

**Série N=1 Traitement des eaux de chaudière à vapeur**

**Exercices sur la combustion de carburant par l'air et l'efficacité de la chaudière**

**Exercice 1 :** On alimente une chaudière par carburant qui contient en % volumique et qui sera oxydé par l'air atmosphérique avec un taux d'humidité supplémentaire de 1.9 % (W=0.012 kg vapeur/kg air).

Méthane	CH <sub>4</sub>	83,4%
Éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15,8%
Azote	N <sub>2</sub>	0,8%

En dressant le tableau de combustion du carburant par l'air en représentant

- 1- Calculer la quantité nécessaire de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, puis l'air pour la combustion complète de ce carburant (la quantité en kmol, et en kg pour l'air).
- 2- Calculer la quantité dégagée à la sortie de la chaudière en gaz d'échappement (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) en kmol.
- 3- Si, on utilise l'air en excès d'air 15% à la combustion, calculer les nouvelles quantités des gaz dans le tableau de combustion.

**Solution**

Fuel	% volume	kmol	kmol	kmol	kg	kg	kmol	kmol	kmol	Humidité d'air
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Air	Air	% masse	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	
CH <sub>4</sub>	83,4	166,8	627,835	794,635		1334,4	83,4	166,8	627,835	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15,8	55,3	208,165	263,465		474	31,6	47,4	208,165	
N <sub>2</sub>	0,8					22,4			<b>0,8</b>	
Total	100	222,1	836,000	1058,1	30515,60977	1830,8	115	214,2	836,800	20,1039
<b>Vrai</b>							<b>115</b>	<b>234,304</b>	<b>836,800</b>	
Total							1186,1			
% volume							9,6956	19,7541	70,5503	
kg							5060	4217,47	23430,4	
Total en kg							32708			
Air/Fuel, kg						16,668				

Fuel	% volume	kmol	kmol	kmol	kg	kg	kmol	kmol	kmol	Humidité d'air	kmol
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Air	Air	% masse	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub>	83,4	166,8	627,835	794,635		1334,4	83,4	166,8	627,835		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15,8	55,3	208,165	263,465		474	31,6	47,4	208,165		
N <sub>2</sub>	0,8					22,4					
Total	100	222,1	836	1058,1	35092,95123	1830,8	115	214,2	836,8	23,1195	33,315
							115	<b>237,319</b>	962,2		33,315
Total							1347,8				
% volume							8,5322	17,6075	71,3886		2,47174
kg							5060	4271,75	26941,6		1066,08
Total en kg							37339				

Deuxième partie de l'air en excès 15% (voir seulement la couloir bleu), un changement des valeurs.

**Exercice 2** : une chaudière génère 6200 kg de vapeur par heure à 9 bars et 0,93 la fraction sèche de la vapeur produite (titre de vapeur), à partir de l'eau d'alimentation à 38 °C en utilisant 825 kg de charbon par heure ayant un pouvoir calorifique de 31000 kJ/kg.

Déterminer l'efficacité thermique de la chaudière.

**Solution** : L'efficacité thermique d'une chaudière est définie par le rapport entre la chaleur utile transférée à la vapeur et l'énergie fournie par le combustible

$$\text{Efficacité de chaudière} = \frac{\text{quantité de vapeur} * (\text{Enthalpie du vapeur} - \text{Enthalpie de l'eau})}{\text{quantité de carburant} * \text{Pouvoir calorifique}}$$

$$\text{Efficacité de chaudière} = \frac{m_v * (h_2 - h_1)}{m_{\text{charbon}} * \text{PCI}}$$

L'enthalpie de l'eau d'alimentation à 38 °C :  $h_1 = 159.14 \text{ kJ/kg}$  à  $T = 38^\circ\text{C}$  (voir Table de la vapeur à  $T = 38^\circ\text{C}$ )

Enthalpie de l'eau saturée à 9 bars :  $h_{f2} = 742.93 \text{ kJ/kg}$  (voir Table de la vapeur à  $P = 9 \text{ bars}$ )

Enthalpie de vaporisation à 9 bars :  $h_{fg2} = 2030.7 \text{ kJ/kg}$  (voir Table de la vapeur à  $P = 9 \text{ bars}$ )

$$h_2 = h_{f2} + x * h_{fg2} = 742.93 + 0.93 * 2030.7 = 2631.481 \text{ kJ/kg}$$

$x = 0.93$  titre de vapeur

$$\text{Efficacité de chaudière} = \frac{6200 * (2631.481 - 159.14)}{825 * 31000} \approx 0.6$$

L'efficacité thermique de la chaudière (%) = 60%

### **Exercice 3 sur l'adoucisseur**

*On dispose d'une résine échangeuse d'ions capable d'éliminer en moyenne 55 g de dureté par litre (avec une efficacité variante entre 50 et 60 g/L).*

Dans les conditions actuelles d'exploitation, le volume d'eau produit quotidiennement est estimé à 96 m<sup>3</sup>, destiné à l'alimentation d'une chaudière à vapeur d'un débit de 4 t/h. La production de vapeur à ce débit nécessite une eau d'alimentation adoucie, afin de limiter les risques d'entartrage et d'assurer un fonctionnement optimal de l'installation. L'eau brute utilisée présente une dureté totale de 300 mg/L (exprimée en équivalent CaCO<sub>3</sub>).

#### **Objectif :**

Dimensionner une unité d'adoucissement permettant de traiter une quantité d'eau suffisante pour assurer l'alimentation continue de la chaudière. Calculer :

- le volume de résine en L.
- Les dimensions de l'adoucisseurs selon les adoucisseurs qui sont disponible au marché.
- La quantité du sel NaCl pour la régénération.

**Données supplémentaires :**

- 1 tonne de vapeur = 1 m<sup>3</sup> d'eau
- La régénération de la résine nécessite **150 g de NaCl par litre de résine** en moyenne.

Resin Volume in Liter	Capacity Of Softener gm/L L X 55 gm	Salt Req./ Regeneration 150 gm/L=Kg	Regeneration Water Consumption M <sup>3</sup> 0.006 -0.008/L	Flow Rate M <sup>3</sup> / Hr ( GPM )	Diameter / inch	Diameter X Height cm.
75	4125	11.25	0.45 – 0.6	1.9 ( 7 )	13"	33 X 137
100	5500	15.0	0.6 – 0.8	2.7 (10)	14"	35.5 X 170
125	6875	18.75	1.0	3.2 (12)	16"	40 X 170
200	11000	30.0	1.6	6.8 (25)	21"	55 X170
300	16500	45.0	2.0	9.6 (35)	24"	60 X 170
500	27500	60	2.6	12.3 (45)	30"	80 X 200
700	38500	85	3.6	16.5 (60)	36"	90 X 200
1000	55000	150	5.8	20.5 (75)	40"	100 X 270
1500	82500	180	7.8	50 (180)	48"	120 X 270
1800	99000	220	9.2	68 (250)	55"	140 X 270

### Solution :

Volume d'eau en m<sup>3</sup> = Volume de résine (L)\*55/la durté de l'eau d'alimentation de la chaudière (ppm en CaCO<sub>3</sub>)

Volume de résine (L)= Volume d'eau en m<sup>3</sup>\*durté de l'eau d'alimentation de la chaudière (ppm en CaCO<sub>3</sub>)/55

Volume de résine (L)= 96\*100/55=174.54 L de résine

Selon le tableau de volume de résine, on doit choisir les dimensions de 200 m<sup>3</sup> de résine qui correspond à adoucisseur de (diamètre =55 cm et hauteur=170 cm).

### **Calcul du sel pour la régénération de résine**

Le sel est utilisé pour régénérer la résine avec une efficacité moyenne de **150 g de NaCl par litre de résine**.

$$M_{\text{NaCl}} = V_{\text{résine}} (\text{L}) \times 150 \text{ g}$$

$$M_{\text{NaCl}} = 174.54 \times 150 = 26.18 \text{ kg de sel par régénération}$$

### Exercice 4 :

Nous avons une chaudière à vapeur, sa capacité est de 4 tonnes/heure. Nous devons utiliser une eau adoucie de durté nulle.

La durté de l'eau brute est de 640 mg/L en CaCO<sub>3</sub>. Il faut utiliser une résine sous forme Na<sup>+</sup>, elle a 46% d'humidité et une capacité d'échange de 2 m.eq/g (résine sèche) et la résine humide a une densité de tassement de 840 g/L, si l'on souhaite opérer l'adoucisseur pour un débit 288 m<sup>3</sup>/3jours.

Nous devons donc faire les calculs suivants :

1- Combien de kg de résine faut-il le faire ?

2- les dimensions de la colonne d'échangeuse d'ions (l'adoucisseur), si le diamètre =0.5 m et si le diamètre =1.2 m ?

NB : nous devons tenir compte du fait que la hauteur de la colonne d'échange doit être comprise entre 3 et 4 du diamètre.

### Solution :

Nous allons d'abord calculer la quantité de résine nécessaire :

$$\frac{640 \text{ mg/L CaCO}_3 * 1 \text{ meq}}{50 \text{ mg CaCO}_3} = 12.8 \text{ meq CaCO}_3/\text{L}$$

meq de CaCO<sub>3</sub> nécessaire à éliminer pour 03 toujours

$$12.8 \frac{\text{meq CaCO}_3}{\text{L}} * 288 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} = 3686400 \text{ meq CaCO}_3 \text{ pour 3 jours (Capacité totale nécessaire)}$$

### Quantité de résine sèche nécessaire

La **capacité d'échange de la résine sèche** est de **2 m.eq/g**, donc la masse de résine sèche requise est :

$$3686400 \text{ meq CaCO}_3 * \frac{\text{g}}{2 \text{ meq CaCO}_3} = 1843200 \text{ g pour 3 jours}$$

Cette quantité obtenue, si vous avons la résine sèche.

$$\text{Fraction sèche} = 1 - 0.46 = 0.54$$

Étant donné que la résine a 46 % d'humidité, la fraction sèche représente (100 - 46) = 54 % de la masse totale.

Quantité de résine humide nécessaire pour 03 jours.

$$\frac{1843200 \text{ g}}{0.54} = 3413333.33 \text{ g} = 3413.33 \text{ kg}$$

Cette quantité est supérieure à la quantité sèche à cause l'humidité

Volume de résine humide en utilisant la masse volumique de la résine

$$3413333.33 \text{ g} * \frac{1 \text{ L}}{840 \text{ g}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 4.063 \text{ m}^3 \text{ de résine}$$

2- Calcul de dimension de la colonne d'échangeur d'ions

Si d=0.5 m

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 0.5^2}{4} = 0.196 \text{ m}^2$$

$$L = \frac{V}{S} = \frac{4.063}{0.196} = 20.7 \text{ m} ; \text{ Cette dimension inacceptable}$$

Si d=1.2 m

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 1.2^2}{4} = 1.13 \text{ m}^2$$

$$L = \frac{V}{S} = \frac{4.063}{1.13} = 3.6 \text{ m} ;$$

La quantité de résine sera de 3413,33 kg. La dimension de la colonne d'échange sera d=1,2 m et L=3,6 m.

## **Exercice 5**

Une chaudière produit 30 tonnes /h de vapeur.

Données :

- Capacité de la chaudière = 30 tonnes/h (30 000 kg/h).
  - TDS dans la chaudière = 2000 ppm
  - TDS dans l'eau d'alimentation = 20 ppm
  - Facteur de concentration = 100
- 1- Si la concentration maximale admissible dans la chaudière est 2000 ppm, vérifier le facteur de concentration (C) de la chaudière ?
  - 2- Calculer le débit de purge et le débit d'alimentation en eau.

### **Solution**

Formule du Facteur de Concentration :

Facteur de concentration = TDS chaudière / TDS alimentation

Vérification :

$$100=2000/20$$

Calcul du débit d'alimentation ( $Q_{\text{feed}}$ ) :

La relation entre le débit d'alimentation et la purge est donnée par :

$$Q_{\text{feed}}= Q_{\text{vapeur}}+ Q_{\text{purge}}$$

Or, le débit de purge est donné par :

$$Q_{\text{purge}} = \frac{Q_{\text{vapeur}}}{\text{Facteur de concentration}-1} = \frac{30}{100-1} = 0.303 \text{ ton / h}$$

Donc, le débit d'alimentation est :

$$Q_{\text{feed}}=30+0.303=30.303 \text{ tonnes/h}$$

Conversion en  $\text{m}^3/\text{h}$  :

L'eau ayant une densité d'environ 1 tonne = 1  $\text{m}^3$ , on peut estimer :

$$Q_{\text{feed}}\approx 30.303 \text{ m}^3/\text{h}$$

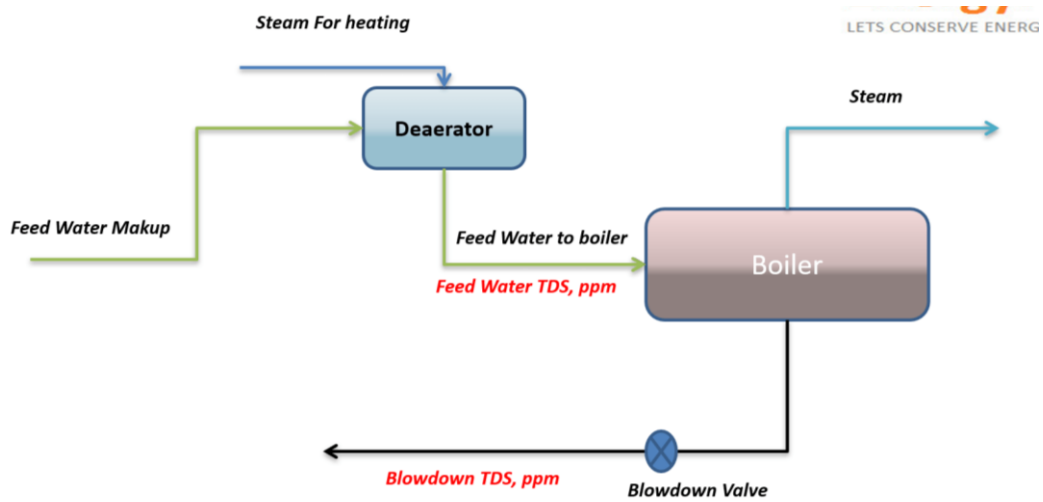
## **Exercice 6 : Calcul du pourcentage de retour de condensat %**

Les données: TSD make up =200 ppm, TSD feed water =40 ppm, TSD de retour de condensat=5 ppm.

Le retour de condensat est calculé en fonction des solides dissous totaux (TDS) de l'eau d'appoint, de l'eau d'alimentation et du condensat.

Sachant que %Retour Condensat= $(Q_{\text{condensate}}/Q_{\text{feed}})100$ .

En utilisant les bilans massiques et les Bilans des Solides Dissous Totaux (TDS Balance).



## Solution

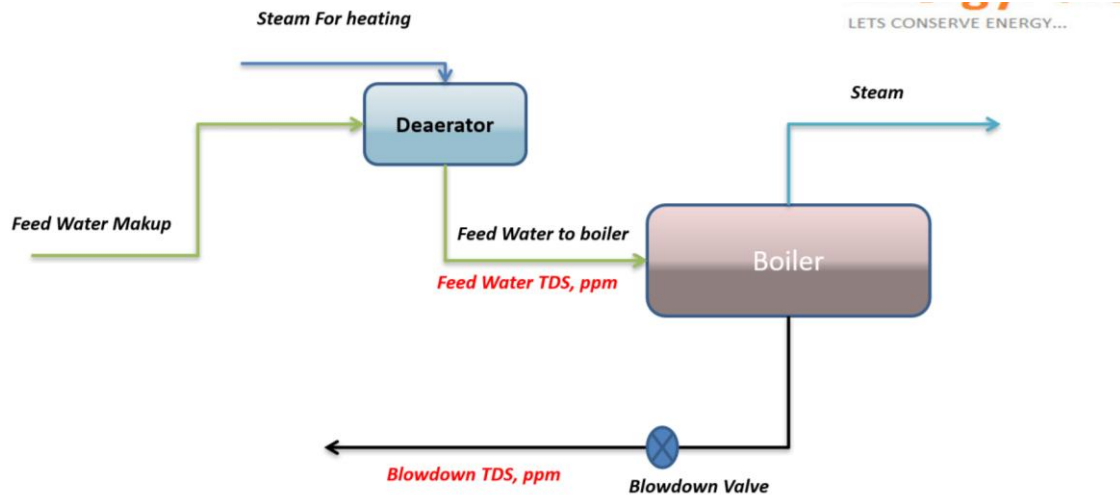
### Exercice 7 sur la purge de chaudière

Soit une chaudière produit de 4 tonne/heure de vapeur d'eau à une pression 6.65 bars. Calculer :

- 1- Le taux de purge de la chaudière (%)
- 2- La quantité de purge en (k/h).
- 3- Le temps en seconde nécessaire pour une purge continue sachant que le diamètre de la conduite d'évacuation est égal 1 inch (2,54 cm). (Utilisée l'abaque de Bowdown).

Les données :

- Le total des solides dissous dans l'eau d'alimentation TDS = 350 mg/L.
- Le total maximal admissible de solides dissous dans l'eau de la chaudière = 3500 mg/L.
- Le pourcentage d'eau d'appoint = 10%.



### Boiler Blowdown

$$\text{taux de purge de la chaudière (\%)} = \frac{\text{total des solides dissous dans l'eau d'alimentation (mg/L)} \times \text{pourcentage d'eau d'appoint (\%)}}{\text{total maximal admissible de solides dissous dans l'eau de la chaudière (mg/L)}}$$

NB. Selon les références bibliographiques le pourcentage d'eau d'appoint est défini par Cl : la concentration des chlorures dans l'eau d'alimentation par rapport l'eau d'appoint

is expressed as

$$\text{Makeup in per cent} = \frac{\text{Cl in feed water}}{\text{Cl in raw water}} \times 100$$

Et ce pourcentage est toujours donné dans les exercices

AN :

$$\text{taux de purge de la chaudière} = \frac{350 \times 10}{3500} = 1\% \quad \text{C'est un pourcentage de purge de chaudière pour TDS}$$



$$\text{quantité de purge de la chaudière (kg/h)} = \frac{\text{TDS dans l'eau d'alimentation (mg/L)} * \text{vapeur produite (Kg/h)}}{\text{TDS maximal admissible dans l'eau de la chaudière (mg/L)} - \text{TDS dans l'eau d'alimentation (mg/L)}}$$

AN :

$$\text{quantité de purge de la chaudière (kg/h)} = \frac{350 * 4000}{3500 - 350} = 444.44 \text{ kg/h}$$

Chaque 1 kg = 1 L d'eau. Donc, on doit évacuer environ 444.44 Litre pour chaque heure.

Selon l'abaque de Bowdown et on fait la projection de pression 6.65 bars sur la courbe et on projette sur d=1 inch (voir la valeur de 43 m<sup>3</sup>/heure ou 160 gallon/min).

$$Q = (43 * 1000) / 3600 = 11.94 \text{ L/s.}$$

$$\begin{cases} 11.94 \text{ L} \rightarrow 1 \text{ sec} \\ 444.44 \text{ L} \rightarrow x \text{ sec} \end{cases} \rightarrow \text{temps de purge} = 37.22 \text{ sec}$$

### Exercice 8 : Inhibiteur d'O<sub>2</sub> par Sulfite de Sodium

Le calcul de la masse de Sulfite de Sodium pour une Chaudière de 5 t/h et un TDS de 200 ppm dans le réservoir d'alimentation T=90 °C.

Le débit d'eau d'alimentation (Qa) est donné par :

$$Qa = \text{débit de vapeur} / (1 - \text{Facteur de purge})$$

La masse de Sulfite de Sodium, en ajoutant une marge de sécurité de 10 %.

Données

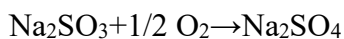
- Capacité de la chaudière = 5 tonnes de vapeur/heure (soit 5000 kg/h)
- TDS du réservoir d'alimentation = 200 ppm (mg/L)
- Facteur de purge estimé = 10 % (ce qui signifie que 90 % de l'eau est convertie en vapeur).

Température (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Solubilité de O <sub>2</sub> (mg/L)	14,56	12,73	11,25	10,06	9,09	8,26	7,49	6,91	6,41	5,94	5,50	5,10	4,69	4,26	3,81	3,32	2,81	2,24	1,59	0,86	0,0

- Déterminer la masse de sulfite de sodium (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) nécessaire pour inhiber l'oxygène dissous (O<sub>2</sub>) dans l'eau d'alimentation de la chaudière.

### **Solution**

La réaction d'élimination de l'oxygène dissous (O<sub>2</sub>) par le sulfite de sodium est :



Ratio stœchiométrique : 1 mg de O<sub>2</sub> nécessite 7,875 mg de Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>

Le rapport de 7,875 mg de Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> par mg d'O<sub>2</sub> provient des masses molaires :

- M(O<sub>2</sub>) = 32,00 g/mol
- M(Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) = 126,04 g/mol
- Une surdose de 10 à 20 % est souvent appliquée pour assurer une protection optimale.

### Calcul du Débit d'Eau d'Alimentation

Le débit d'eau d'alimentation ( $Q_a$ ) est donné par :

$$Q_{\text{alimentation}} = \text{débit de vapeur} / (1 - \text{Facteur de purge}) = 5000 / (1 - 0.1) = 5555,56 \text{ kg/h}$$

(Eau  $\approx$  1 kg/L  $Q_{\text{alimentation}} \approx$  5555,56 L/h)

### Quantité d'oxygène dissous ( $O_2$ )

À 85 °C, l'eau contient environ 2.24 mg  $O_2$ /L, donc :

$$\text{Masse d}'O_2 = 5555,56 \text{ L/h} \times 1.59 \text{ mg/L} = 8833.34 \text{ mg/h}$$

### Masse de $Na_2SO_3$ requise (sans marge)

$$1 \text{ mg d}'O_2 \longrightarrow 7.875 \text{ mg } Na_2SO_3$$

$$8833.34 \text{ mg/h} \longrightarrow x = 8833.34 \times 7.875 = \mathbf{69.56 \text{ g/h}}$$

### Calcul de la masse de sulfite de sodium avec marge de 10%

La masse de  $Na_2SO_3$  nécessaire est :

En ajoutant une marge de sécurité de 10 %, on obtient :

$$\text{Masse finale} = 69.56 \times 1,10 = \mathbf{76.52 \text{ g/h de } Na_2SO_3}$$