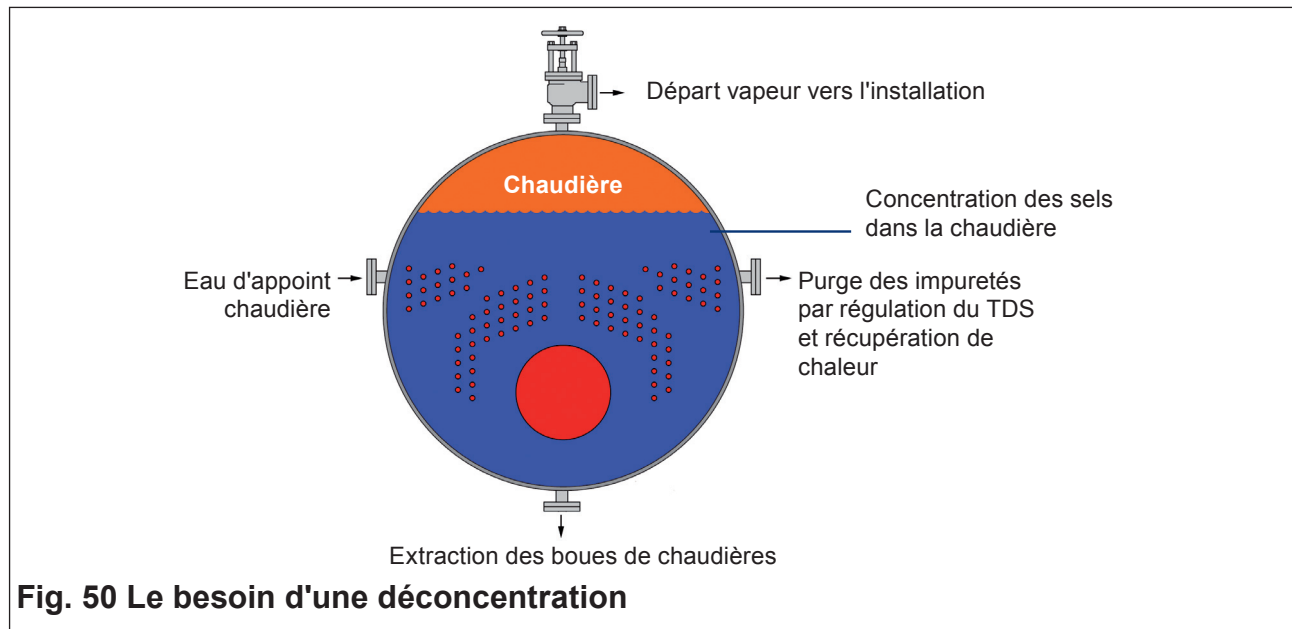
## 4.3 Choisir le TDS optimum de l'eau de chaudière

Les chaudières à calandre traditionnelle fonctionnent normalement avec une gamme de TDS de 2000 ppm pour les très petites chaudières, jusqu'à 3500 ppm pour les très grosses chaudières. Dans la mesure où la chaudière fonctionne près de sa pression de service, où les conditions de débit de la vapeur ne sont pas très élevées, et où les autres conditions concernant l'eau de la chaudière sont correctement contrôlées, déconcentrer la chaudière pour maintenir le niveau de TDS aidera la chaudière à produire une vapeur raisonnablement sèche et propre.

Lorsque la chaudière produit de la vapeur, les solides dissous sont de plus en plus concentrés et les bulles de vapeur deviennent moins stables; celles-ci risquent de ne pas exploser

lorsqu'elles atteignent la surface de l'eau. Il existe un point de fonctionnement (qui dépend de la pression, de la taille de la chaudière, du débit vapeur) où une partie substantielle de l'espace vapeur se remplit de bulles formant une mousse susceptible d'être entraînée dans le réseau de vapeur.

Ceci est évidemment inacceptable. La vapeur est non seulement très humide lorsqu'elle sort de la chaudière, mais de plus, elle contient une grande quantité de solides dissous et éventuellement des solides en suspension. Ils contamineront les vannes de régulation, les échangeurs et les purgeurs de condensat.



**Fig. 50 Le besoin d'une déconcentration**

De grandes quantités de solides en suspension peuvent provoquer de la mousse, une alcalinité élevée ou la contamination par des huiles et des graisses. Si ces facteurs sont correctement contrôlés la cause la plus courante d'entraînement est un niveau élevé des solides dissous. Il faut contrôler attentivement la quantité du TDS de l'eau de chaudière, ainsi que ces autres facteurs, de manière à minimiser les risques de mousse et d'entraînement d'eau.

La concentration réelle en solides dissous à laquelle la mousse se forme diffère d'une chaudière à l'autre.

Le Tableau 4 présente quelques indications sur les quantités maximales admises du TDS de certains types de chaudière. Si ces quantités sont dépassées, des problèmes peuvent arriver.

**Tableau 4**

Type de chaudière	TDS maximum (ppm)
Lanchire	10 000
2 passes économiques	4 500
Package et 3 passes économiques	3 000 - 3 500
Tube d'eau basse pression	2 000 - 3 000
Tube d'eau moyenne pression	1 500
A serpentin et générateurs	2 000 (avec eau d'alimentation)

Le fabricant de chaudières doit toujours être consulté pour les recommandations spécifiques.

## 4.4 Calcul du taux de déconcentration

Les informations suivantes sont nécessaires :

- Le TDS de chaudière nécessaire en parties par million (ppm).
- Le TDS de l'eau d'alimentation en parties par million.  
On peut obtenir une valeur moyenne en observant les données du traitement d'eau. On peut aussi prélever un échantillon d'eau d'alimentation et mesurer sa conductivité. Comme avec la mesure du TDS de chaudière, la conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )  $\times 0,7 = \text{TDS}$  en parties par million (à  $25^\circ\text{C}$ ).

**Nota :** l'échantillon d'eau d'alimentation doit venir de la ligne d'alimentation de la chaudière ou de la bêche alimentaire mais pas d'un échantillon d'eau d'alimentation d'appoint.

- La quantité de vapeur que la chaudière génère, généralement mesurée en kg/h.  
Pour sélectionner un système de déconcentration, le calcul le plus important est généralement la quantité maximale de vapeur que la chaudière génère à plein régime.

Lorsqu'on a réuni les informations ci-dessus, le taux de déconcentration peut être calculé ainsi :

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

où :

F = TDS de l'eau d'appoint de chaudière en parties par million

B = TDS souhaité de chaudière en parties par million

S = Débit de vapeur en kg/h

### 4.4.1 Exemple

Une chaudière de 10 000 kg/h fonctionne à 10 bar eff. et a un TDS maximum disponible de 2 500 ppm.

TDS d'eau d'alimentation de chaudière = 250 ppm.

$$\begin{aligned} \text{Débit de déconcentration} &= \frac{250 \times 10\,000}{(2\,500 - 250)} \\ &= 1\,111 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

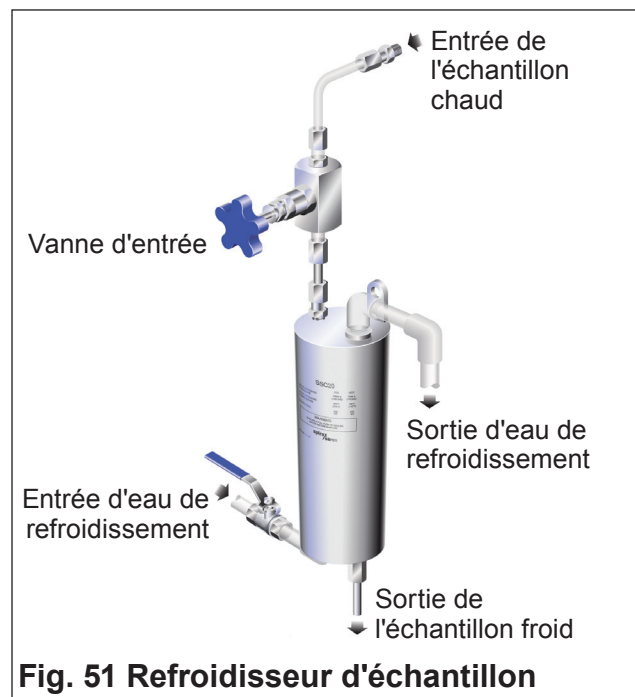
## 4.5 Prise d'échantillon de l'eau de chaudière

Lorsqu'on prélève un échantillon et qu'on mesure le TDS de l'eau de chaudière, il faut s'assurer qu'il est représentatif. Il n'est pas recommandé de prélever ces échantillons dans les indicateurs de niveau ou dans des bouteilles externes de régulation de niveau, car cette eau est du condensat relativement pur, formé par la condensation continue de la vapeur. De même, prélever des échantillons trop près du raccord d'alimentation de la chaudière risque de donner des lectures erronées.

Aujourd'hui, la plupart des fabricants de chaudière installent un raccord sur la tuyauterie de déconcentration du TDS. A cet endroit, il est généralement possible d'obtenir un échantillon représentatif.

### 4.5.1 Refroidisseur d'échantillon

Si l'eau est simplement soutirée de la chaudière, une partie va se revaporiser instantanément lorsque la pression diminuera. Non seulement c'est dangereux, mais toutes les analyses qui en seront tirées seront inévitablement erronées étant donné la perte de la vapeur de revaporisation. Pour être analysé, un échantillon d'eau froide est nécessaire, un refroidisseur d'échantillon permettra de gagner du temps et encouragera des tests fréquents. Un refroidisseur d'échantillon est un petit échangeur de chaleur qui fonctionne en dirigeant l'échantillon d'eau de déconcentration à travers un serpentin, refroidi par un écoulement à contre courant d'eau fraîche.



## 4.6 Déterminer le TDS de chaudière en utilisant la méthode de la conductivité électrique

La conductivité électrique de l'eau dépend de la quantité de solides dissous qu'elle contient. Puisque l'acidité et l'alcalinité ont beaucoup d'effet sur la conductivité électrique, il faut neutraliser l'échantillon d'eau de chaudière pour mesurer la conductivité. La procédure est la suivante :

- Ajouter à l'échantillon refroidi (<25°C) quelques gouttes d'une solution indicatrice au phénolphtaléine.
- Si l'échantillon est alcalin, on obtient une belle couleur pourpre.
- Ajouter de l'acide acétique (généralement 5%) goutte à goutte pour neutraliser l'échantillon et mélanger jusqu'à ce que la couleur disparaisse.

Le TDS en ppm est environ :

$$\text{TDS (ppm)} = (\text{conductivité en } \mu\text{S/cm}) \times 0,7$$

**Note** : cette relation n'est valide que pour un échantillon neutre à 25°C.

## 4.7 Régulation automatique du TDS

La quantité de TDS d'une chaudière peut être soit réglée manuellement soit automatiquement. Cette dernière est la plus courante et la plus efficace.

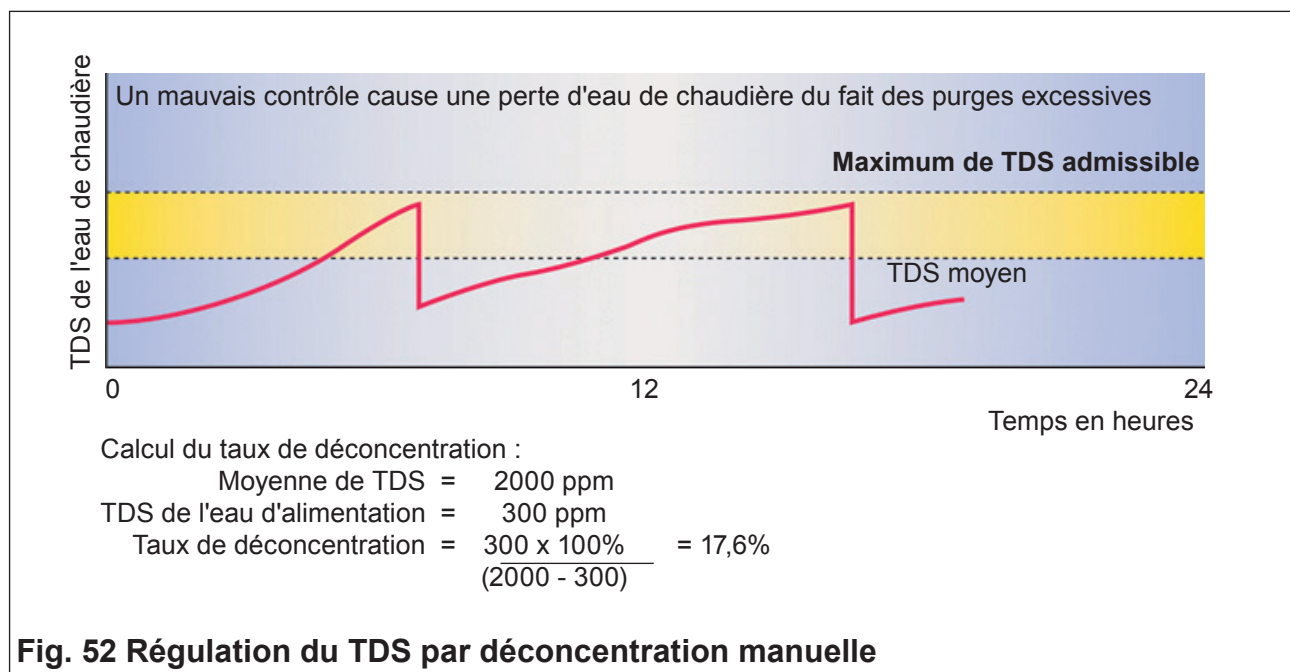
Les avantages de la régulation automatique du TDS sont :

- les économies de main d'œuvre due à l'automatisation.
- une régulation précise des niveaux de TDS.
- une économie d'énergie grâce au système de récupération de chaleur (si installé).

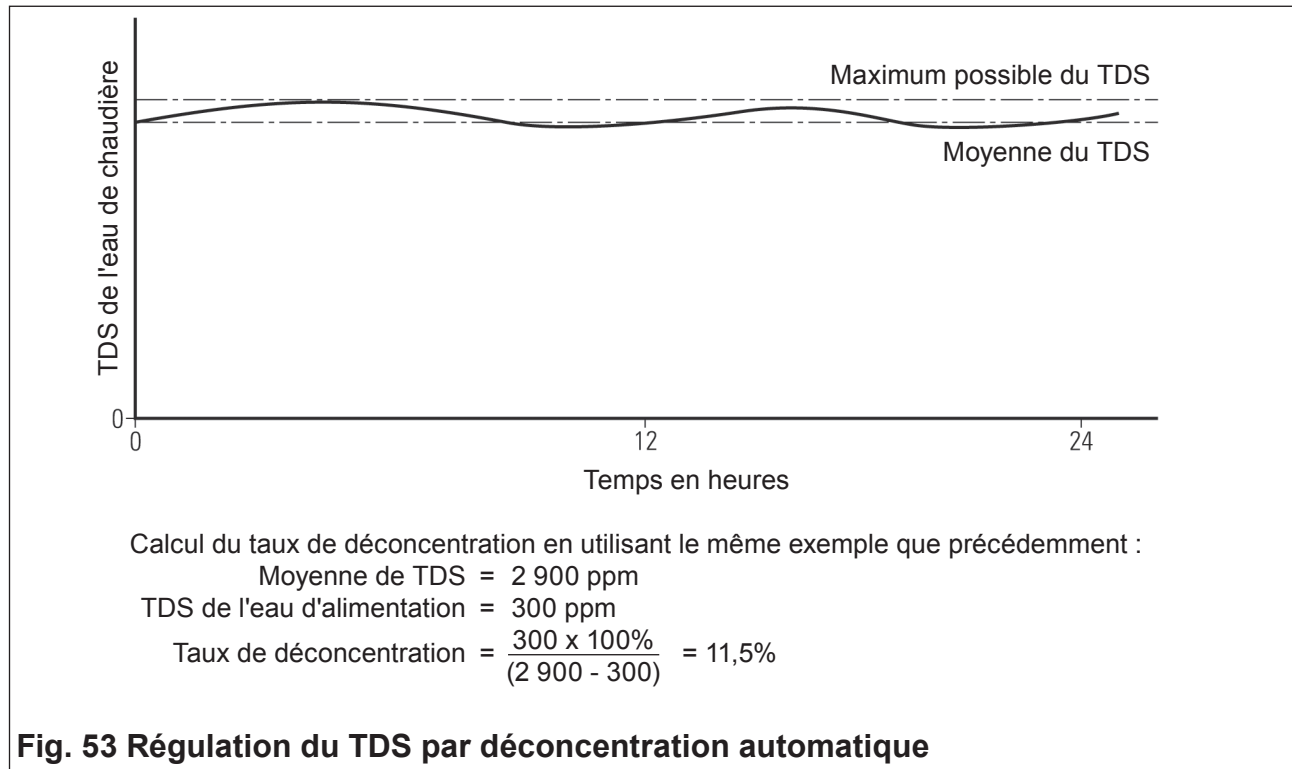
Les calculs des autres économies dues à la réduction du taux de déconcentration sont décrites ci-après.

Lorsque la méthode de déconcentration existante est juste une déconcentration manuelle de point bas de la chaudière, il peut être possible d'obtenir une idée sur les variations du TDS de la chaudière en étudiant les anciens enregistrements de traitement d'eau. Une valeur moyenne de TDS peut être établie. Lorsque le maximum réel est inférieur au maximum possible, la moyenne est telle que représentée Figure 52. Lorsque le maximum réel excède le maximum possible, la moyenne obtenue doit être diminuée en proportion, pour que le maximum possible de TDS ne soit pas dépassé.

La Figure 52 montre que la valeur moyenne du TDS avec une déconcentration de point bas manuelle, si elle est correctement réalisée, est bien inférieure au maximum possible. Par exemple, si la valeur maximale possible de TDS dans la chaudière est de 3 000 ppm, la valeur moyenne du TDS sera uniquement de 2 000 ppm. Cela signifie que le taux de déconcentration réel est plus important que celui requis.



En installant un système de régulation automatique du TDS, la valeur moyenne du TDS de l'eau de chaudière peut être maintenue au moins égale au maximum possible du TDS représenté comme ci-dessous (Figure 53).



Le taux de déconcentration est réduit de 6,1% en augmentant la valeur moyenne du TDS de l'eau de chaudière.

Il est aisé d'établir la quantité de fuel perdue en déconcentrant exagérément une chaudière et cela en comparant la quantité de chaleur requise pour augmenter la masse d'eau d'alimentation donnée à la température de saturation de la chaudière (c'est-à-dire les conditions de déconcentration) avec la quantité de chaleur requise pour transformer l'eau d'alimentation en vapeur.

Pour chaque 1% de déconcentration économisé, le pourcentage de fuel économisé est le suivant :

**Tableau 5**

Pression de la chaudière en bar eff.	% de fuel économisé pour 1% d'économie de déconcentration
7	0,19%
10	0,21%
17	0,25%
25	0,28%

## 4.8 Réguler le taux de déconcentration

### 4.8.1 Régulation de débit

Il existe de nombreuses façons pour réguler le taux de déconcentration de la chaudière, mais il faut d'abord prendre en considération certains éléments.

Après avoir calculé le débit de déconcentration nécessaire, il faut pouvoir réguler le débit.

- Le débit est connu.
- La pression de la chaudière est connue.
- Sous des circonstances normales, la pression en aval de la vanne de régulation sera inférieure à 0,5 bar eff.

Ces paramètres permettent de calculer la taille de l'orifice nécessaire. L'appareil de régulation doit tenir compte d'un autre problème.

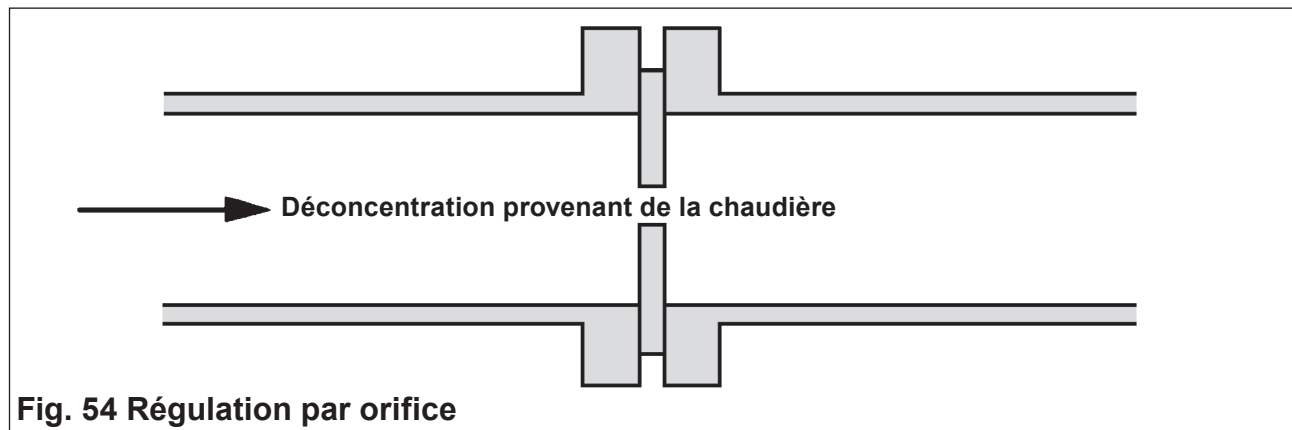


Fig. 54 Régulation par orifice

### 4.8.2 Régulation de perte de charge

L'eau évacuée par la chaudière est à la température de saturation et subit une perte de charge à travers l'orifice environ égale à la pression de la chaudière ; cela signifie qu'une proportion importante d'eau se revaporise son volume augmentant de plus de 1 000.

La vapeur peut circuler plus vite que l'eau, mais la vapeur et l'eau n'ont pas le temps de se séparer correctement et les gouttes d'eau sont entraînées à une vitesse trop élevée par la vapeur. Cela provoque l'érosion de l'orifice qui s'élargit, et ainsi plus d'eau qu'il n'est nécessaire sera progressivement évacuée, ce qui entraînera une perte d'énergie.

Le problème de revaporisation est évidemment plus important à pression élevée et c'est l'une des raisons pour laquelle les vannes à sièges normaux sont pratiquement limitées aux installations à 10 bar eff.

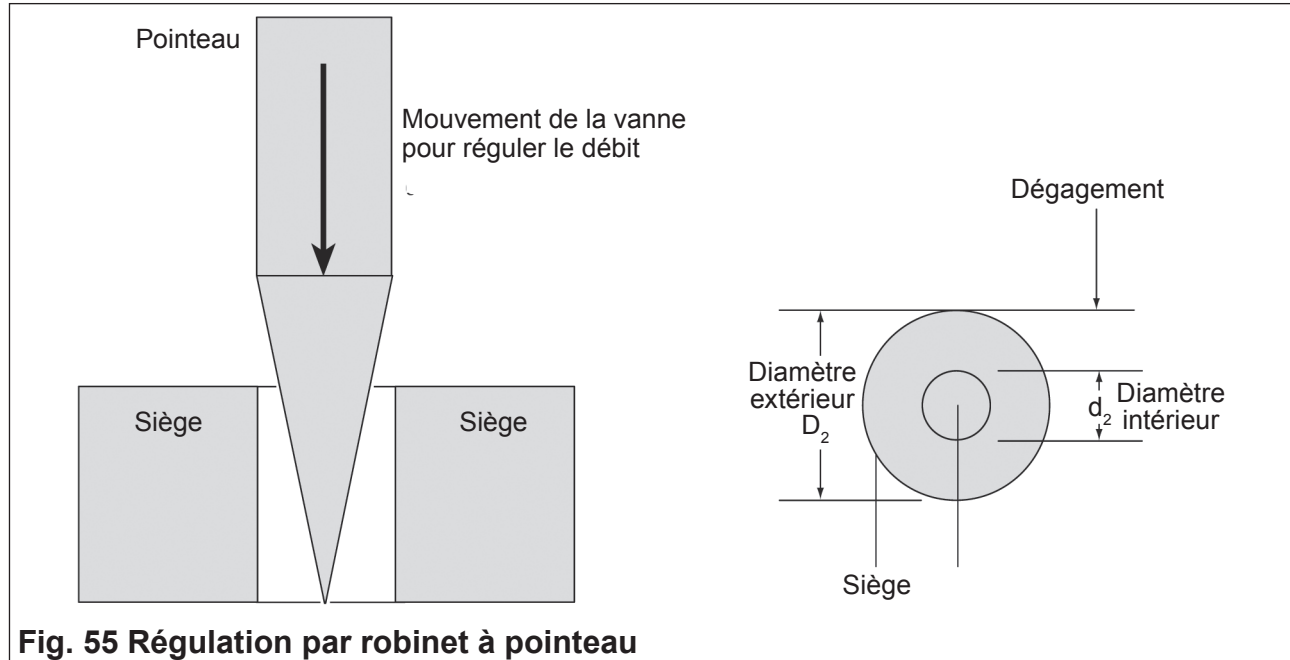
Il faut également se rappeler que l'eau évacuée provenant de la chaudière est chargée et qu'il suffit de peu d'impuretés pour restreindre ou même bloquer un petit orifice. Une alternative est d'utiliser un orifice plus important, mais de ne l'ouvrir que sur des courtes périodes.

On ne peut pas régler un orifice calibré, il ne peut qu'être corrigé pour des circonstances spécifiques. Si le débit de vapeur augmente, l'orifice ne laisse alors pas assez passer d'eau et le niveau de TDS de la chaudière augmente, provoquant primage et entraînement d'eau.

Si le débit de vapeur diminue, la quantité de déconcentration est trop élevée et l'énergie gaspillée.

### 4.8.3 Vanne de déconcentration continue

Une vanne de déconcentration continue se comporte comme un robinet à pointeau. Sur une vue de dessous, c'est un anneau dont le cercle extérieur est défini par le siège de la vanne, et le cercle intérieur défini par le pointeau. Si le débit augmente, le pointeau sort du siège et le passage entre le pointeau et le siège est augmenté.



**Fig. 55 Régulation par robinet à pointeau**

Le diamètre de l'orifice nécessaire pour le taux de déconcentration de 1 111 kg/h (exemple de la page 54) est de 3,6 mm.

Supposons que nous utilisons une vanne dont le diamètre du siège est de 10 mm, nous pouvons calculer le diamètre du pointeau au point où il est réglé pour donner le débit requis de 1 111 kg/h.

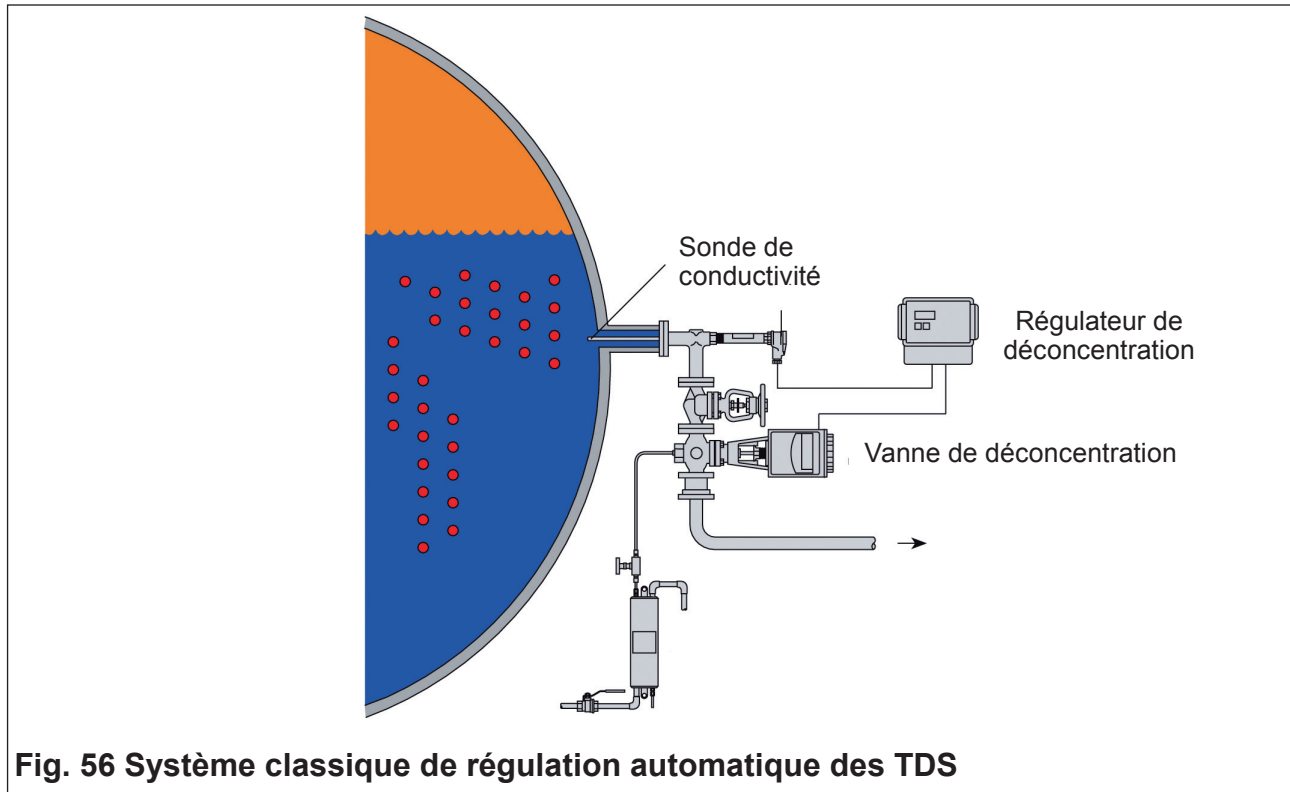
$$\begin{aligned}
 D_{\text{orifice}} &= D_1 = 3,6 \text{ mm} \\
 D_{\text{siège}} &= D_2 = 10,0 \text{ mm} \quad d_2 = [(D_2)^2 - (D_1)^2]^{1/2} \\
 d_{\text{pointeau}} &= d_2 = ?
 \end{aligned}$$

Résoudre l'équation montre que le réglage correct du diamètre du pointeau est de 9,33 mm et que le jeu entre le pointeau et le siège est d'environ 0,3 mm. Il s'agit d'une des faiblesses fondamentales des vannes de déconcentration continue, le jeu qui existe entre le siège et le pointeau est si petit qu'il est difficile d'éviter que les petites particules ne se bloquent.

Il faut en plus prendre en compte le problème de la revaporisation à travers le siège de la vanne. Le jeu entre le siège et le pointeau fait que le mélange eau/vapeur s'accélère en s'écoulant à travers l'orifice. L'érosion est inévitable, ce qui entraîne une détérioration de l'étanchéité en fermeture du système.

Il est possible de surmonter ce problème de revaporisation en diminuant la pression par étapes dans la vanne. Elles peuvent prendre la forme de trois ou quatre sièges progressivement plus grands et inclure un passage hélicoïdal.

Ce type de vanne est conçu pour la régulation manuelle, mais le besoin fréquent de mesure de la qualité d'eau et de réglage associé de la vanne a entraîné la création de la régulation automatique via des servomoteurs électriques et des sondes électromagnétiques. Le problème fondamental du faible jeu entre le siège et le pointeau et de la revaporisation au niveau du siège, font qu'il est impossible d'assurer une étanchéité totale. Cette non étanchéité entraîne une déconcentration excessive, qui diminue les débits de vapeur de la chaudière.



**Fig. 56 Système classique de régulation automatique des TDS**

#### 4.8.4 Systèmes de régulation électronique en boucle fermée

Ces systèmes mesurent la conductivité de l'eau de chaudière, la comparent à une consigne, et ouvrent une vanne de régulation de déconcentration si le niveau en TDS est trop élevé.

Lorsque la pression de chaudière est inférieure ou égale à 10 bar eff., des électrovannes de haute qualité peuvent être utilisées pour réguler la déconcentration.

Lorsque la pression est de 10 bar eff. ou plus, il faut des vannes spéciales pour éviter l'érosion du siège. Pour cette application, des clapets à cage seront préférables car la revaporisation a lieu bien en amont du siège de vanne.

Des avantages significatifs sont également possibles si le système de régulation est de type tout ou rien. Il permet l'utilisation d'un orifice plus important qui réduit les détériorations dues à la revaporisation.

Il existe sur le marché différents systèmes qui mesurent la conductivité directement dans la chaudière ou bien dans une chambre d'échantillonnage externe qui doit être purgée à intervalles réguliers si l'on veut obtenir un échantillon représentatif de l'eau de chaudière. La sélection réelle dépend de facteurs tels que le type de chaudière, la pression, la quantité d'eau à déconcentrer. Ces systèmes sont conçus pour mesurer la conductivité de l'eau de chaudière avec une sonde de conductivité.

La valeur mesurée est comparée au point de réglage programmé sur le régulateur. Si la valeur mesurée est supérieure au point de réglage, la vanne de déconcentration s'ouvre jusqu'à ce que le point de réglage soit atteint.

Comme mentionné plus tôt, une augmentation de la température de l'eau entraîne une augmentation de la conductivité électrique. Si une chaudière fonctionne sur une grande plage température/pression, ce qui est le cas des chaudières ayant un réglage à marche de nuit réduite, ou avec une chaudière dont la plage de régulation du brûleur est importante, une compensation est nécessaire lorsque la conductivité est le paramètre de régulation.

## 4.9 Mesure de conductivité dans la chaudière

Il est nécessaire de mesurer la conductivité de l'eau de chaudière dans la chaudière ou dans la tuyauterie de déconcentration. Il est évident que ces conditions sont très différentes de celles de l'échantillon obtenu via un refroidisseur où l'eau est refroidie, puis souvent neutralisée (pH = 7). Un important écart de température et un pH élevé sont les principales différences entre les deux méthodes.

Augmenter la température entraîne une augmentation de la conductivité électrique. Pour chaque °C d'augmentation de température, la conductivité de l'eau de chaudière augmente environ de 2% de sa valeur à 25°C.

$$\sigma_T = \sigma_{25} [1 + \alpha(T - 25)]$$

où :

$\sigma_T$  = Conductivité à la température T,  $\mu\text{S/cm}$

$\sigma_{25}$  = Conductivité à 25°C,  $\mu\text{S/cm}$

$\alpha$  = Coefficient de température, par °C (0,02°C ou 2% °C)

T = Température, °C

Un échantillon d'eau de chaudière a une conductivité non neutralisée de 5 000  $\mu\text{S/cm}$  à 25°C. Quelle est la conductivité de l'eau de chaudière à 10 bar eff, à température saturée ?

Température de saturation = 184°C

$$\begin{aligned}\sigma_T &= 5\,000 [1 + 0,02 (184 - 25)] \\ &= 20\,900 \mu\text{S/cm}\end{aligned}$$

Cela signifie que les conséquences de la température doivent être prises en compte par le régulateur de déconcentration, soit par une compensation automatique de température, soit en vérifiant que la pression de la chaudière (et donc la température) est constante.

Les faibles variations de pression de chaudière pendant les variations de débit ont relativement peu de conséquences. Si on a besoin de lectures précises du TDS sur des chaudières qui fonctionnent à des pressions très diverses, il faut absolument installer une compensation de température automatique.

## 4.10 Conversion d'une mesure de conductivité en résistance

### 4.10.1 Constante cellulaire

Pour mesurer la conductivité d'un liquide, on utilise une sonde qui a une "constante cellulaire". La valeur de la constante cellulaire dépend de la configuration de la sonde et de la trajectoire électrique dans le liquide.

La conductivité et la résistance sont liées à la constante cellulaire ainsi :

où :

$$R = \frac{K}{\sigma}$$

R = Résistance en Ohm

K = Constante cellulaire (unités en  $\text{cm}^{-1}$ )

$\sigma$  = Conductivité en S/cm

Plus l'extrémité de la sonde est éloignée de toute pièce de la chaudière, plus la constante cellulaire est élevée. Toutes les différences de la constante cellulaire sont prises en considération pour étalonner le régulateur.

#### 4.10.2 Exemple

Dans l'exemple précédent, la conductivité de l'eau de chaudière était de 20 900  $\mu\text{S/cm}$ . Pour une constante cellulaire de 0,3, quelle est la résistance mesurée par le régulateur ?

$$\begin{aligned} \text{Résistance } R &= \frac{0,3}{20\,900 \times 10^{-6}} \\ &= 14,4 \text{ ohms} \end{aligned}$$

#### 4.10.3 Mesurer la résistance

Bien que la conductivité de l'eau de chaudière soit convertie en une résistance à travers la sonde, elle ne peut pas être mesurée en utilisant un simple Ohmmètre.

Si une tension continue est appliquée à la sonde, de minuscules bulles d'hydrogène ou d'oxygène se forment à la surface à cause de l'électrolyse de l'eau. Cet effet, appelé polarisation électrolytique, provoque également la mesure d'une résistance beaucoup plus élevée.

Il est donc nécessaire d'utiliser une tension alternative pour mesurer la résistance de la sonde, c'est la méthode qui sera toujours sélectionnée pour les régulateurs de déconcentration. Une fréquence relativement élevée (par exemple, 1000 Hz) est nécessaire pour éviter la polarisation aux conductivités élevées de l'eau de chaudière.

### 4.11 Récupération thermique de la déconcentration de chaudière

**Nota :** 1 kJ/s = 1 kW

#### 4.11.1 Energie de la déconcentration

Si l'on utilise les données de l'exemple de la page 59, la quantité d'énergie évacuée par la déconcentration peut être calculée.

Pression de chaudière	=	10 bar eff.
Débit de chaudière	=	10 000 kg/h
TDS maximum possible	=	2500 ppm
TDS de l'eau d'alimentation	=	250 ppm
Taux de concentration calculé	=	1 111 kg/h

Pour obtenir une réponse en kW, il faut considérer :

$$\text{Le taux de déconcentration en kg/s} = \frac{1\,111 \text{ kg/h}}{3\,600 \text{ s/h}} = 0,31 \text{ kg/s}$$

$$\text{La quantité d'énergie de chaque kg de } h_r^* \text{ à 10 bar eff.} = 782 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Puissance déconcentrée} = 0,31 \text{ kg/s} \times 782 \text{ kJ/kg} = 241 \text{ kW}$$

\* $h_f$  est l'enthalpie spécifique de l'eau à température de saturation - que l'on obtient à partir des tables de vapeur.

Pour remettre cette puissance énergétique dans le contexte, en Europe du nord, un système de chauffage central d'une maison individuelle a une consommation moyenne d'environ 13 kW. Dans cet exemple, la puissance déconcentrée est donc suffisante pour chauffer 19 maisons.

Les calculs ci-dessus n'intègrent pas le fait que l'eau d'alimentation est fournie à une température supérieure à 0°C. En supposant que l'eau d'alimentation est de 10°C, la puissance déconcentrée relative à l'eau d'alimentation est réellement de 225 kW.

#### 4.11.2 Vapeur de revaporisation

L'eau de déconcentration évacuée de la chaudière est de l'eau à la température de saturation correspondant à la pression de chaudière. Dans le cas de l'exemple de la chaudière à 10 bar, la température est de 184°C. Sous des conditions atmosphériques, il n'est physiquement pas possible d'avoir de l'eau à 184°C même s'il y a trop d'enthalpie dans l'eau de déconcentration. Cette énergie excédante doit aller quelque part puisque l'une des lois naturelles les plus fondamentales est que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais peut uniquement changer de forme.

De ce fait, en supposant que l'eau de déconcentration est évacuée dans un système de revaporisation à 0,5 bar eff. et en utilisant les tables de la vapeur, il est possible de quantifier cet excès d'énergie :

Enthalpie du liquide à 10 bar eff. = 782 kJ/kg ( $h_f$  à 10 bar eff.)  
Enthalpie du liquide à 0,5 bar eff. = 468 kJ/kg ( $h_f$  à 0,5 bar eff.)  
Energie excédante = 314 kJ/kg

Si l'eau de déconcentration doit être évacuée directement à l'atmosphère, la condition secondaire devient 0 bar eff. L'énergie excédante augmente, le pourcentage de vapeur de revaporisation augmente aussi.

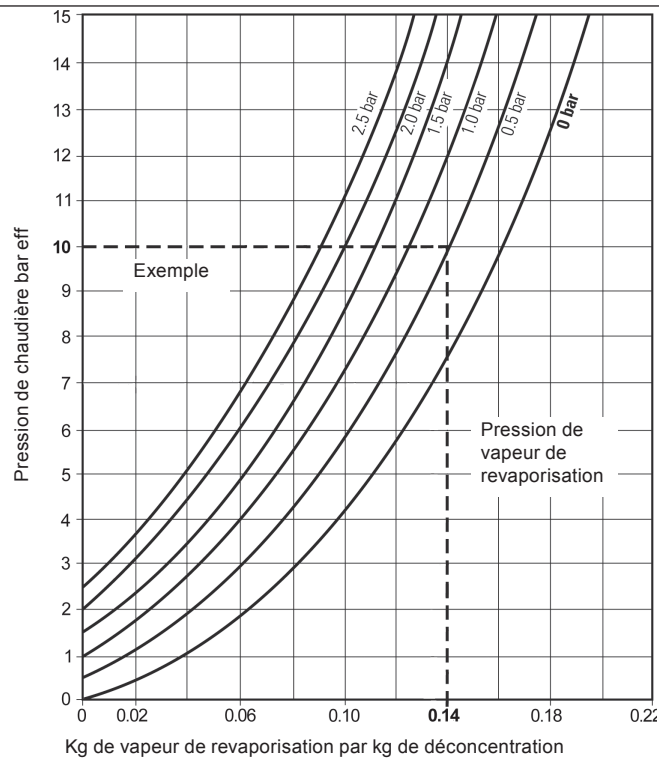
Puisque cette énergie ne peut pas exister dans l'eau, elle doit aller autre part. Elle devient de l'enthalpie d'évaporation à la nouvelle pression, c'est-à-dire qu'un pourcentage de l'eau se revaporise. La quantité de vapeur de revaporisation est facilement déterminée par calcul ou lue sur les tables de la vapeur d'eau.

L'enthalpie spécifique d'évaporation à 0,5 bar eff ( $h_{fg}$ ) sur les tables de la vapeur est de 2 226 kJ/kg.

$$\begin{aligned} \text{\% de vapeur de revaporisation} &= \frac{(h_{f \text{ haute pression}} - h_{f \text{ basse pression}})}{h_{fg \text{ basse pression}}} \times 100\% \\ &= \frac{782 - 468}{2\,226} \times 100\% = 14,1\% \end{aligned}$$

$h_f$  = Enthalpie sensible

$h_{fg}$  = Enthalpie de vaporisation à la pression de flash



**Fig. 57 Vapeur de revaporisation**

En d'autres termes, 14,1% de l'eau de la déconcentration de la chaudière se transforme en vapeur lorsque la pression diminue de 10 à 0,5 bar eff.

Il y a maintenant deux options :

- Purger cette vapeur de revaporisation à l'atmosphère via un ballon de purge avec une perte d'énergie inhérente et une perte d'eau de bonne qualité provenant de la condensation de cette vapeur de revaporisation.
- Contrôler la vaporisation, utiliser l'énergie et récupérer l'eau de la condensation de la vapeur de revaporisation.

Il est utile de quantifier la masse d'énergie qu'il y a dans la vapeur de revaporisation. On peut le faire en consultant les tables de vapeur.

$$\begin{aligned} \text{Quantité de vapeur de revaporisation} &= 1\,111 \text{ kg/h} \times 14,1\% \\ &= 157 \text{ kg/h de vapeur (0,0435 kg/s)} \end{aligned}$$

$$\text{Energie totale de la vapeur} = 2\,694 \text{ kJ/kg (} h_g \text{ à 0,5 bar eff.)}$$

$$\text{Puissance contenue dans la vapeur de revaporisation} = 117 \text{ kW}$$

Ce chiffre est à comparer au 241 kW lié à la déconcentration.

Si l'on veut récupérer la vapeur de revaporisation, elle représente presque 49% de l'énergie de déconcentration.

Pour plus de compréhension, le calcul ci-dessus n'intègre pas le fait que l'eau d'alimentation est fournie à une température supérieure à 0°C ; si l'on suppose que l'eau d'alimentation est de 10°C, on récupère 115 kW.

## 4.12 Comment récupérer et utiliser la vapeur de revaporisation ?

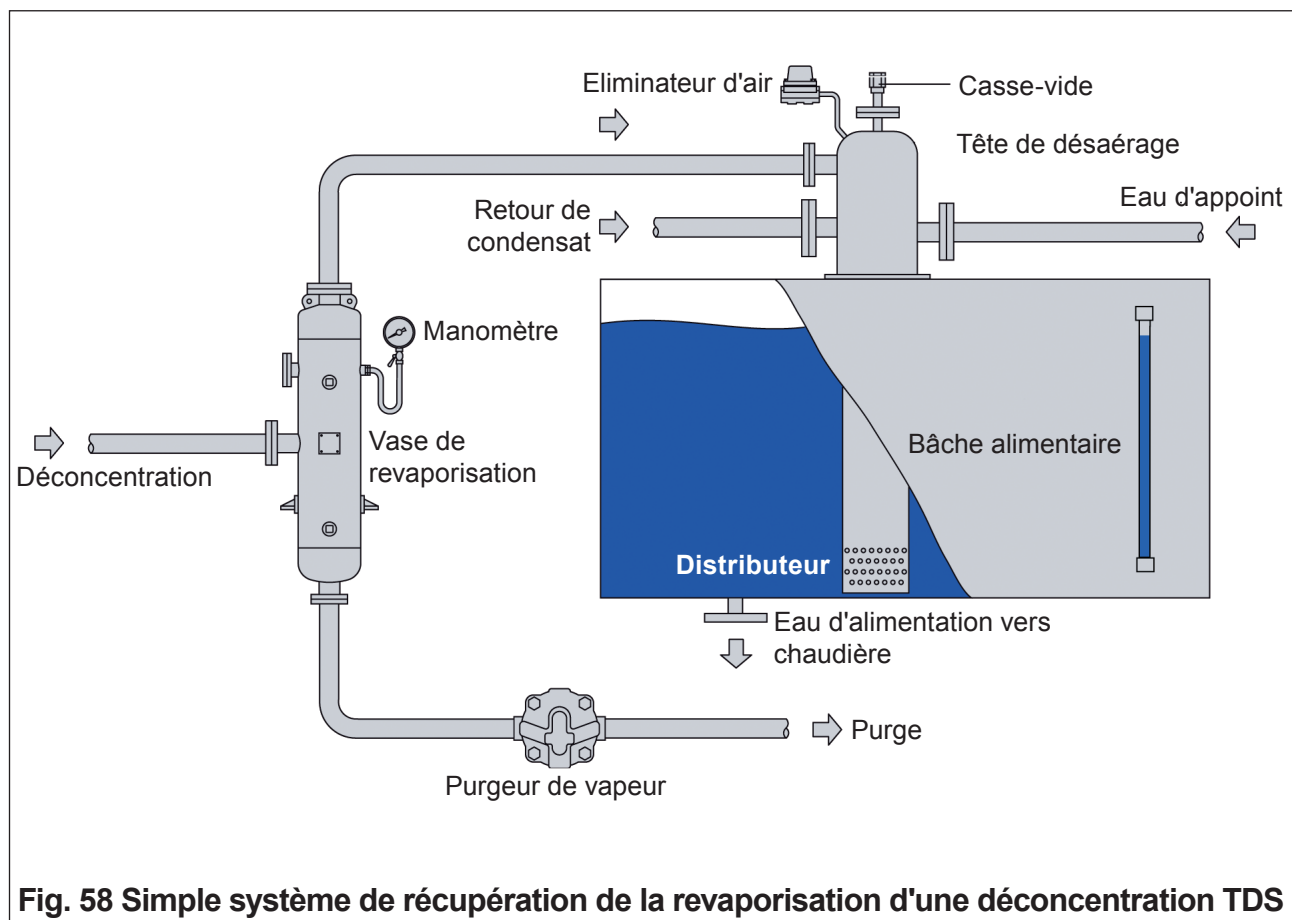
La vapeur de revaporisation est récupérée par un vase de revaporisation. Un vase de revaporisation est un volume dans lequel la vitesse est basse, ce qui permet de séparer l'eau chaude issue de la déconcentration et la vapeur de revaporisation, puis de les transférer dans différentes parties de l'installation.

La conception du vase de revaporisation est importante, du point de vue de la séparation de l'eau et de la vapeur de revaporisation.

Le lieu le plus approprié pour utiliser la vapeur de revaporisation est la bêche alimentaire de la chaudière. Elle n'est en général pas très éloignée et permettra de chauffer l'eau stockée et de récupérer la vapeur condensée.

Il est essentiel de prendre en compte la température de la bêche alimentaire. Si, à cause du système de récupération de chaleur, la température de la bêche est trop élevée, il faut envisager d'autres solutions que celle d'un système de récupération de chaleur, où la vapeur de revaporisation est évacuée dans la bêche alimentaire.

La Figure 58 présente une installation simple qui permet de récupérer très efficacement 117 kW, à faible coût.



**Fig. 58 Simple système de récupération de la revaporisation d'une déconcentration TDS**

## 4.13 Equipements nécessaires

### 4.13.1 Un vase de revaporisation

Les fabricants de vase de revaporisation ont des abaques de dimensionnement, mais dans tous les cas, la vitesse de la vapeur dans la section haute du réservoir ne doit pas dépasser 3 m/s.

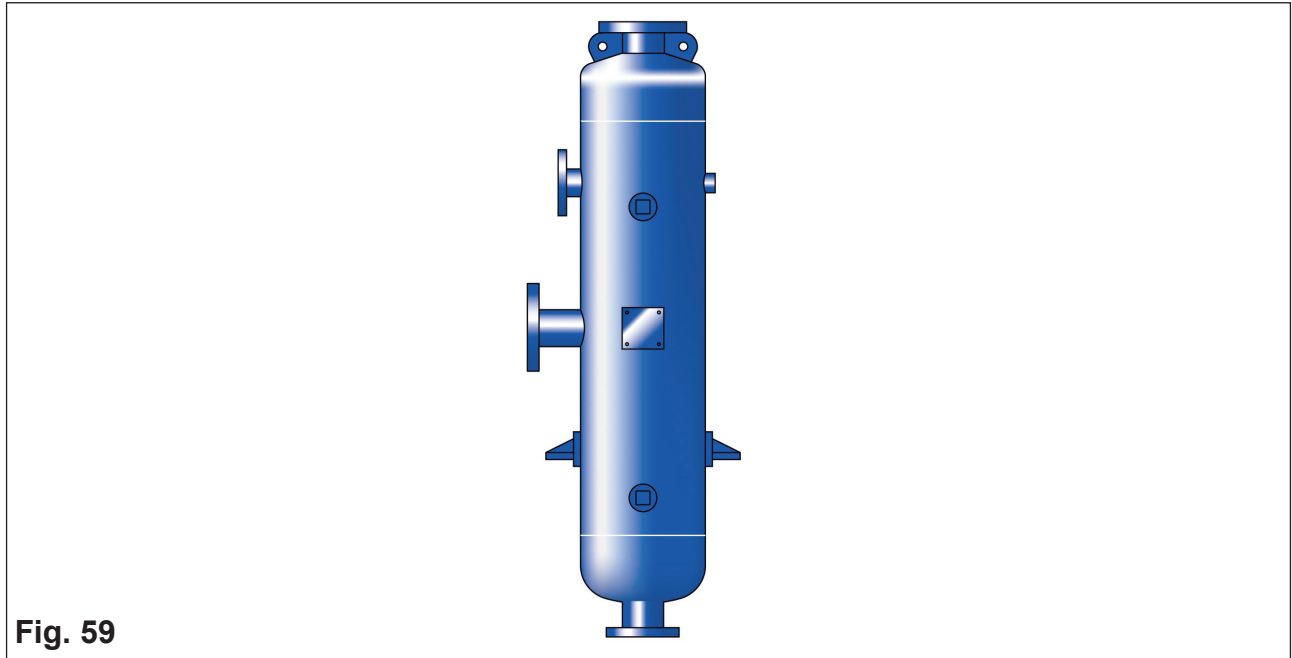


Fig. 59

### 4.13.2 Un purgeur de vapeur pour purger le vase

Pour cette application, un purgeur de vapeur à flotteur fermé est idéal car il évacue l'eau de déconcentration dès qu'elle atteint le purgeur.

Il faut se souvenir que le vase de revaporisation fonctionne à basse pression, il y a donc peu ou pas d'énergie pour refouler le condensat qui doit être purgé par gravité en aval du purgeur.

Du fait de cette basse pression, le purgeur doit être de grande taille. Cela a l'avantage qu'il ne se bloquera pas du fait des effluents de déconcentration. Quelquefois, il vaut mieux installer des filtres en amont du purgeur. Dans cette application, le couvercle du filtre doit être équipé d'une vanne de déconcentration pour simplifier l'entretien.

### 4.13.3 Un casse-vide

Il existe des cas où la chaudière n'a pas besoin de déconcentration. La vapeur qui se trouve dans le vase de revaporisation et dans les tuyauteries se condense et un vide se forme. Si le vide n'est pas éliminé, l'eau de la bêche alimentaire sera aspirée dans les tuyauteries. Lors de la nouvelle déconcentration de la chaudière, l'eau sera poussée de force dans les tuyauteries à une vitesse élevée, ce qui provoquera des coups de bélier.

La possibilité de siphonner l'eau de la bêche alimentaire existe aussi ; lorsqu'un vide se forme dans les tuyauteries et dans le vase, il peut y avoir assez de force pour aspirer l'eau et ainsi l'évacuer via un purgeur.

### 4.13.4 Un distributeur

Pour distribuer correctement la vapeur dans l'eau.

## 4.14 Récupération de chaleur provenant des échangeurs de chaleur

### 4.14.1 Refroidissement de l'eau de déconcentration résiduelle

Il est possible de récupérer près de 49% de l'énergie de la déconcentration de chaudière en utilisant un vase de revaporisation et ses accessoires nécessaires. Il y a donc possibilité de récupérer l'énergie de l'eau de déconcentration.

Par exemple, si le vase de revaporisation fonctionne à une pression de 0,5 bar eff, cela signifie que l'eau de déconcentration résiduelle passe dans le purgeur du vase à 112°C. On peut donc récupérer l'énergie utile de l'eau de déconcentration avant qu'elle soit évacuée. Pour ce faire, il faut la passer dans un échangeur de chaleur pour réchauffer l'eau d'appoint avant qu'elle n'entre dans la bêche alimentaire. Cette façon de faire refroidit la déconcentration d'environ 20°C.

Si l'on prend l'exemple précédent, la déconcentration totale est de 1111 kg/h avec 157 kg/h de vaporisation. 954 kg/h d'eau de la déconcentration passe dans l'échangeur de chaleur. L'enthalpie de la vapeur saturée ( $h_f$ ) à 0,5 bar eff est de 468 kJ/kg alors que celle de l'eau à 20°C est de 84 kJ/kg. 384 kJ/kg d'énergie sont disponibles pour réchauffer l'eau d'appoint.

Le schéma ci-dessous présente un montage classique.

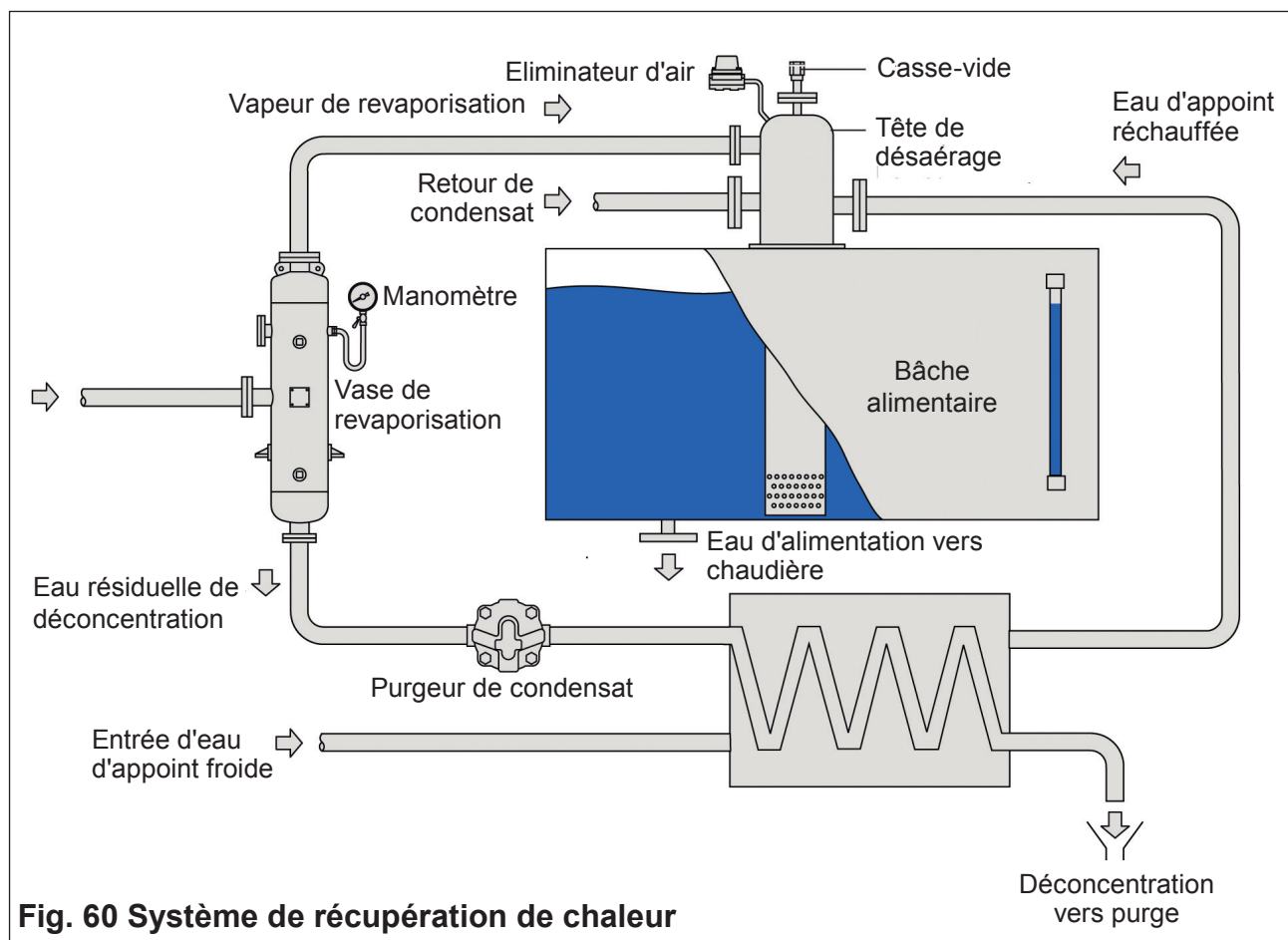


Fig. 60 Système de récupération de chaleur

### 4.14.2 Conception

Une des limites du montage présenté Figure 60 est qu'il suppose que déconcentration de la chaudière et appoint d'eau de la bêche alimentaire se produisent au même moment.

Le montage présenté Figure 61 est plus intéressant, le réservoir de stockage d'eau traitée est utilisé comme puits thermique. On utilise un thermostat pour réguler une petite pompe de circulation, et lorsque l'eau de déconcentration résiduelle passe à travers l'échangeur, l'eau du réservoir est envoyée dans l'échangeur de chaleur, ce qui fait augmenter la température moyenne de l'eau stockée et permet d'économiser de l'énergie.

On a déjà vu qu'il est possible de récupérer 384 kJ/kg supplémentaire d'énergie et en considérant le débit d'eau de déconcentration résiduelle de 954 kg/h, le débit d'énergie s'exprime en kW.

$$\text{Puissance} = \frac{954 \text{ kg/h}}{3\,600 \text{ kg/h}} \times 384 \text{ kJ/kg} = 102 \text{ kW}$$

A ceci, on ajoute les 117 kW récupérés sur la vapeur de revaporisation. Lorsqu'on a pris en compte toutes ces récupérations, 91% de l'énergie totale de la déconcentration ont été récupérés, c'est à dire 219 kW sur un total de 241 kW.

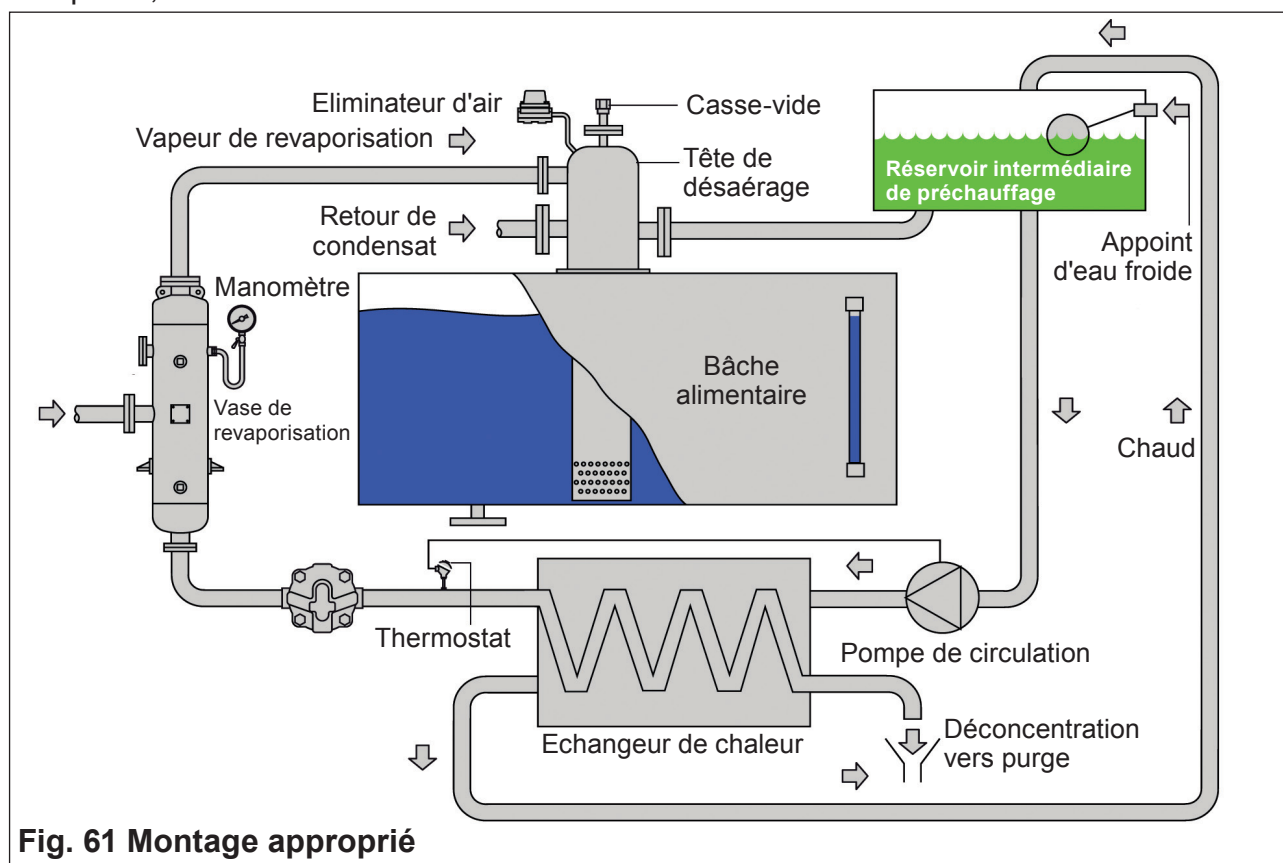


Fig. 61 Montage approprié

### 4.14.3 Echangeur de chaleur approprié

Pour cette application, les échangeurs de chaleur à plaques sont appropriés. Ils sont très compacts et leur entretien est facile.

L'expérience montre que des vitesses élevées et des turbulences dans les échangeurs de chaleur à plaques aident à les maintenir propres. Il faut donc rarement les démonter. Toutefois, si un nettoyage est nécessaire, il est relativement facile d'ouvrir l'échangeur et de nettoyer les plaques.

Pour nettoyer un échangeur de chaleur tubulaire, il faut le démonter entièrement et le plus souvent, les tubes ne peuvent être ôtés pour les nettoyer.

## 4.15 Extraction de fond de chaudière

### 4.15.1 Solides en suspension

Les solides peuvent être gardés en suspension aussi longtemps que l'eau de chaudière est en mouvement, mais dès que les turbulences s'arrêtent, ils se précipitent et tombent dans la partie inférieure de la chaudière. S'ils ne sont pas évacués, ils s'accumulent et empêchent le transfert de chaleur du tube-foyer de la chaudière qui, à son tour surchauffe et peut être abîmé. Les experts recommandent d'évacuer cette boue en la purgeant brusquement et rapidement avec une vanne relativement grande à la base de la chaudière. L'objectif est de permettre la décantation régulière de la boue entre chaque extraction, de cette façon elle sera évacuée aux purges suivantes.

Pour cette raison une purge de trois secondes par heure est beaucoup plus efficace que des purges de douze secondes en une heure, puis plus rien pour la journée.

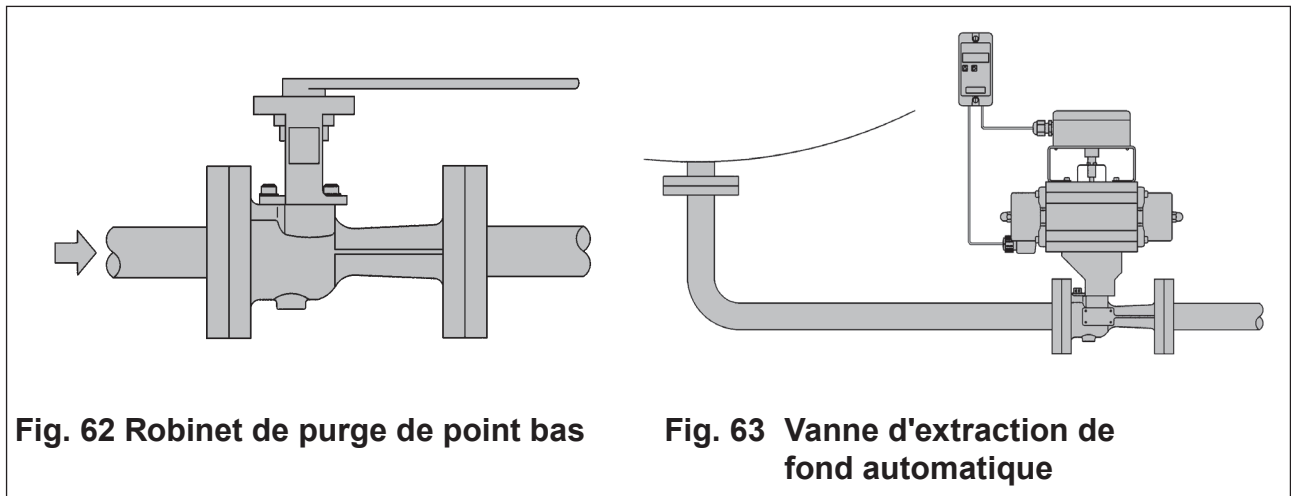


Fig. 62 Robinet de purge de point bas

Fig. 63 Vanne d'extraction de fond automatique

## 4.16 Extraction de fond automatique associée à un séquenceur

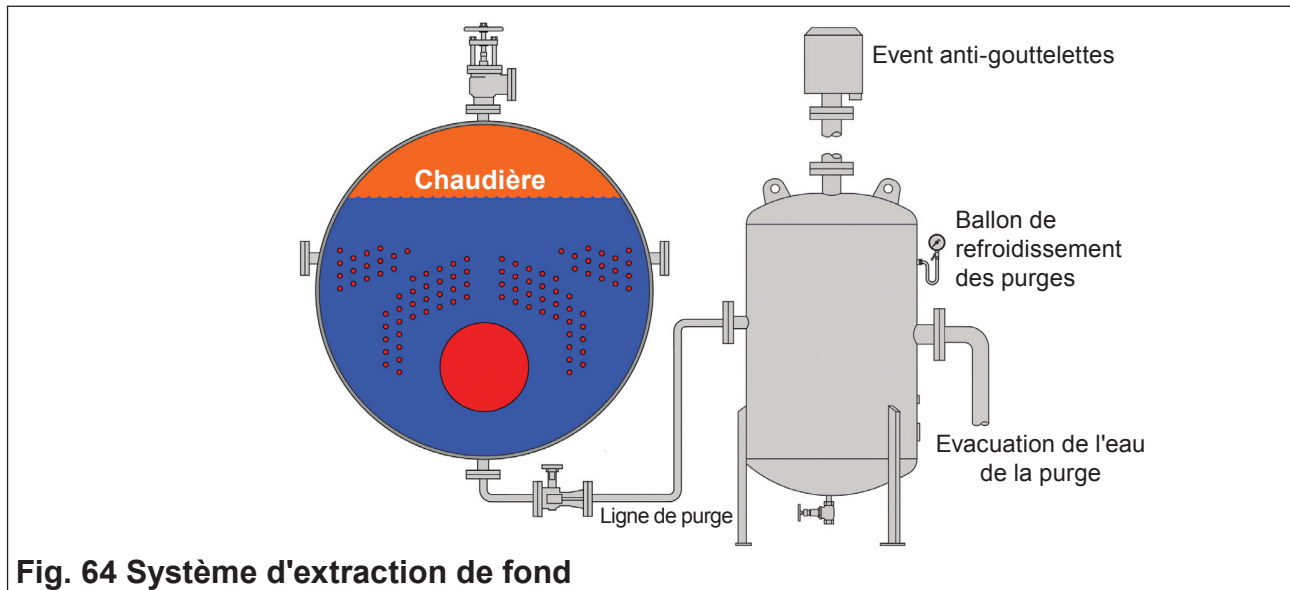
Il est maintenant possible d'automatiser le robinet d'extraction en utilisant un minuteur de marque déposée associé à un robinet à fonctionnement pneumatique (Figure 63).

Le minuteur doit ouvrir la vanne à un moment spécifique et la maintenir ouverte pendant quelques secondes.

L'utilisation d'une purge de point bas automatique assure une action régulière importante et laisse les autres fonctions à la chaudière.

Avec des installations multiples à chaudières, il est nécessaire d'enclencher les vannes d'extraction de fond de manière à ce qu'à un moment donné une seule chaudière soit ouverte - ou cela provoquerait une surcharge du ballon de purge, etc. Il suffit simplement d'espacer les temps de réglage des minuteurs individuels.

## 4.17 Ballon de récupération des purges



### 4.17.1 Pression et température de service

La pression du ballon de purge est à l'atmosphère ou  $< 0,5$  bar et de la pression maximale de service de la chaudière. La température de service doit être égale à  $105^{\circ}\text{C}$  maximum et n'est donc pas un appareil à pression.

### 4.17.2 Taille

Elle dépend de la pression de la chaudière et de la taille de la ligne de purge, mais l'évent doit être assez grand pour que la pression à l'intérieur du ballon n'excède pas  $0,5$  bar eff., et la température du trop-plein d'eau ne doit pas dépasser  $30^{\circ}\text{C}$ .

### 4.17.3 Fonctionnement

Le ballon doit fonctionner avec une quantité d'eau stagnante, et la quantité d'eau doit être au moins le double de la quantité d'eau purgée. L'eau stagnante doit occuper environ la moitié du volume du ballon et le reste doit être libre.

### 4.17.4 Mise à l'atmosphère

L'évent doit assurer que la vapeur de revaporisation est mise à l'atmosphère en toute sécurité et qu'il n'y a pas d'entraînement significatif d'eau à la sortie de la tuyauterie. La mise à l'atmosphère doit être aussi droite que possible et idéalement terminée par un évent anti-gouttelettes.

### 4.17.5 Prise pour installer un manomètre

Le ballon doit être équipé d'une prise pour installer un manomètre, bien qu'aucune mention ne soit faite sur la nécessité d'en installer un.

### 4.17.6 Système de refroidissement

Lorsque la température des rejets peut dépasser la limite acceptable, il est nécessaire d'installer un système de refroidissement sur le ballon. Pour cette application, une vanne de régulation autonome est idéale. Si la température excède la température de réglage, la vanne s'ouvre et permet l'arrivée d'eau froide dans le ballon. Généralement, les ballons de récupération ont des entrées tangentielles. Il vaut mieux installer la ligne de purge radialement, ce qui améliore la structure du ballon, et à l'extrémité installer un diffuseur à l'intérieur. Ce montage réduit également les possibilités d'érosion qui se produisent généralement dans une entrée tangentielle.

# Chapitre 5

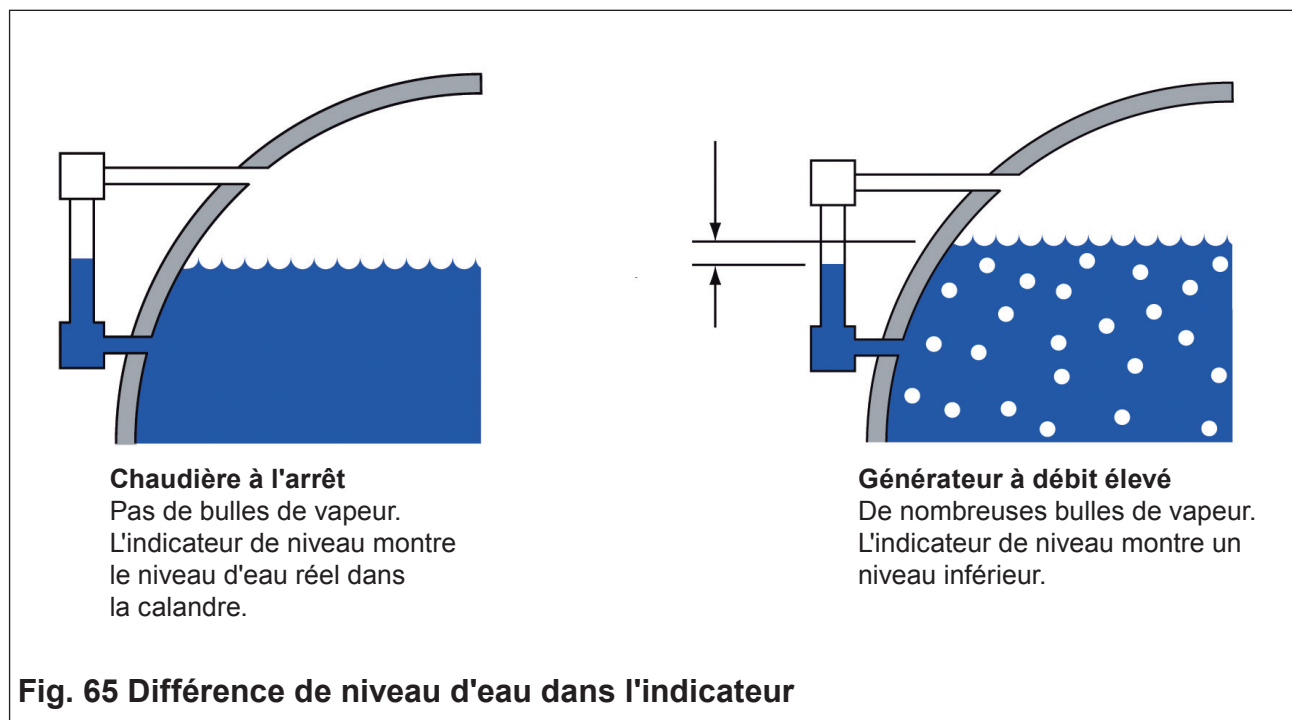
## Régulations de niveau d'eau et alarmes pour générateurs de vapeur

### 5.1 Niveaux d'eau de chaudière

Il n'est pas possible de définir le niveau d'eau exact dans un générateur de vapeur parce que la surface d'eau est une masse mouvante de bulles ayant une circulation horizontale très forte. Il existe donc des variations de niveaux dans la calandre. A l'inverse, l'indicateur de niveau contient de l'eau qui :

- n'est sujette ni aux courants ni à l'agitation.
- ne contient pas de bulles.
- est refroidie.

Cela signifie que l'eau dans l'indicateur (et dans les autres appareils externes) est plus calme que l'eau dans le générateur. Cela signifie aussi que l'indicateur montre un niveau plus bas que le niveau moyen d'eau dans la calandre.



A haut débit de vapeur, la différence entre le niveau indiqué par l'indicateur et celui dans la calandre, dépend de facteurs tels que :

- le débit de production du générateur.
- la hauteur du raccordement de l'indicateur dans la chaudière.
- les conditions chimiques existant dans la chaudière.
- la taille de la calandre.

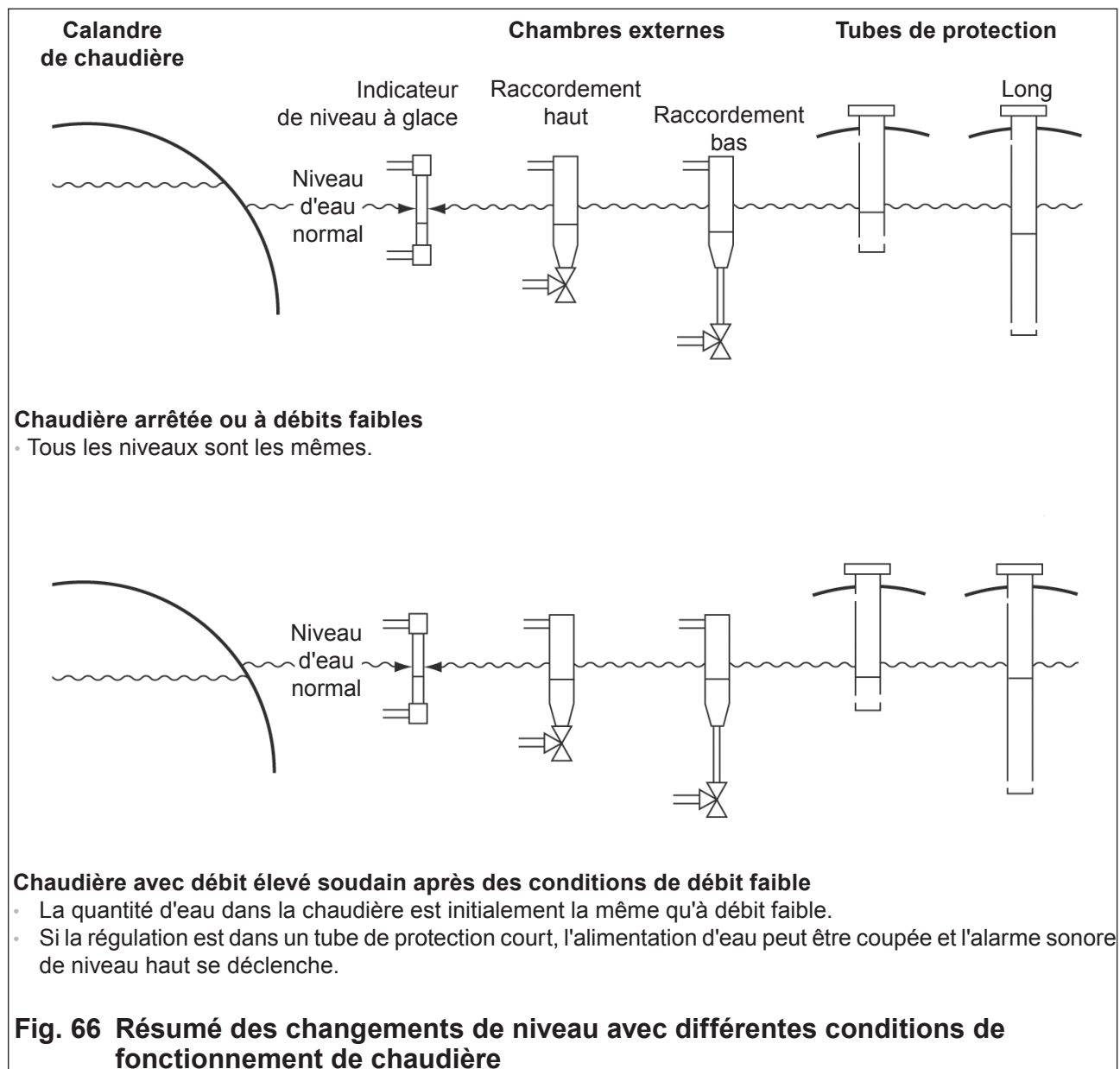
### 5.1.1 Changements de niveaux dûs à la circulation dans la chaudière

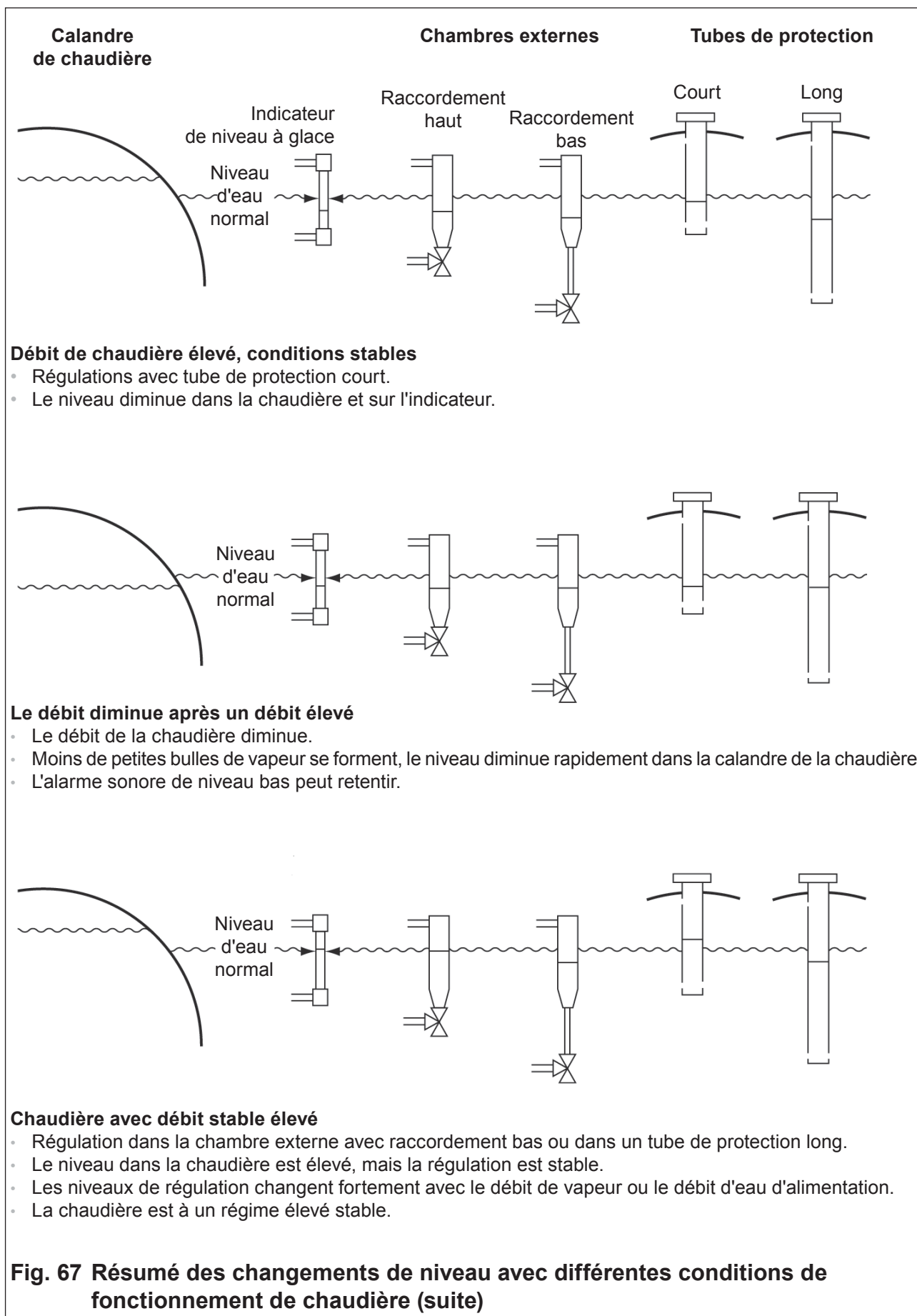
Avec un générateur fonctionnant à plein régime, la circulation très forte de l'eau provoque des variations de niveau. On considère le plus souvent que ces courants ont généralement lieu à l'avant et à l'arrière de la chaudière, et vers le haut le long de la ligne centrale au-dessus du foyer.

La circulation d'eau vers le bas s'effectuera donc sur les côtés dans la section centrale de la chaudière. Elle peut avoir aussi un effet d'entraînement par rapport au raccordement de départ de la vapeur qui tend localement à faire monter l'eau.

Lorsqu'il y a des changements soudains de débit, des vagues peuvent se développer dans la chaudière, vagues que l'on peut facilement voir sur l'indicateur, mais qui seront ignorées par les régulations du niveau d'eau.

Un résumé concernant les changements de niveau dûs à des conditions de chaudières diverses est présenté sur les deux pages suivantes (Figure 66).





## 5.2 Régulations de niveau pour générateurs de vapeur

Pour un générateur de vapeur où la vapeur a un mouvement ascensionnel, il y a trois types différents de régulations de niveau :

### 5.2.1 Régulation de niveau

Assure que la bonne quantité d'eau est ajoutée à la chaudière au bon moment.

### 5.2.2 Alarme de niveau bas

Pour un fonctionnement sans danger, l'alarme de niveau bas assure que la combustion de fuel s'arrête si le niveau d'eau chute dans la chaudière ou s'il chute en dessous du niveau prédéterminé. Avec des générateurs de vapeur régulés automatiquement, les standards préconisent plusieurs alarmes de niveau bas indépendantes, pour plus de sécurité.

### 5.2.3 Alarme de niveau haut

L'alarme prévient l'engorgement en eau du réseau de vapeur et stoppe le débit d'eau d'alimentation dans la chaudière, lorsque le niveau dépasse un point déterminé.

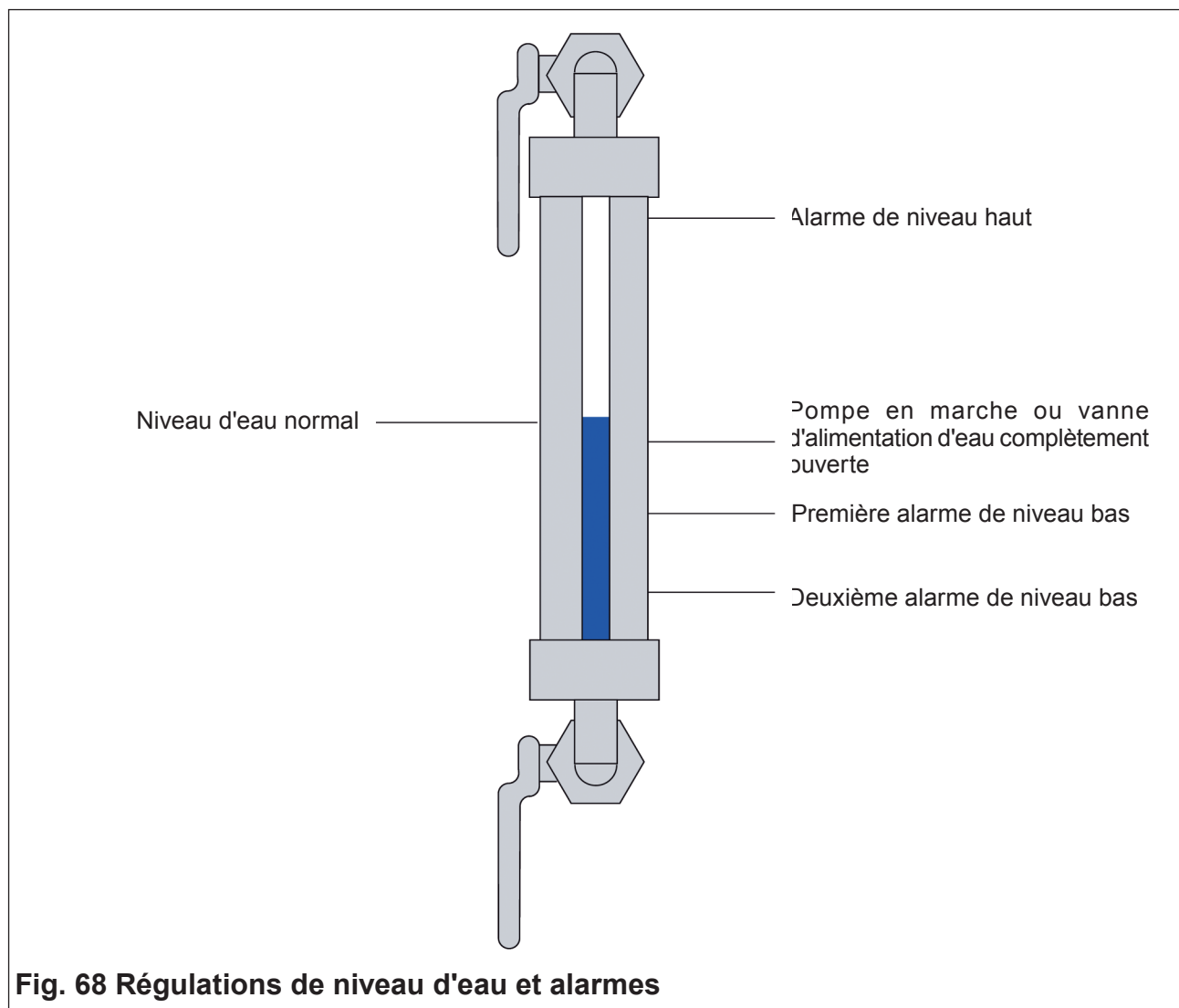


Fig. 68 Régulations de niveau d'eau et alarmes

## 5.3 Méthodes de détection automatique du niveau

### 5.3.1 Régulations de niveau à sonde

Les paragraphes suivants débattent du type de détection automatique de niveau approprié aux générateurs de vapeur.

L'électricité se comporte comme un liquide. Le liquide s'écoule dans une tuyauterie de la même manière que l'électricité passe dans un conducteur. Un conducteur est un matériau qui permet la libre circulation du courant électrique, par exemple un fil électrique. L'opposé d'un conducteur est un isolant qui résiste au débit électrique, par exemple le verre ou le plastique.

Un courant électrique est un débit de 'charge' électrique transporté par des particules minuscules appelées électrons ou ions. La charge est mesurée en Coulombs.  $6 \times 10^{18}$  électrons (six millions de millions de millions) ensemble ont une charge de 1 Coulomb. Lorsque les électrons ou les ions se déplacent, le débit électrique est mesuré en Coulomb par seconde plutôt qu'en électron ou ion par seconde. Toutefois, le courant électrique se mesure en 'ampère' (A).

- 1 A indique un débit d'environ  $10^{18}$  électrons par seconde.
- 1 A = 1 Coulomb par seconde.

La force qui provoque le débit du courant est appelée la force électromotrice. Elle peut être produite par exemple par une batterie, une dynamo de bicyclette ou par un générateur de centrale électrique.

La batterie a deux pôles : un positif et un négatif. Si on connecte un fil entre ces pôles, un courant passe. La batterie agit comme une source de pression similaire à une pompe dans un réseau d'eau. Le différentiel de potentiel entre les pôles d'une source électromotrice se mesure en Volts. Plus la tension (pression) est élevée, plus le courant est élevé (débit). Le circuit dans lequel le courant passe présente une résistance (similaire à la résistance que présentent les tuyauteries et les vannes dans le réseau d'eau). L'unité de résistance est l'Ohm, dont le symbole est  $\Omega$  et la loi d'Ohm relie courant, intensité et résistance.

L'analogie avec un réseau d'eau est présentée sur la Figure 69, ci-dessous.

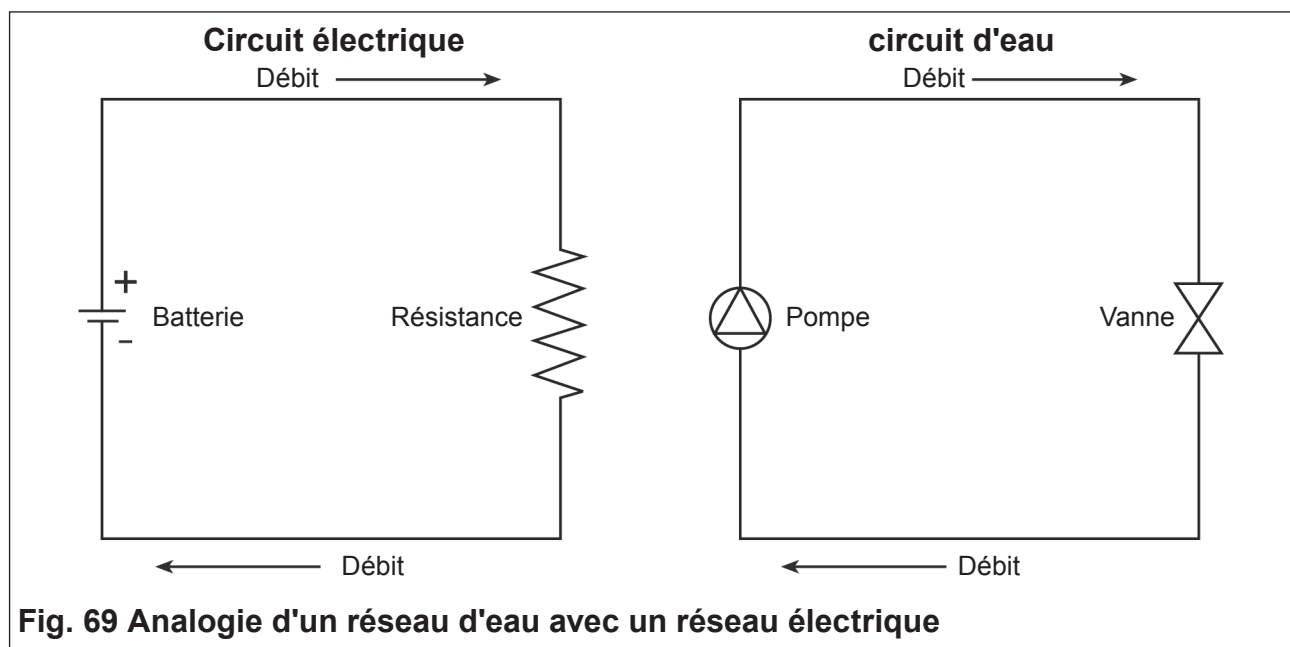


Fig. 69 Analogie d'un réseau d'eau avec un réseau électrique

Pression de pompe (hauteur en mètres) - Tension électromotrice (Volts)  
 Débit dans les tuyauteries (l/s) - Courant (Ampères)  
 Restriction due à la vanne - Résistance (Ohm)

$$\text{Courant (Ampères)} = \frac{\text{Tension dans le circuit}}{\text{Résistance du circuit}}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

A partir de cette équation :

$$\text{Volts} = \text{Ampères} \times \text{Ohms}$$

$$U = I \times R$$

$$\text{Résistance (Ohms)} = \frac{\text{Volts}}{\text{Ampères}}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

La 'capacitance' est un autre concept essentiel. Elle mesure la taille d'un conducteur (à peu près analogue au volume d'un container) à l'aide de la charge requise pour augmenter son potentiel d'une unité c'est à dire un Volt. Un conducteur a une grande capacitance s'il a besoin d'une grande charge pour l'augmenter d'un Volt, exactement comme un grand réservoir a besoin d'une grande quantité de gaz pour le remplir jusqu'à une certaine pression. L'unité de la capacitance est un Coulomb par Volt, c'est à dire un Farad.

Pour résumer, nous allons faire une comparaison avec l'électricité et les termes de pression et de débit.

Tension = Pression

Courant = Débit

Capacitance = Volume du container pressurisé par un milieu compressible comme l'air.

### 5.3.2 Sondes de conductivité

Considérons un réservoir ouvert rempli d'une certaine quantité d'eau. Une tige métallique est suspendue dans le réservoir (Figure 70, ci-dessous). Si on y applique une alimentation électrique et si on y ajoute un compteur, ce dernier va montrer que :

- Le courant passe à travers la sonde (ou la tige métallique) immergée.
- Si la tige métallique (sonde) est ôtée de l'eau, le courant ne passe plus.

C'est le principe de base de la sonde de conductivité. Le principe de conductivité est utilisé pour donner un point de mesure. Lorsque le niveau d'eau touche l'extrémité de la sonde, il provoque une action par l'intermédiaire du régulateur qui est associé.

Cette action peut :

- Démarrer une pompe.
- Stopper une pompe.
- Ouvrir une vanne.
- Fermer une vanne.
- Faire sonner une alarme.
- Ouvrir ou fermer un relais.

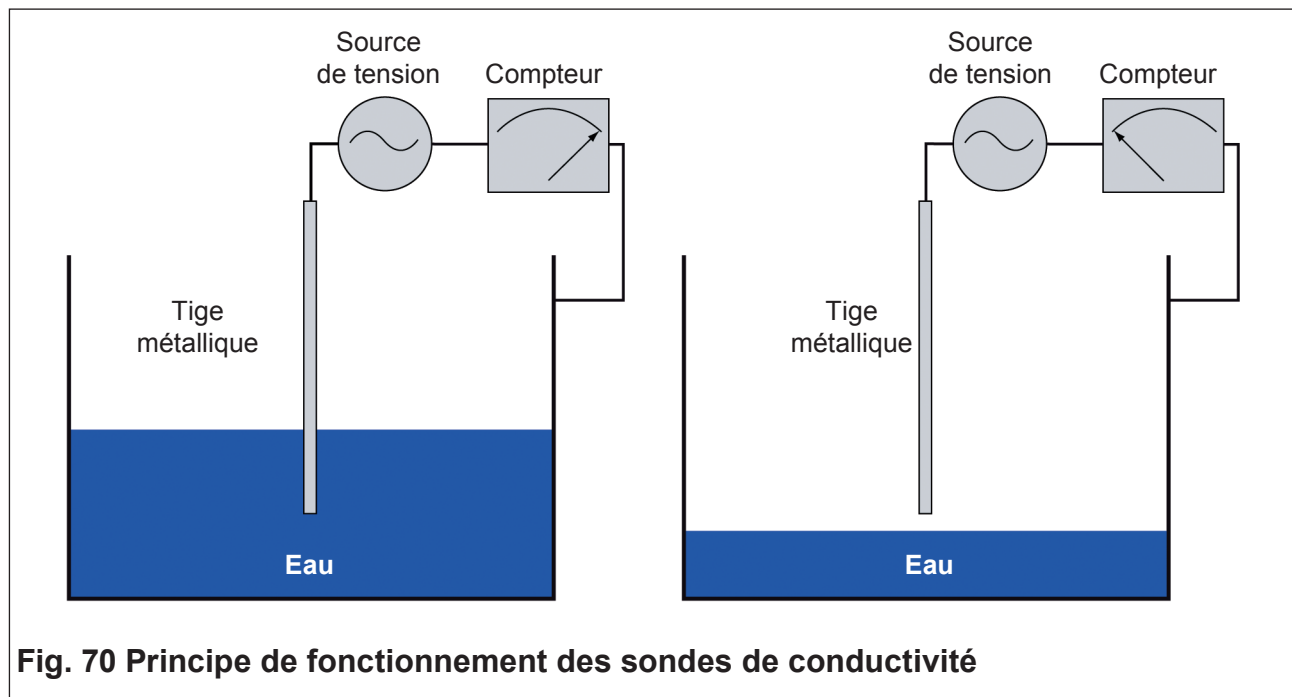
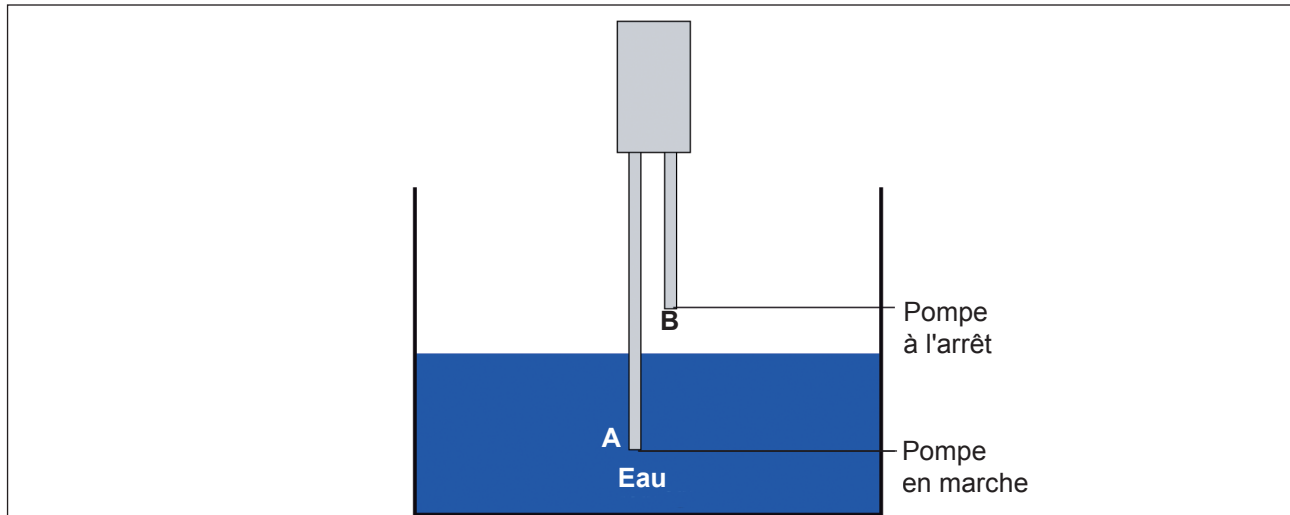
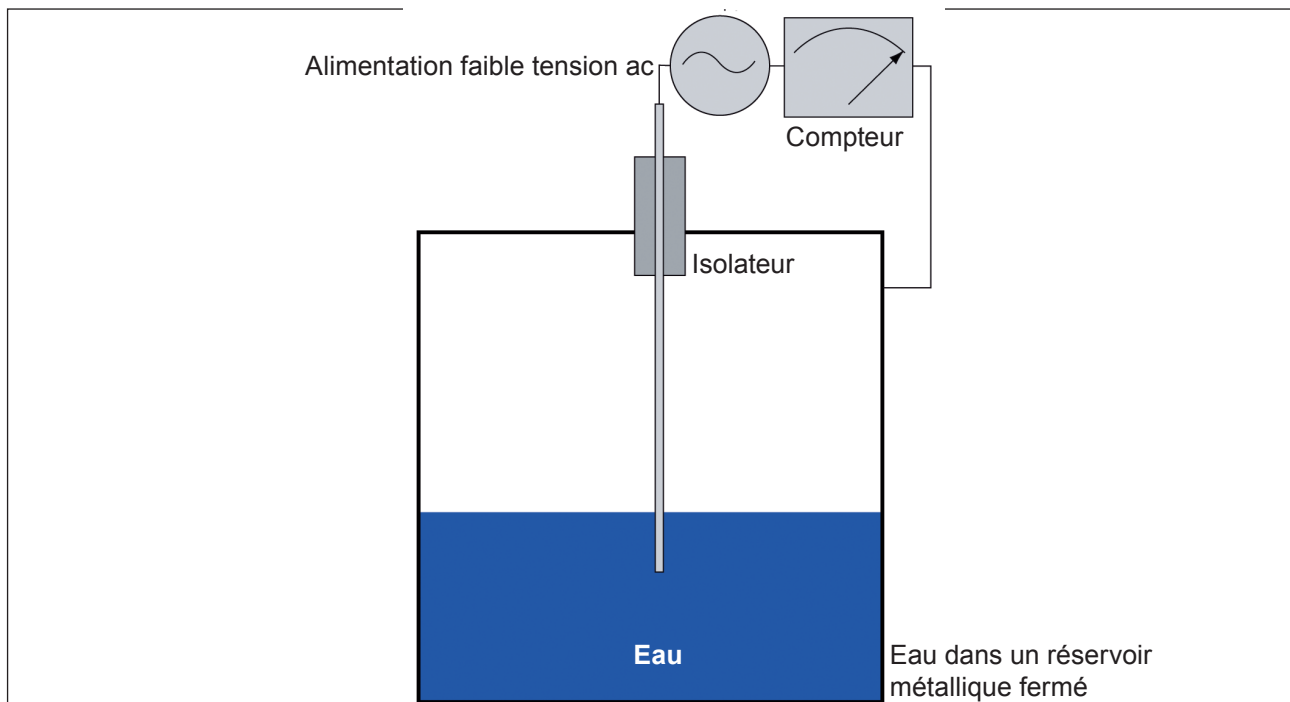


Fig. 70 Principe de fonctionnement des sondes de conductivité



**Fig. 71 Sondes de conductivité montées pour déclencher une pompe tout ou rien**

Une simple extrémité peut donner une simple action ou un point d'action. Ainsi, deux extrémités sont nécessaires avec une sonde de conductivité pour déclencher une pompe tout ou rien à des niveaux prédéterminés (Figure 71). Lorsque le niveau d'eau diminue et expose l'extrémité au point **A**, la pompe se met en action. Le niveau d'eau monte jusqu'à toucher la seconde extrémité au point **B**, et la pompe s'arrête.



**Fig. 72 Sonde de conductivité dans un réservoir fermé**

Les sondes doivent être installées dans des réservoirs fermés (par exemple des chaudières) (Figure 72). Il faut un isolateur là où la tige métallique passe au travers du sommet du réservoir. Aussi :

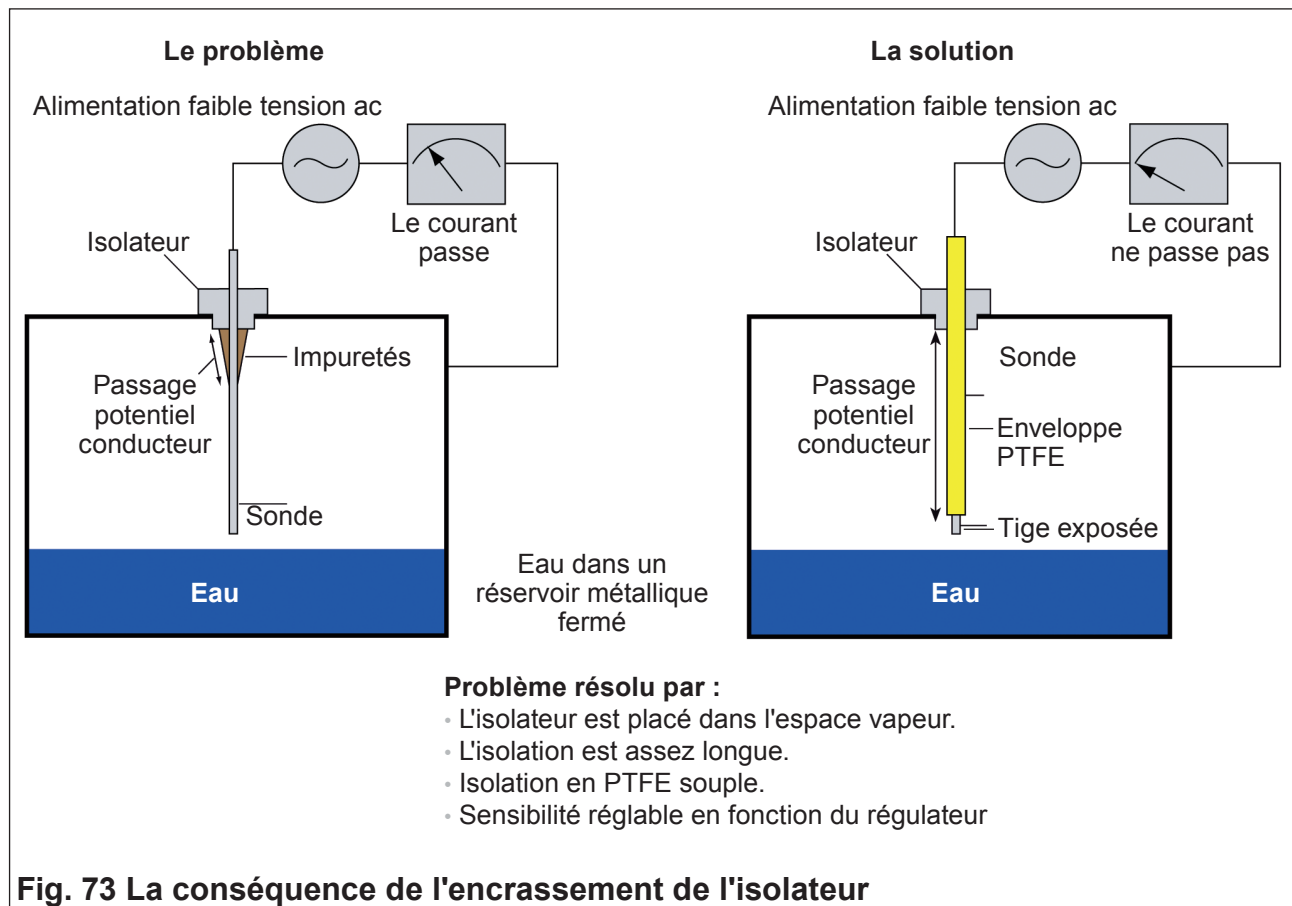
- Le courant passe lorsque la tige est immergée.
- Le courant cesse dès que la tige est au-dessus du plan d'eau.

**Note** : un courant alternatif est utilisé pour éviter la polarisation et l'électrolyse (la séparation de l'eau en hydrogène et oxygène) au niveau de la sonde.

Une sonde de conductivité standard est utilisée pour déclencher une alarme de niveau bas dans une chaudière.

Les réglementations britanniques exigent qu'elles soient contrôlées tous les jours.

Une simple sonde peut créer de nombreux problèmes. Si l'isolateur est encrassé, un passage conducteur va se créer et le courant va continuer de passer même si l'extrémité de la sonde se trouve hors de l'eau. Ce problème peut être évité. La sonde doit être équipée d'un long isolateur et construite dans un matériau souple comme le PTFE/téflon. Ces précautions permettent d'éviter l'encrassement de l'isolateur.



Les sondes de conductivité spéciales sont disponibles pour les alarmes de niveau bas. On les appelle des sondes 'autocontrôlées'. Elles intègrent différentes caractéristiques d'autocontrôle, dont :

- Un comparateur d'extrémité qui mesure et compare la résistance.
- La vérification des courants de fuites entre la sonde et l'isolation.
- D'autres routines de tests autonomes.

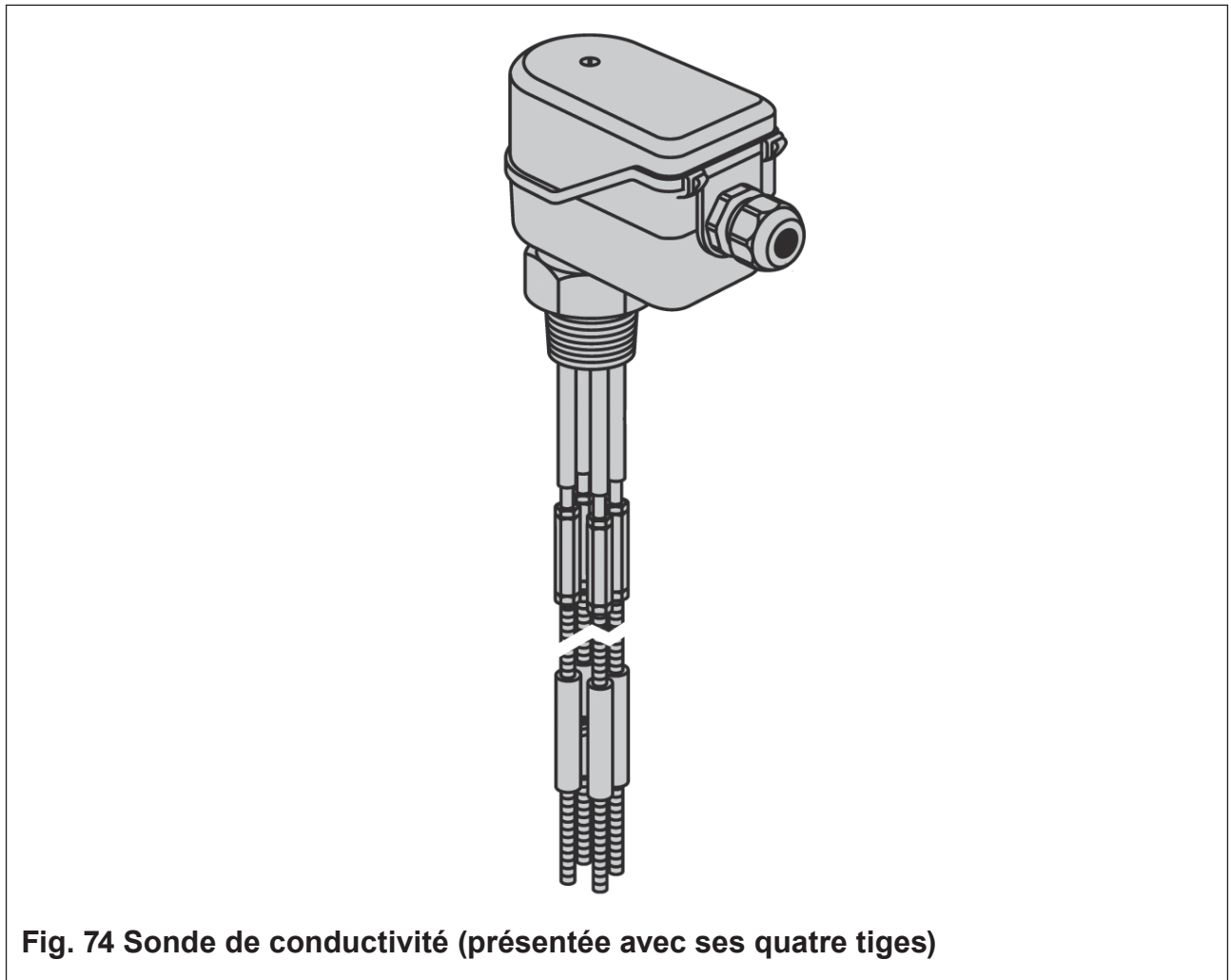
La réglementation française préconise l'utilisation de ces systèmes spéciaux à cause des niveaux très élevés de sécurité inhérents à leur conception. L'extrémité des sondes de conductivité doit être coupée à la bonne longueur afin qu'elle représente précisément le point de contact souhaité.

### 5.3.2.1 Résumé sur les sondes de conductivité

Les sondes de conductivité sont :

- Généralement montées verticalement.
- Raccordées à un régulateur électronique qui détecte si la sonde laisse passer un courant, c'est-à-dire si elle est immergée ou si elle ne laisse pas passer de courant, c'est-à-dire si elle est hors de l'eau ou isolée.
- Souvent fournies assemblées avec trois ou quatre sondes ensemble dans le même corps, bien que d'autres configurations soient possibles.
- Coupées à la longueur sur le site.

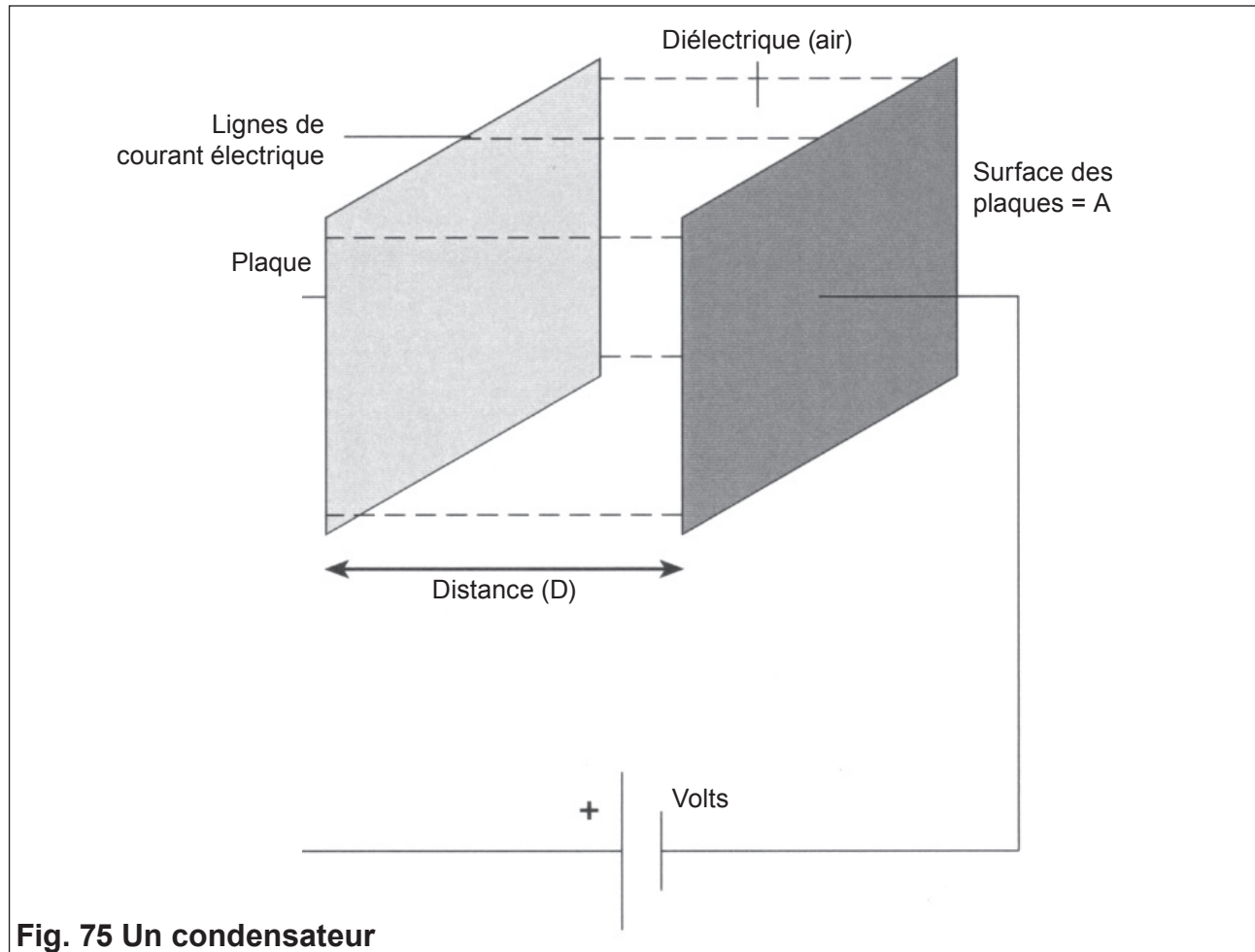
Comme ces sondes utilisent la conductivité de l'électricité pour fonctionner, elles ne conviennent pas pour les cas où l'eau est très pure (conductivité inférieure à  $1\mu$  Siemens/cm).



**Fig. 74 Sonde de conductivité (présentée avec ses quatre tiges)**

### 5.3.3 Sondes capacitives

On peut construire un simple condensateur en insérant un matériau diélectrique (une substance qui a une faible conductivité ou nulle, par exemple l'air), entre deux plaques parallèles d'un matériau conducteur (Figure 75).



**Fig. 75 Un condensateur**

L'équation de base d'un condensateur, comme celui représenté, est :

$$C = K \left( \frac{A}{D} \right)$$

où :

A = Surface de la plaque

C = Capacitance

D = Distance entre les plaques

K = Constante diélectrique (une fonction de la diélectrique)

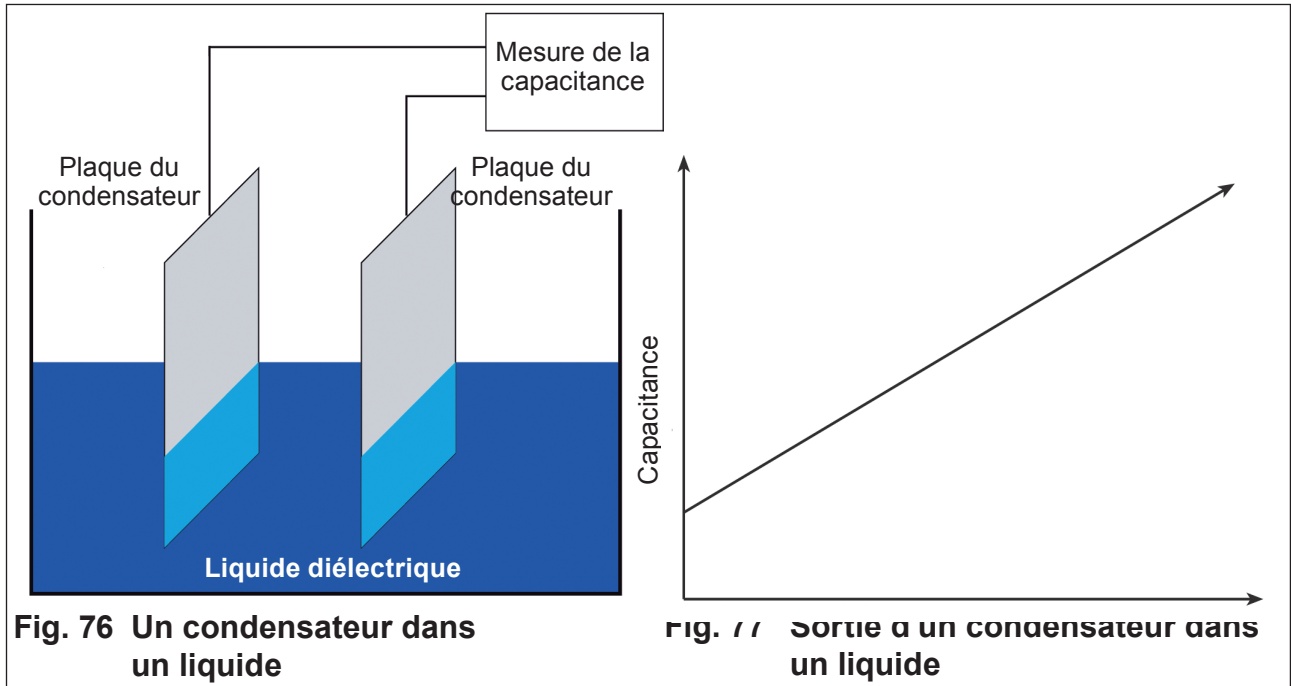
En d'autres termes :

- Plus la surface des plaques est importante, plus la capacitance est élevée.
- Plus les plaques sont proches, plus la capacitance est élevée.
- Plus la constante diélectrique est élevée, plus la capacitance est élevée.

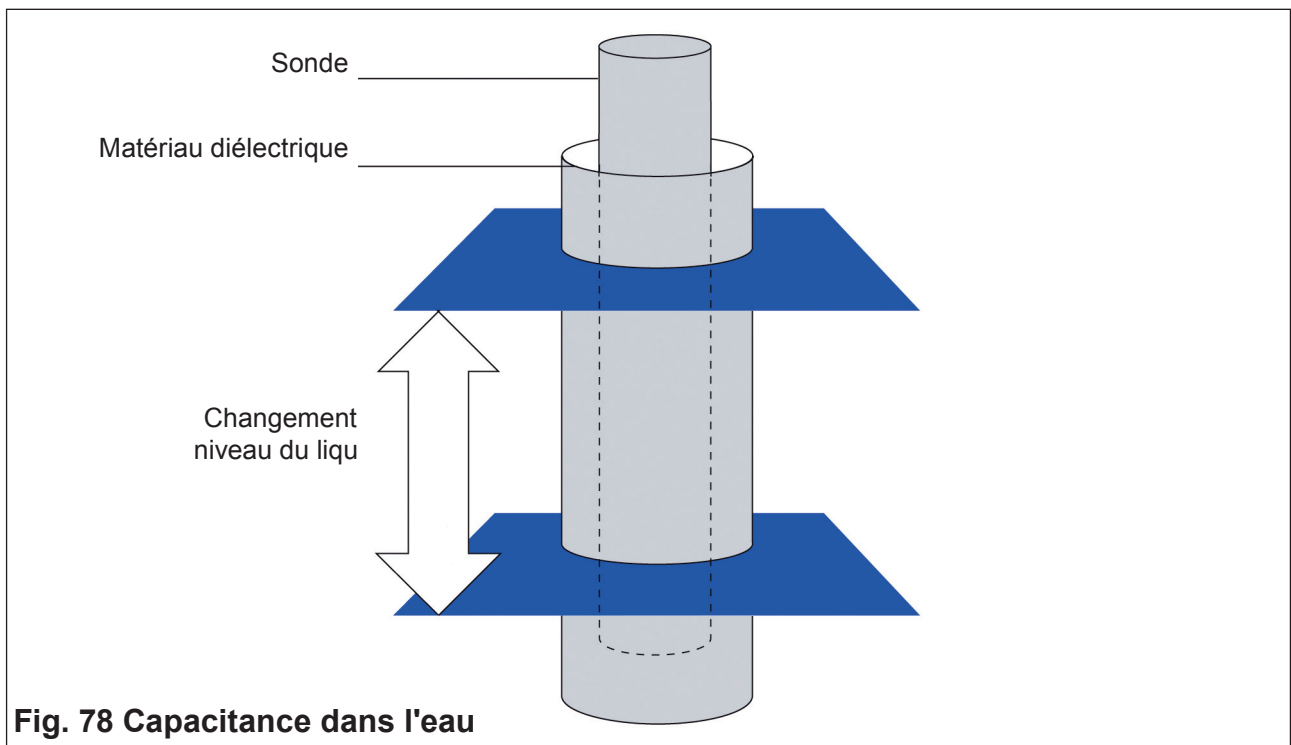
Si A, D ou K sont modifiés, la capacitance change.

On peut construire un condensateur de base en plongeant deux plaques parallèles conductrices dans un liquide diélectrique (Figure 76). Si on mesure la capacitance au fur et à mesure que les plaques sont immergées, on peut voir que la capacitance change en fonction de la profondeur d'immersion des plaques dans le liquide diélectrique.

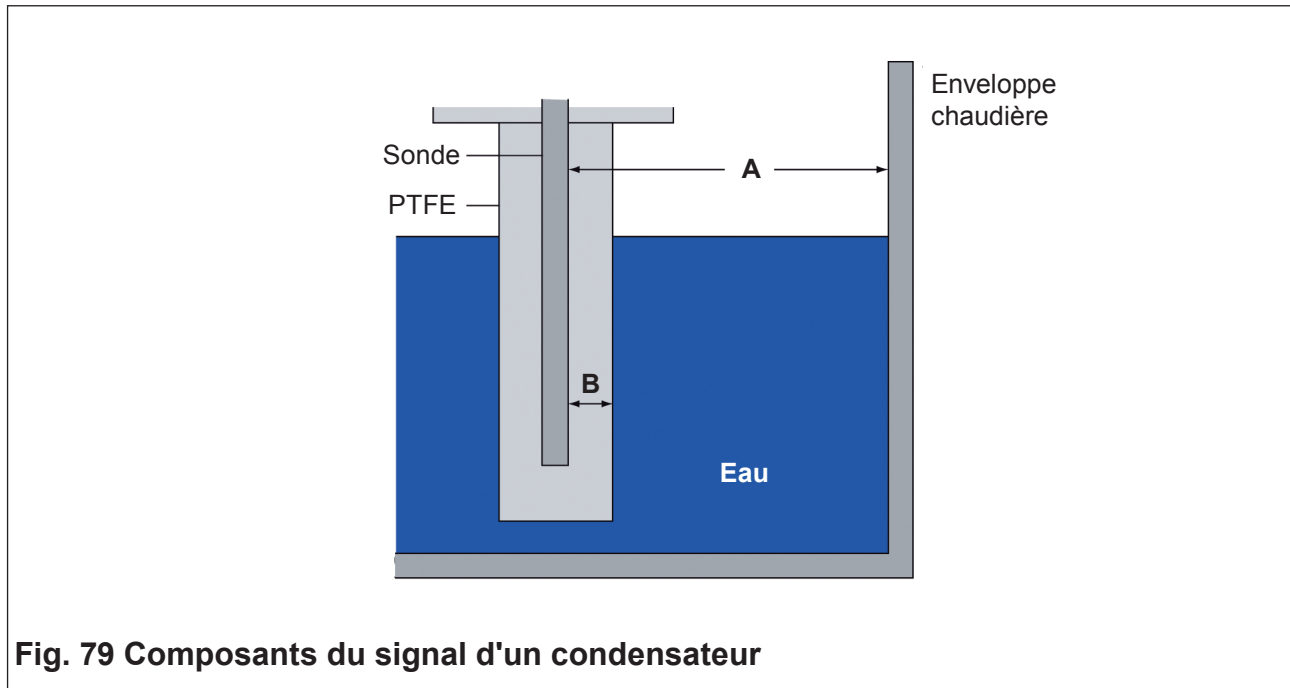
Plus les plaques sont immergées dans le liquide, plus la capacitance augmente (Figure 77).



Un liquide conducteur comme l'eau peut former une électrode, et la sonde, recouverte d'un matériau diélectrique (par exemple le PTFE) peut en former une deuxième. Si on utilise cette configuration, la surface des plaques du condensateur est proportionnelle au niveau du liquide (Figure 78).



La sonde isolée peut être insérée dans un tube de protection (ou dans une chambre externe) d'une chaudière et une tension à haute fréquence lui est appliquée. Le courant passe à cause de la capacitance entre la tige et la paroi du tube de protection.



**Fig. 79 Composants du signal d'un condensateur**

La capacitance entre la sonde et la paroi du tube ou de la chambre a deux composantes :

- **A** au-dessus de la surface liquide.
- **B** en dessous de la surface liquide.

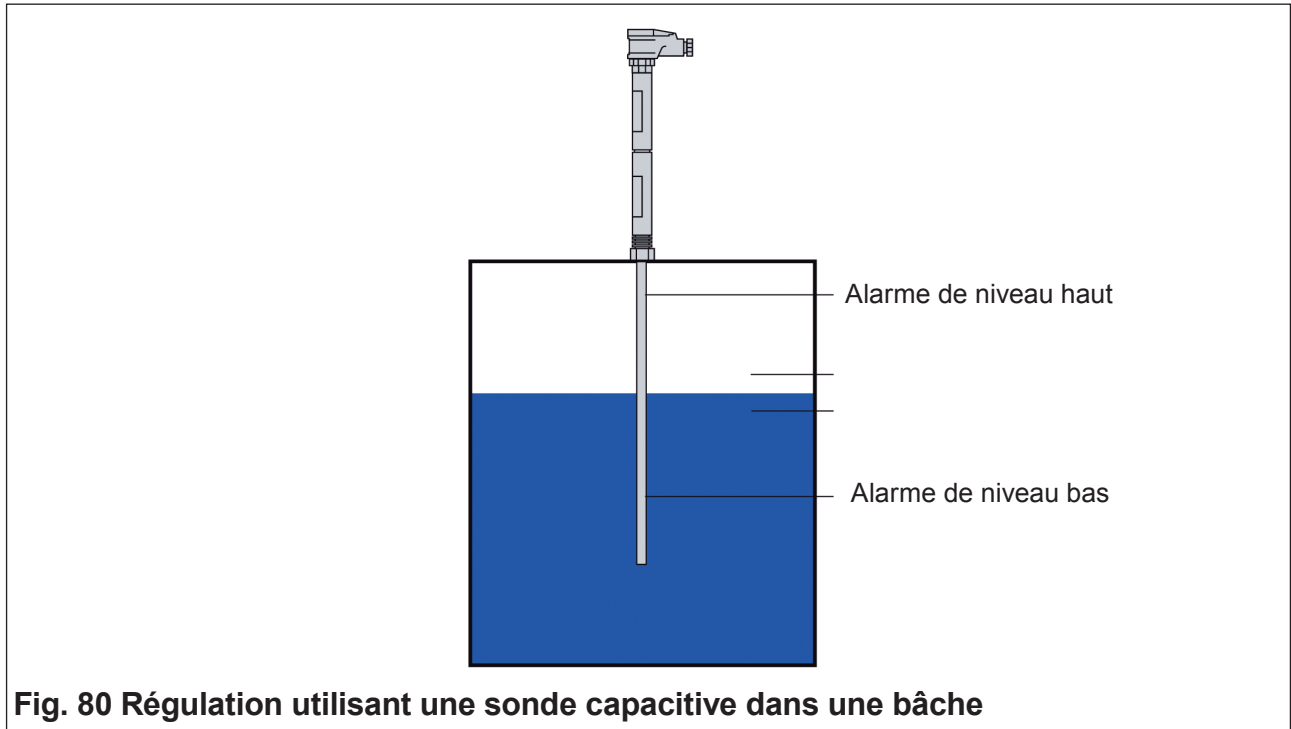
Lorsque le niveau du liquide monte , **A** décroît et **B** augmente en valeur (Figure 79).

Les deux condensateurs (sonde et tube ou chambre de protection) sont effectivement en parallèle et comme l'eau est un conducteur, le diélectrique en dessous de la surface de l'eau est le matériau qui isole la sonde. Comme il est étroit par rapport à la distance de l'air (ou de la vapeur), la dimension **D** (voir Figure 75, page 89) est petite et la capacitance **B** est grande par rapport à **A**. Le résultat net est une augmentation de la capacitance proportionnelle à l'augmentation du niveau.

Toutefois, le changement de capacitance est faible (elle est mesurée en pico Farads c'est à dire  $10^{-12}$  Farads). La sonde est donc utilisée avec un circuit amplificateur. Le changement de capacitance, ainsi modifié, est alors transmis à un régulateur.

Lorsque la sonde est utilisée, par exemple, dans une bache alimentaire (Figure 80), les niveaux du liquide peuvent être continuellement surveillés avec une sonde capacitive. Le régulateur peut être réglé pour moduler une vanne de régulation, et/ou pour donner des fonctions comme une alarme de niveau haut ou de niveau bas.

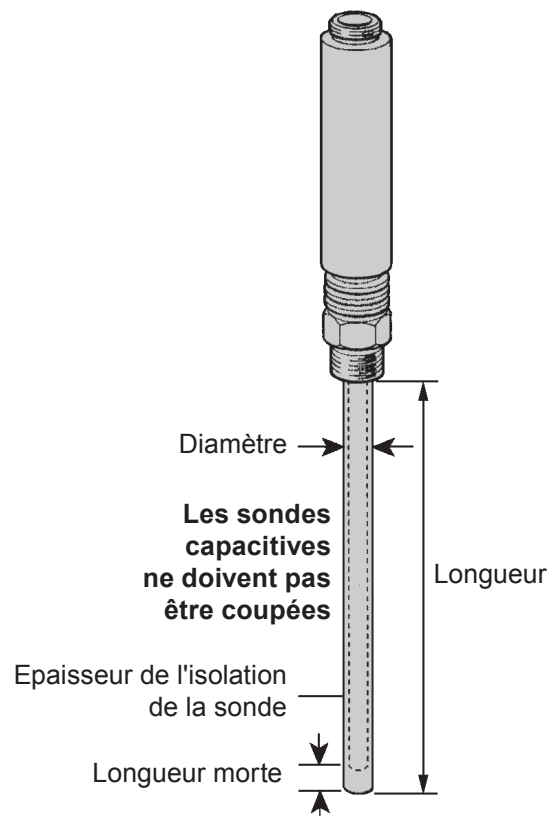
Le régulateur peut aussi être réglé pour fournir une régulation Tout ou Rien. Ici les points de déclenchement 'Tout' et 'Rien' sont contenus dans une sonde unique et sont réglés par le régulateur, sans besoin de couper la sonde. Comme une sonde capacitive doit être complètement insérée dans le matériau isolant, on **ne doit pas** couper à la longueur.



### 5.3.3.1 Résumé sur les sondes capacitatives

Avec une régulation modulante de niveau, il y a trois variables :

1. Le diamètre et la longueur de la sonde.
2. L'épaisseur de l'isolateur de la sonde.
3. La valeur diélectrique de l'isolateur de la sonde.

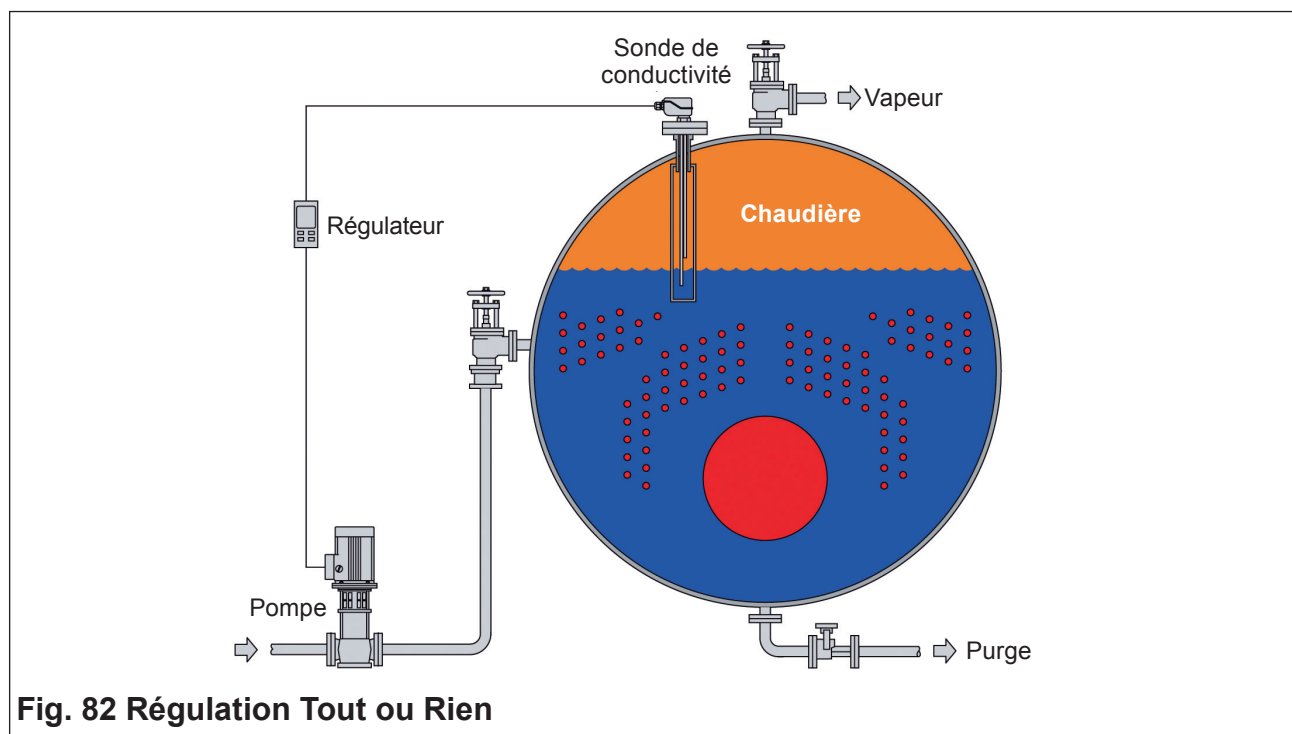


## 5.4 Méthodes de régulation automatique de niveau

### 5.4.1 Régulations Tout ou Rien

Toutes les méthodes de détection de niveau décrites précédemment peuvent être utilisées pour générer un signal Tout ou Rien servant à une régulation de niveau. La méthode la plus courante de régulation de niveau est de démarrer la pompe alimentaire à un niveau bas et de l'arrêter lorsqu'un niveau haut est atteint.

- Avec une régulation à flotteur, on peut utiliser un contact magnétique avec un hystérésis ou une bande neutre.
- Avec des sondes de conductivité, deux sondes sont nécessaires (pompe marche/pompe arrêt) et elles donnent des niveaux de contacts fixes.
- Une sonde capacitive peut aussi être utilisée pour avoir un niveau de contact réglable.



**Fig. 82 Régulation Tout ou Rien**

En Grande Bretagne, les régulations Tout ou Rien sont les plus courantes sur les chaudières de capacités inférieures ou égales à 5 000 kg/h, car elles sont peu coûteuses. En Australie et Nouvelle Zélande les standards précisent que pour les générateurs dépassant 3 MW (par exemple 4 500 kg/h) il est nécessaire d'utiliser une régulation modulante.

On peut discuter, toutefois, sur le fait qu'une régulation Tout ou Rien n'est pas idéale pour une chaudière. En effet, le débit relativement important d'eau froide envoyé dans la chaudière quand la pompe fonctionne réduit brutalement la pression dans la chaudière. Cela conduit aussi le brûleur à changer d'allure continuellement en fonction de la marche de la pompe.

Prenons un exemple classique. Il peut être démontré par le calcul que même avec une eau d'alimentation à 80°C, le débit du brûleur sera peut être de 40% plus élevé quand la pompe fonctionne en comparaison aux périodes où la pompe est à l'arrêt.

Cette variation permanente cause :

- Usure de la régulation du brûleur.
- Variation cyclique de la température dans la chaudière.
- Réduction du rendement..
- Un débit de vapeur, bien connu en dents de scie, de la chaudière.

Si le débit de vapeur est élevé, la variation de débit tendra à augmenter l'entraînement d'eau avec la vapeur. De plus, les niveaux d'eau seront beaucoup plus instables avec le risque de déclenchement des alarmes par manque d'eau, en particulier pour les installations avec plusieurs chaudières. Toutefois, il est évident que les régulations Tout ou Rien sont communément utilisées pour les petites capacités.

#### 5.4.1.1 Résumé sur les régulations Tout ou Rien

Avantages	Inconvénients
Simple	Chaque chaudière nécessite sa propre pompe.
Peu coûteuse.	Plus d'usure de la pompe et du matériel de régulation.
Bonne pour chaudière à l'arrêt.	Pression et débit de vapeur variables.
	Plus d'entraînement d'eau.

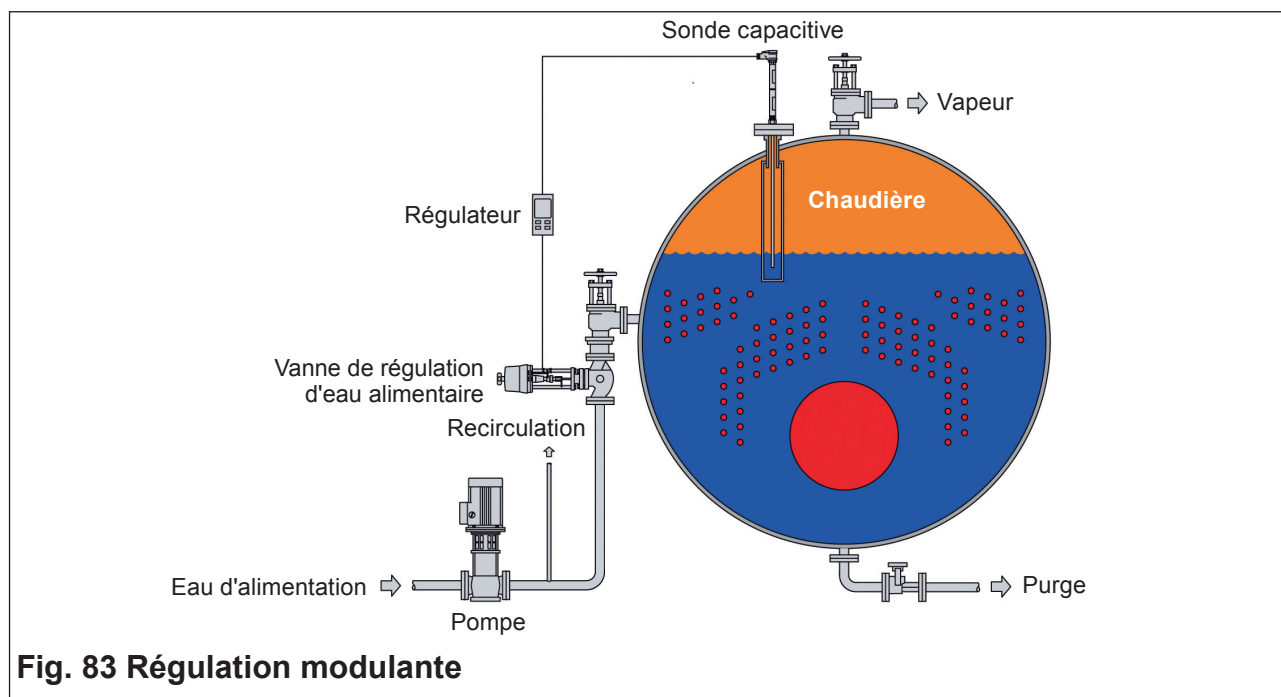
#### 5.4.2 Régulation modulante

Dans ce cas, la pompe d'alimentation d'eau fonctionne en permanence et une vanne de régulation automatique (placée entre la pompe et la chaudière) régule le débit d'eau correspondant à la demande de vapeur.

Lorsque ce système fonctionne correctement, la régulation modulante peut lisser le débit de vapeur et garantir une plus grande stabilité du niveau d'eau dans la chaudière.

Les méthodes suivantes peuvent être utilisées pour les régulations modulantes :

- Régulation à flotteur avec un signal de sortie continu
- Régulation avec sondes capacitives
- Régulation avec capteur de pression différentielle



### 5.4.3 Recirculation

Pour protéger la pompe d'alimentation de toute surchauffe en cas de fermeture de la vanne de régulation, il faut prévoir une recirculation assurant un débit minimum au travers de la pompe.

Cette recirculation peut être contrôlée par une vanne ou par un orifice calibré. Le débit d'eau recirculé n'est pas très important, et il est généralement indiqué par le constructeur de la pompe. A titre d'indication, l'orifice calibré sera couramment de 5 à 7 mm pour une chaudière de taille moyenne.

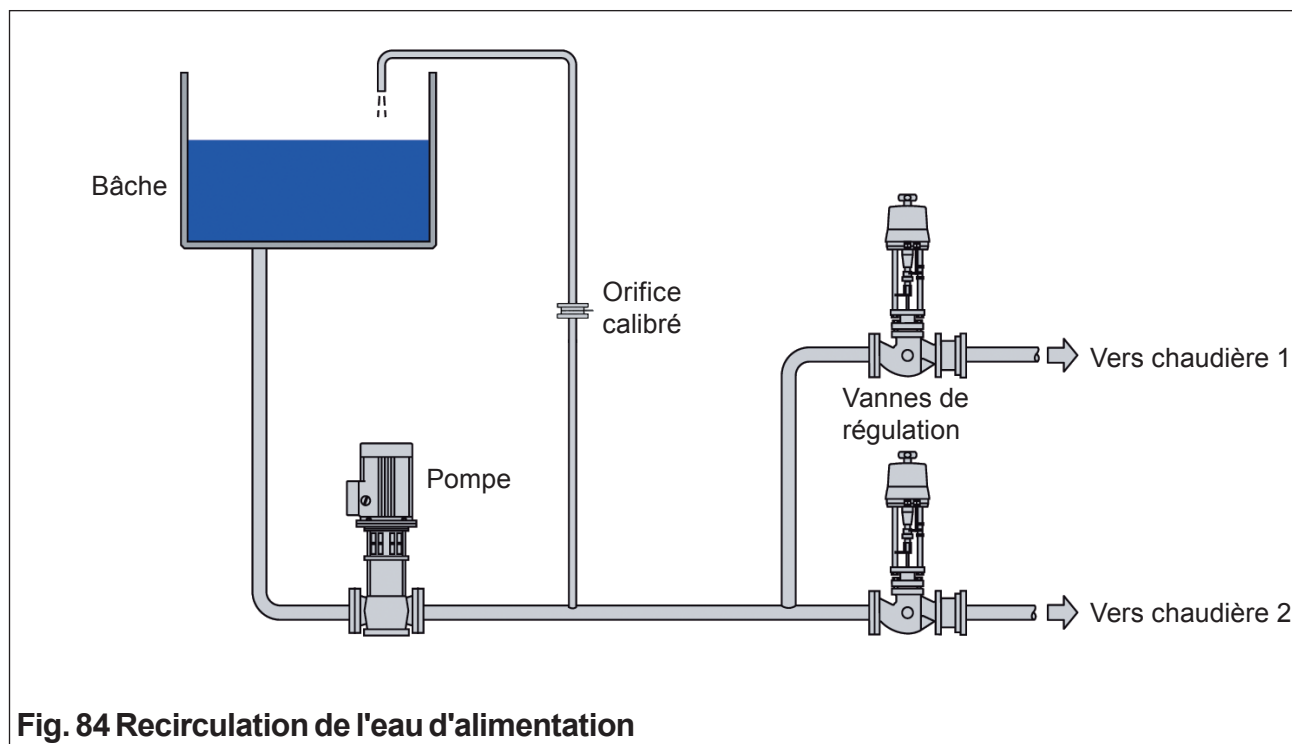


Fig. 84 Recirculation de l'eau d'alimentation

### 5.4.4 Régulation de niveau modulante avec pompe à vitesse variable

Dans ce cas, un signal modulant, représentant le niveau de la chaudière, (par exemple d'une sonde capacitive) est acheminé à un régulateur inverseur de fréquence. Ce régulateur fait varier la fréquence de la tension alternative de la pompe et ainsi il fait varier sa vitesse.

- Si une grande quantité d'eau est nécessaire, la pompe tourne à une vitesse plus élevée.
- S'il faut moins d'eau, la vitesse de la pompe est réduite.

De cette façon, la vitesse de la pompe est modulée pour fournir un débit d'eau en accord avec la demande d'eau correspondante à la demande de vapeur.

Deux méthodes sont utilisées pour faire varier une vitesse :

**Avec recirculation.** Lorsque la demande est satisfaite et lorsque la vitesse du moteur est réduite à son minimum, une recirculation d'eau vers la bêche est nécessaire pour éviter la surchauffe de la pompe.

**Sans recirculation.** Dans ce cas, le régulateur du moteur stoppe la pompe au débit très faible de la chaudière, ainsi il n'est pas nécessaire d'avoir une recirculation.

Les deux facteurs concernant l'arrêt ou la mise en marche de la pompe sont :

- La pompe ne doit pas être arrêtée ou démarrée plus souvent que ne le recommande le constructeur pour une période de temps donnée.
- Au démarrage de la pompe, le régulateur de fréquence doit avoir une rampe de démarrage avec faible vitesse pour minimiser l'usure de la pompe.

Le principal avantage d'une marche à vitesse variable est que comme la vitesse de la pompe varie, la consommation de la pompe varie aussi, de fait, la consommation globale est diminuée. Toutefois, l'économie de consommation de la pompe doit être rapprochée du coût supplémentaire nécessaire pour le système de régulation. Ceci est donc seulement valable pour les chaudières de grande capacité.

#### **5.4.5 Régulation de niveau d'eau à élément unique**

Le système standard de régulation de niveau d'eau à élément unique avec une régulation proportionnelle, donne d'excellents résultats dans la grande majorité des cas de chaudières.

Toutefois, avec une régulation proportionnelle à élément unique, le niveau d'eau doit diminuer pour que la régulation ouvre la vanne d'alimentation d'eau. Ceci signifie que le niveau d'eau doit être plus élevé pour des faibles débits de vapeur et plus bas pour des forts débits de vapeur : une caractéristique de régulation de niveau chutant.

Néanmoins, lorsqu'il y a de soudaines variations de charge, et pour certains types de chaudière à tube d'eau, la régulation à élément unique a ses limites.

#### **Considérons le cas d'une chaudière produisant de la vapeur à débit constant à son débit nominal.**

- L'eau de la chaudière contiendra réellement un mélange d'eau et de bulles de vapeur qui est moins dense que l'eau seule.
- Comme la demande de vapeur augmente, la pression dans la chaudière diminue, le système de régulation augmente la capacité du brûleur et le taux d'évaporation va augmenter pour satisfaire la demande supérieure de vapeur.
- L'augmentation de l'évaporation signifie que l'eau de chaudière contiendra plus de bulles de vapeur et le mélange deviendra encore moins dense.

#### **Pour une demande soudaine supplémentaire de débit :**

- La pression dans la chaudière est réduite et une proportion d'eau de chaudière est revaporisée avec la vapeur produite.
- La revaporisation de l'eau de chaudière plus l'augmentation soudaine de demande vapeur alors que le brûleur fonctionne à plein régime signifie que l'eau de chaudière contient encore plus de bulles de vapeur et le mélange est encore moins dense.
- Comme la pression diminue, le volume massique de la vapeur augmente et la grande vitesse d'évacuation de la vapeur hors de la chaudière peut créer une vague d'un mélange de bulles de vapeur et d'eau, donnant l'impression d'une augmentation du niveau d'eau dans la chaudière.
- La régulation de niveau détecte cette augmentation apparente de niveau et commence à fermer la vanne d'alimentation d'eau, alors qu'il faut envoyer de l'eau dans la chaudière. Cette situation est maintenant telle qu'il y a une forte demande de vapeur et alors que l'eau n'est pas envoyée dans la chaudière pour maintenir le niveau.
- Le maximum est atteint quand la vague dans la chaudière collapse, souvent à un niveau en dessous du niveau d'alarme bas et la chaudière se met en sécurité, interrompant la production.

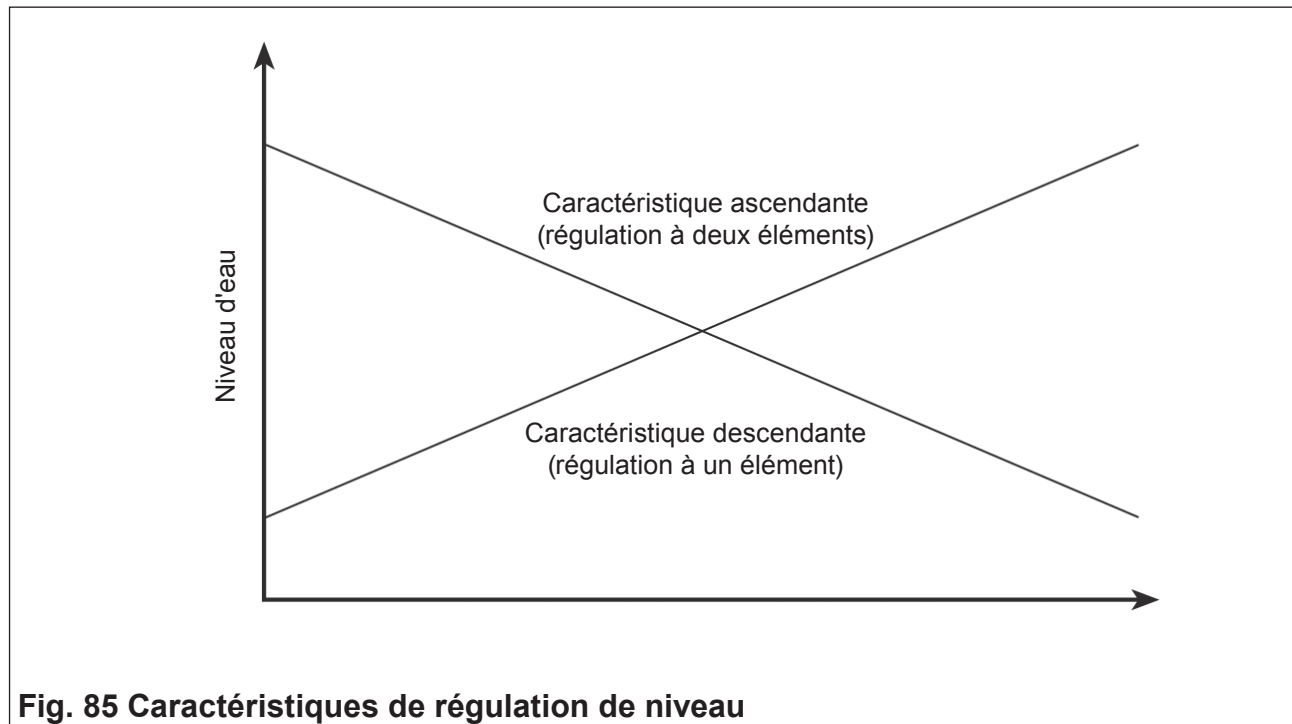
### 5.4.6 Régulation de niveau d'eau à deux éléments

La régulation à deux éléments assure que le débit d'eau d'alimentation soit proportionnel au débit vapeur lorsque la charge sur les utilités est importante. Pour de faibles charges, on utilise la sonde de niveau. La régulation à deux éléments fonctionne à l'inverse d'une régulation à un élément (Figure 85). Cela garantit aussi que la quantité d'eau dans la chaudière reste constante à toute charge et garantit que lors d'une augmentation soudaine de demande de vapeur, la vanne d'alimentation d'eau s'ouvre.

Le système fonctionne en utilisant le signal d'un débitmètre vapeur installé au départ vapeur de la chaudière. Ce signal agit sur la consigne du régulateur de niveau et l'augmente en cas d'augmentation de la demande.

Les deux éléments du signal sont :

- Premier élément - Signal de niveau dans la chaudière.
- Deuxième élément - Signal de débit du débitmètre.

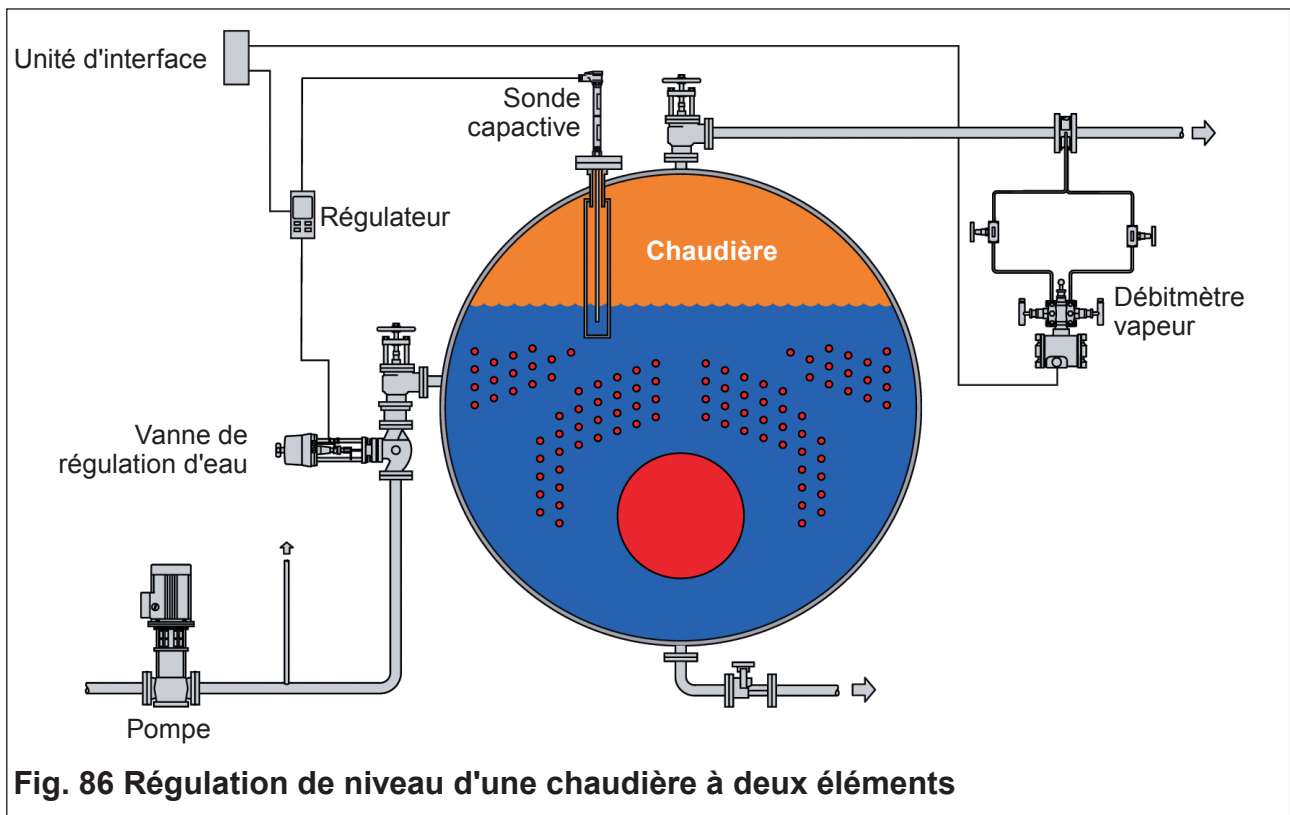


**Fig. 85** Caractéristiques de régulation de niveau

#### 5.4.6.1 Résumé d'une régulation de niveau à deux éléments

Toute installation qui a des variations fréquentes ou soudaines de charge fonctionnera mieux avec une régulation d'alimentation d'eau à deux éléments.

Dans le cas de conditions de process sévères (les brasseries sont un exemple classique) les régulations à deux éléments doivent être utilisées car elles seront nécessaires chaque fois que les variations de charge dépasseront 25% de la charge nominale et ceci particulièrement pour les chaudières à fort débit de vapeur.



**Fig. 86 Régulation de niveau d'une chaudière à deux éléments**

#### 5.4.7 Régulation de niveau à trois éléments

Une régulation de niveau à trois éléments est représentée sur la Figure 87. Elle comprend les deux signaux précédemment indiqués, plus un troisième élément qui est la mesure réelle du débit d'eau entrant dans la chaudière. Une régulation de niveau à trois éléments est plus souvent rencontrée dans le cas de chaufferies où plusieurs chaudières sont alimentées en eau par un réseau commun sous pression.

Dans ces conditions, la pression du réseau peut varier en fonction de la demande d'eau de chaque chaudière.

Comme la pression d'alimentation du réseau varie, le débit d'eau à travers chaque vanne d'alimentation peut varier en fonction de chacune des ouvertures de la vanne. Le rôle du troisième élément est de modifier le signal de la vanne d'alimentation d'eau pour prendre en compte la variation de pression.

#### 5.4.8 Résumé des régulations modulantes de niveau

##### Avantages

- Pression et débit de vapeur constants.
- Fonctionnement plus efficace du brûleur.
- Réduction des contraintes thermiques dans la calandre de la chaudière.
- Réduction de l'entraînement d'eau avec la vapeur.
- Permet l'utilisation d'une station de pompage centrale.
- Moins d'usure de la pompe et du brûleur.

##### Inconvénients

- Plus coûteux.
- La pompe d'alimentation d'eau doit fonctionner en permanence.
- Possibilité d'une consommation plus importante d'électricité.

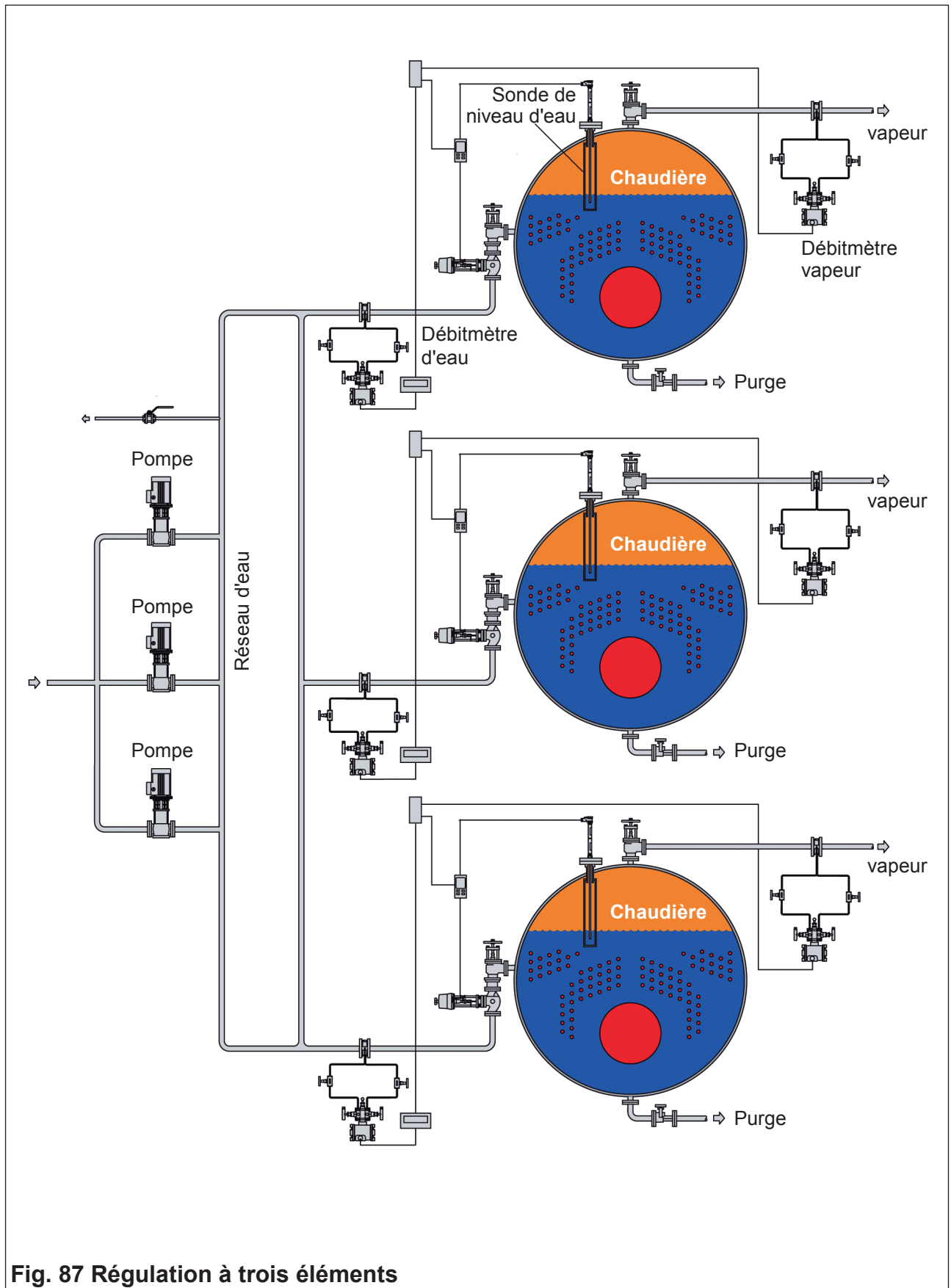
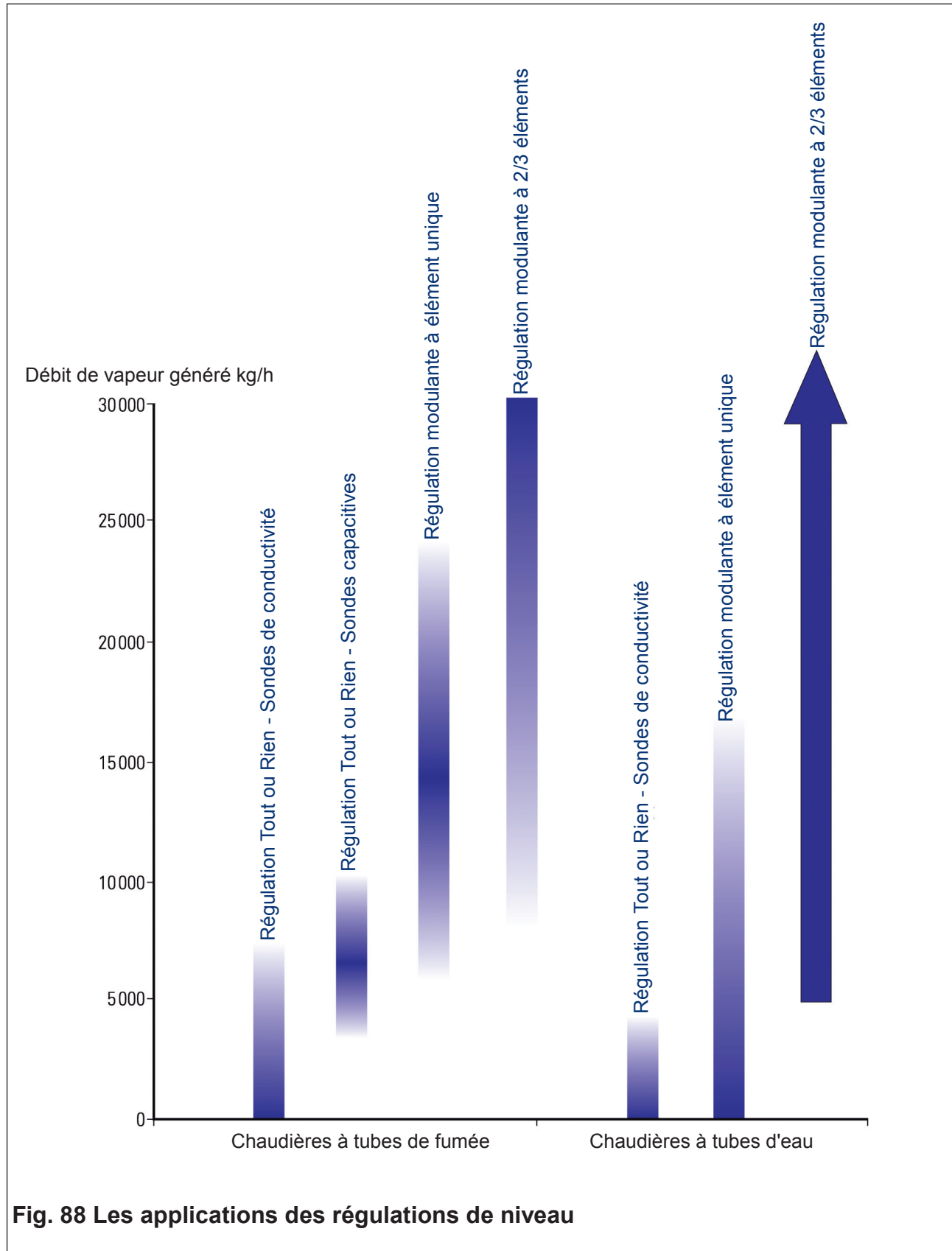


Fig. 87 Régulation à trois éléments

## 5.5 Les applications des différents types de régulation de niveau d'eau de chaudières



## 5.6 Installations des régulations de niveau

Il a déjà été mentionné que le niveau d'eau dans une chaudière varie considérablement en fonction de :

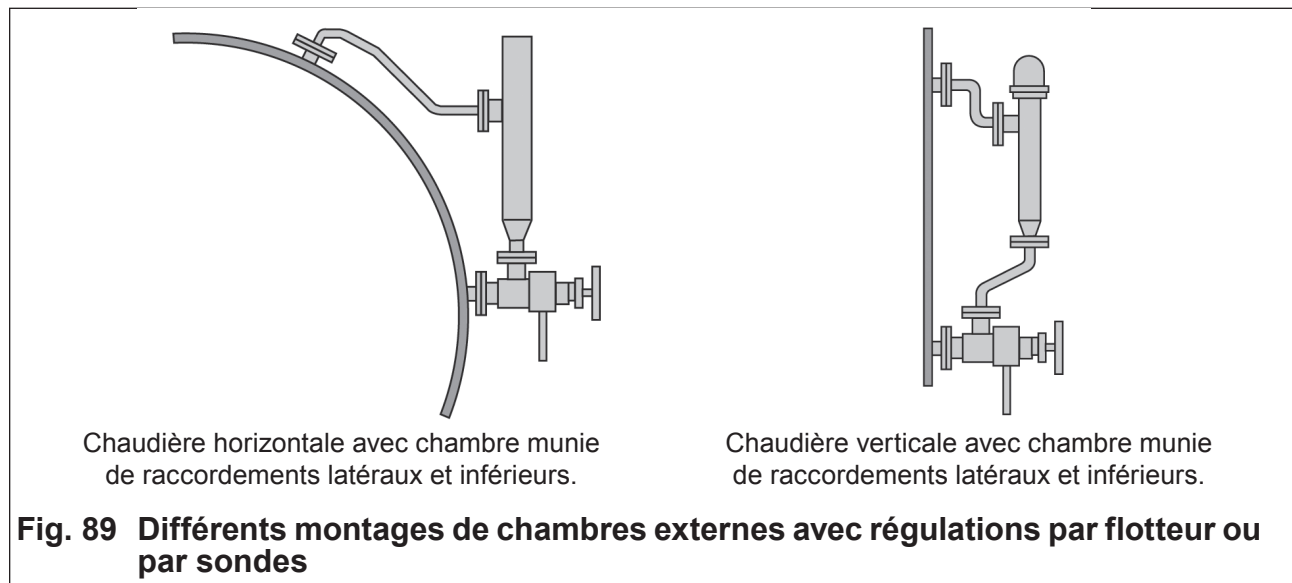
- Du débit de vapeur.
- Du taux de variation du débit.
- De la circulation d'eau dans la chaudière.

Toutes ces circonstances rendent très difficile la régulation précise du niveau d'eau de la chaudière. Ce qui est nécessaire, c'est d'avoir un plan d'eau calme qui est le reflet du niveau d'eau réel dans la chaudière.

Avec des régulations à flotteur ou à sonde, on peut obtenir ce résultat selon l'une des deux façons suivantes :

### 5.6.1 Chambres externes

Ce sont des chambres installées à l'extérieur et raccordées par des tubulures à la chaudière. Elles sont généralement, mais pas toujours, équipées de régulations à flotteur. Les montages classiques sont représentés sur la Figure 89.

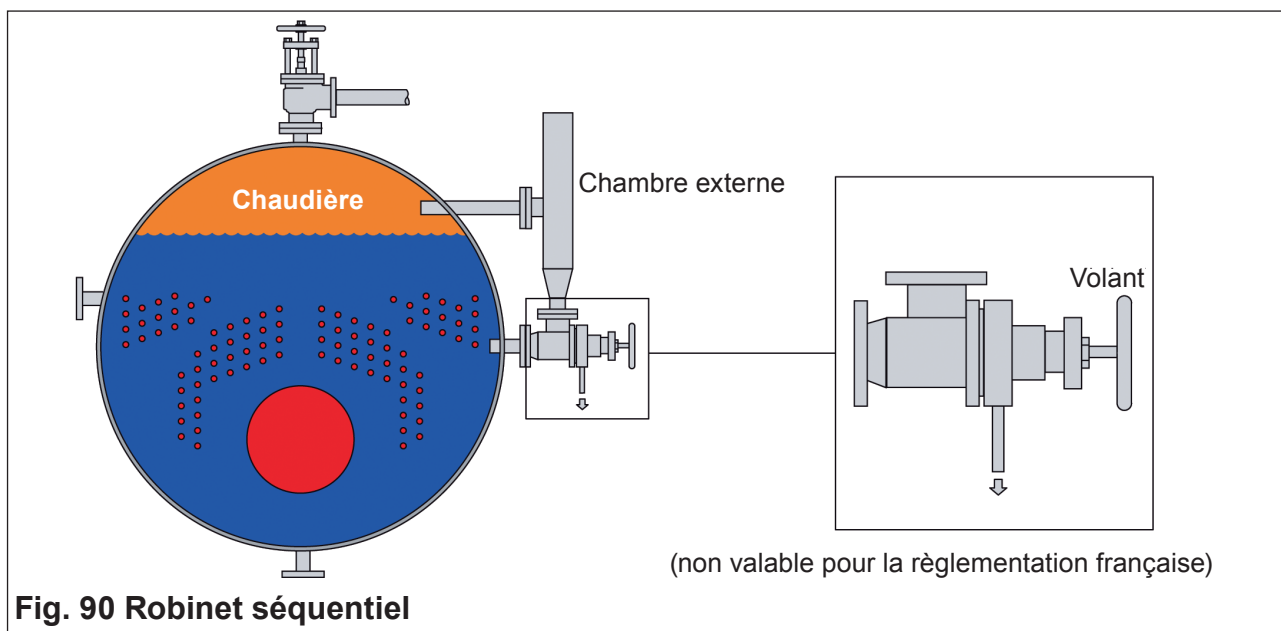


Deux chambres externes sont nécessaires.

- Une chambre pour la régulation de niveau, plus la première alarme de niveau bas.
- L'autre chambre pour la seconde alarme de niveau bas et l'alarme de niveau haut, si nécessaire.

Cela signifie que les deux alarmes de niveaux bas sont situées dans des chambres indépendantes. Les chambres externes doivent être prévues avec des robinets séquentiels de purge et, en option, des robinets d'isolement vapeur.

**Nota :** Si des robinets d'isolement sont prévus, la réglementation anglaise prévoit qu'ils soient verrouillés en position ouverte.



## 5.6.2 Tubes de protection ou de tranquillisation (régulations montées directement)

Ils correspondent généralement aux régulations montées directement dans la chaudière et qui nécessitent des tubes de protection comme présenté sur la Figure 91.

Les première et seconde alarmes de niveau bas doivent être montées dans des tubes séparés, pour être totalement indépendantes l'une de l'autre.

Les tubes de protection ne sont pas des éléments standards et sont fonctions des chaudières. Toutefois, comme leur conception peut avoir une influence importante sur le fonctionnement de la régulation, les paragraphes suivants donnent quelques explications sur leur conception et leur installation.

### Diamètre

Un tube de protection de diamètre 80 mm garantit des conditions stables et un jeu suffisant pour centrer la sonde.

Lorsque deux sondes sont installées dans le même tube (par exemple sonde de régulation de niveau et de niveau haut plus sonde autocontrôlée de niveau bas), un tube de diamètre 100 mm est préférable.

### Longueur

Le tube de protection doit être aussi long que possible pour être le plus proche possible des tubes de chaudière.

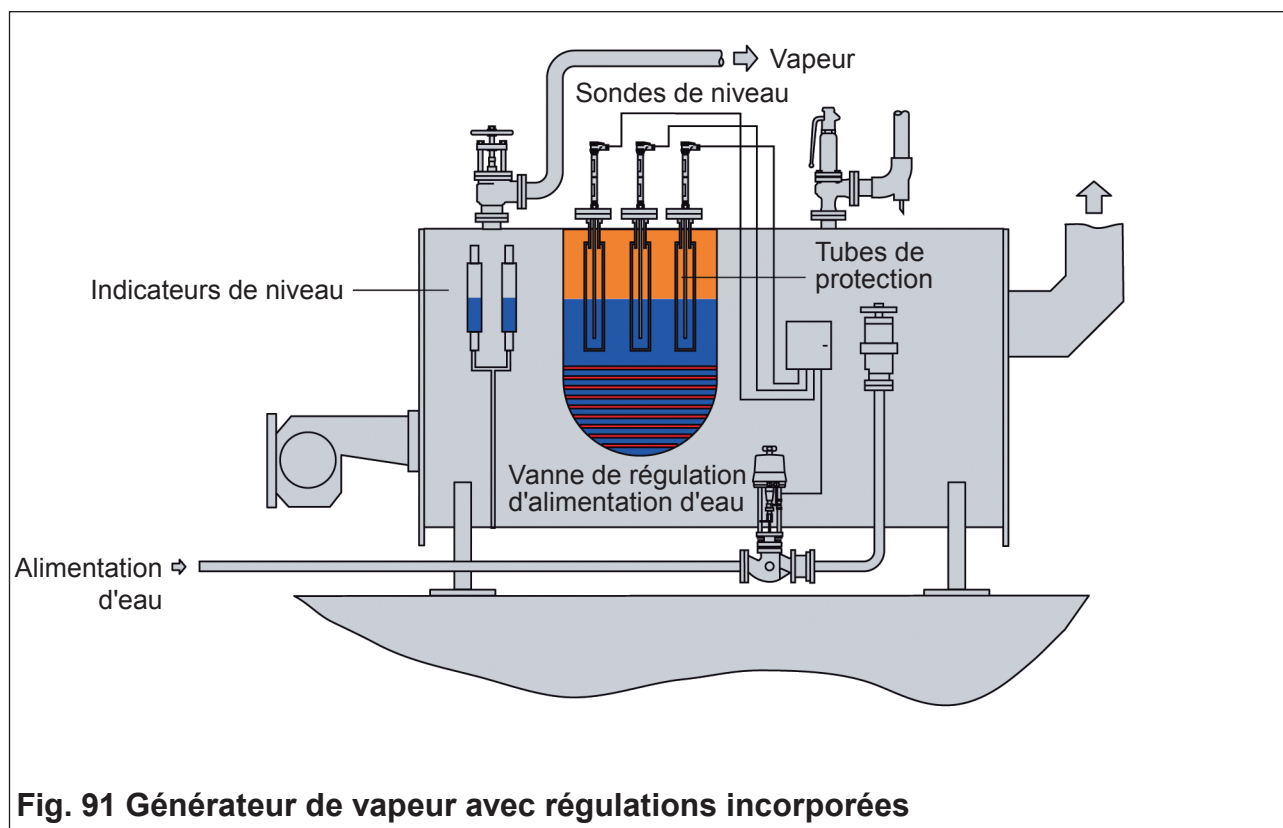
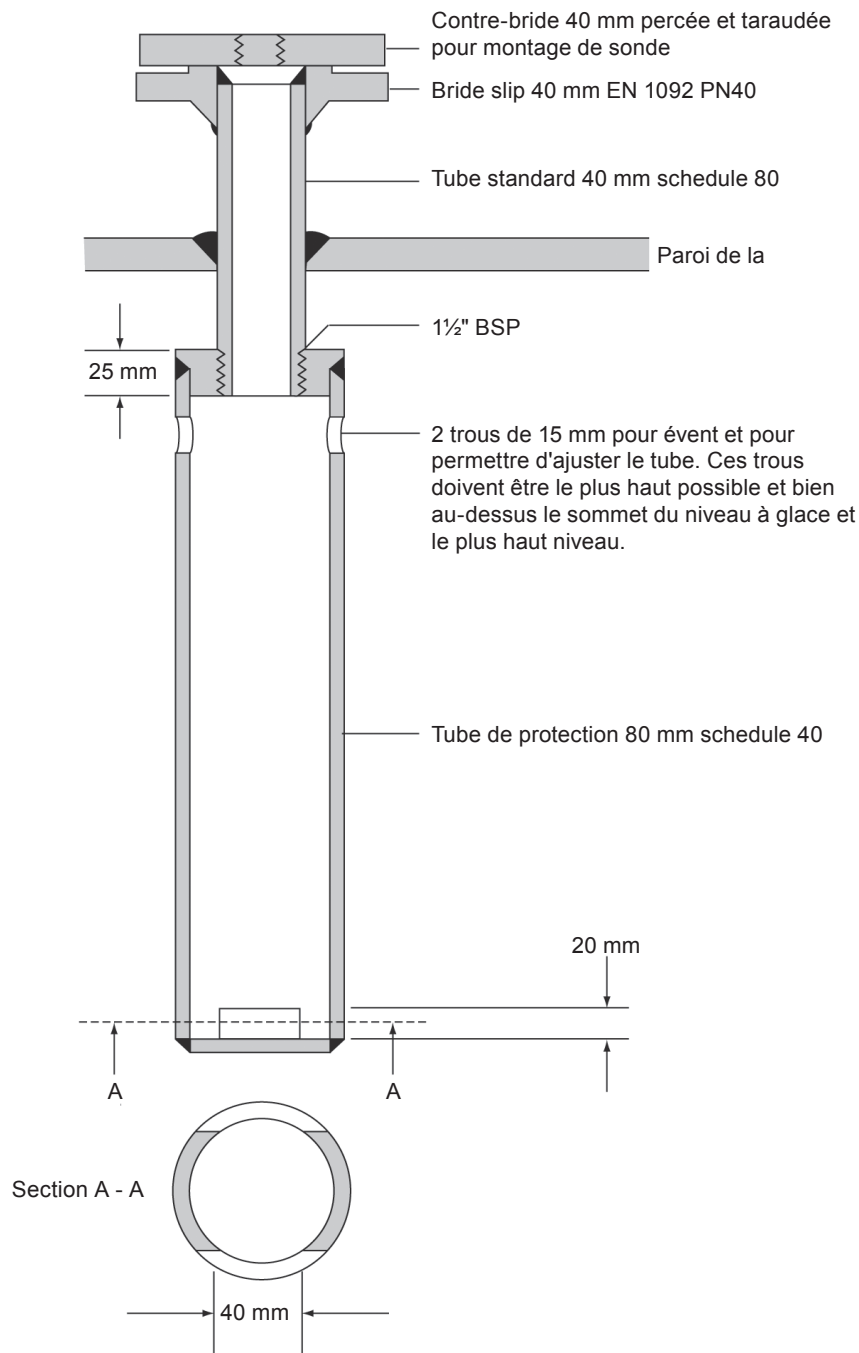


Fig. 91 Générateur de vapeur avec régulations incorporées



**Fig. 92 Tubes de protection**

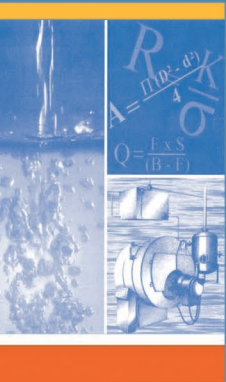
### Position

Lorsqu'il y a un choix pour installer les sondes, suivre les recommandations générales suivantes :

- Aussi loin que possible de la sortie vapeur et des raccordements des soupapes (minimum 1 m), mais pas trop près des parois latérales de la chaudière.
- Aussi proche que possible des indicateurs de niveau.
- Installer dans des tubes de protection avec des orifices supérieur et inférieur pour permettre l'entrée de la vapeur et de l'eau. Le tube doit avoir un tampon à la partie inférieure pour empêcher les bulles de vapeur d'entrer et certainement pas avec une fente latérale sur la longueur du tube.

Il y a de nombreux avantages à utiliser des régulations internes avec tubes de protection :

- C'est généralement une solution moins chère pour une nouvelle chaudière, car le coût de deux ou trois tubes de protection est plus faible que celui de deux chambres externes et des robinets séquentiels associés.
- Il peut être utilisé des systèmes électroniques sophistiqués.



BANQUE MONDIALE

## Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie

3 rue Chott Mariem Montplaisir 1073 Tunis – B.P . 213  
Tél : (216) 71 906 900 – (216) 71 908 305 - Fax : (216) 71 904 624  
Direction de l'Efficacité Energétique dans l'Industrie  
E-mail : [ugp\\_pee@anme.nat.tn](mailto:ugp_pee@anme.nat.tn)  
Site web : [www.anme.nat.tn](http://www.anme.nat.tn)

