

# **COURS THERMODYNAMIQUE**

## **PROJET : BOWATER**

### **RENCONTRE # 6**

#### **DATE LIMITE POUR REMISE DU TRAVAIL FINAL (# 5) :**

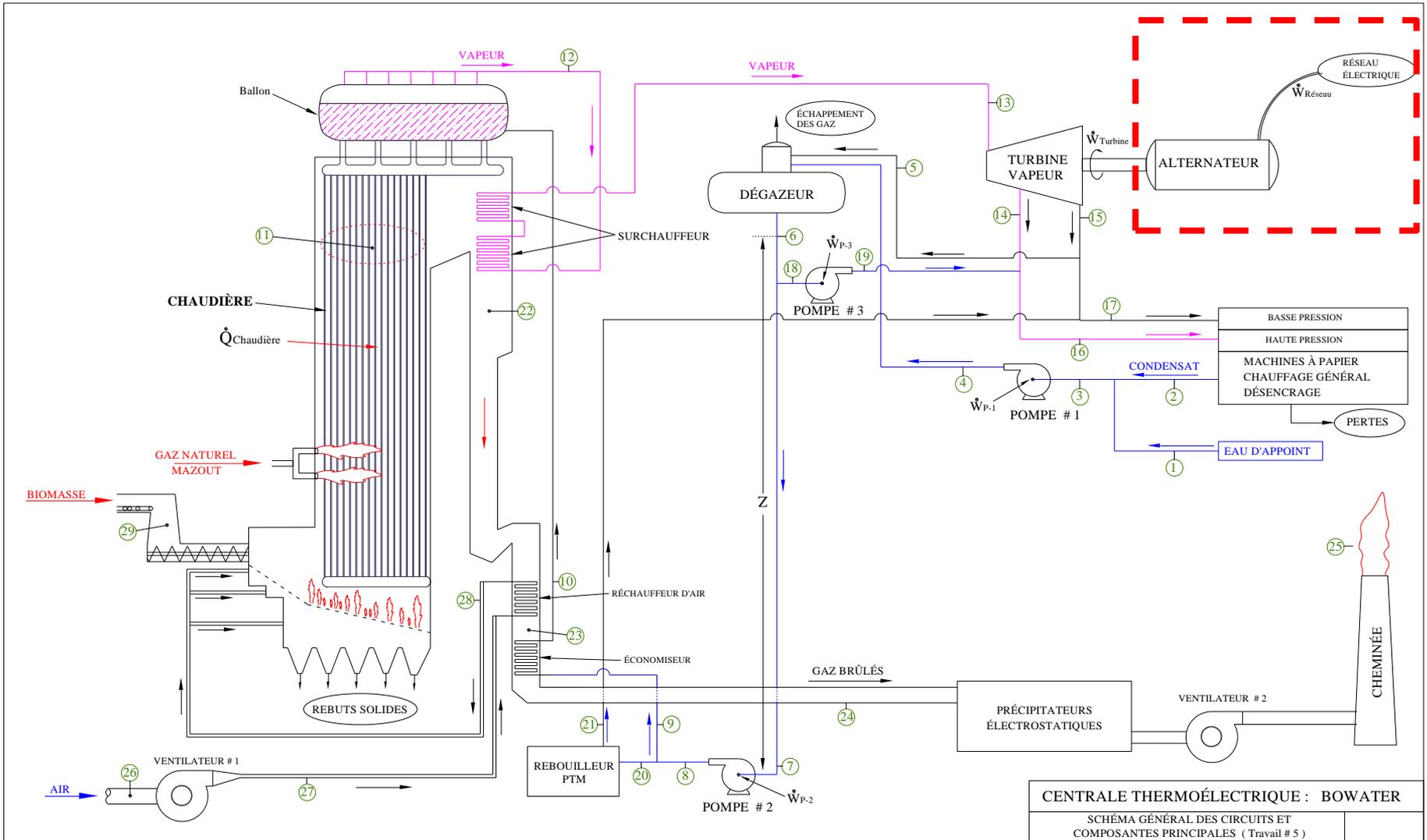
Groupe # 1 .....Mercredi, 17 avril 2024 à 10h30

Groupe # 2 .....Jeudi, 18 avril 2024 à 8h30

Groupe # 3 .....Vendredi, 19 avril 2024 à 15h45

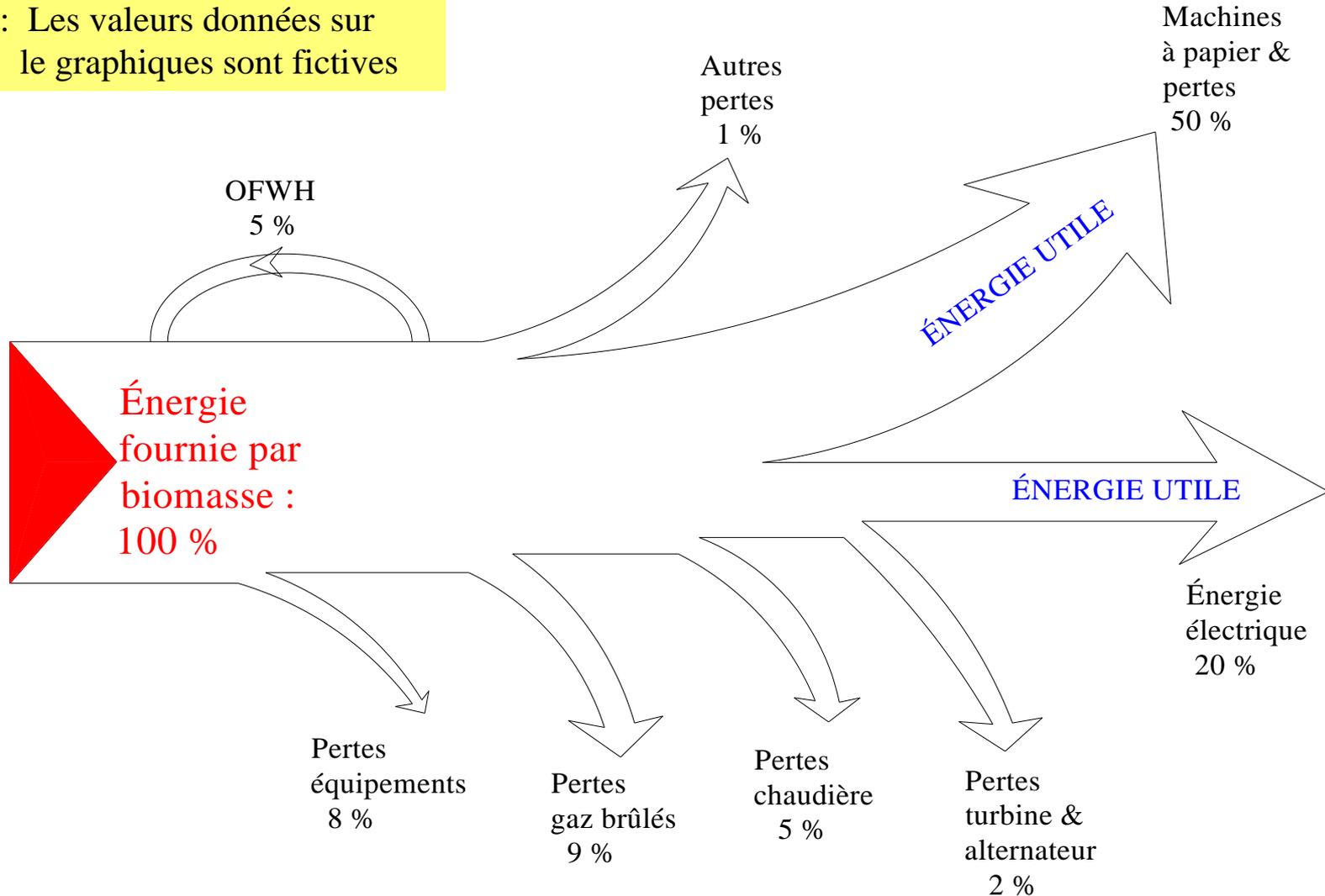
Groupe # 4 .....Jeudi, 18 avril 2024 à 15h45

# CYCLE COMPLET DE LA CENTRALE BOWATER



# DIAGRAMME DES FLUX D'ÉNERGIE DE LA CENTRALE BOWATER

Note : Les valeurs données sur le graphiques sont fictives



# FLUX D'ÉNERGIE DANS LES SYSTÈME COMPLET

## **GAINS D'ÉNERGIE DANS LE SYSTÈME TOTAL:**

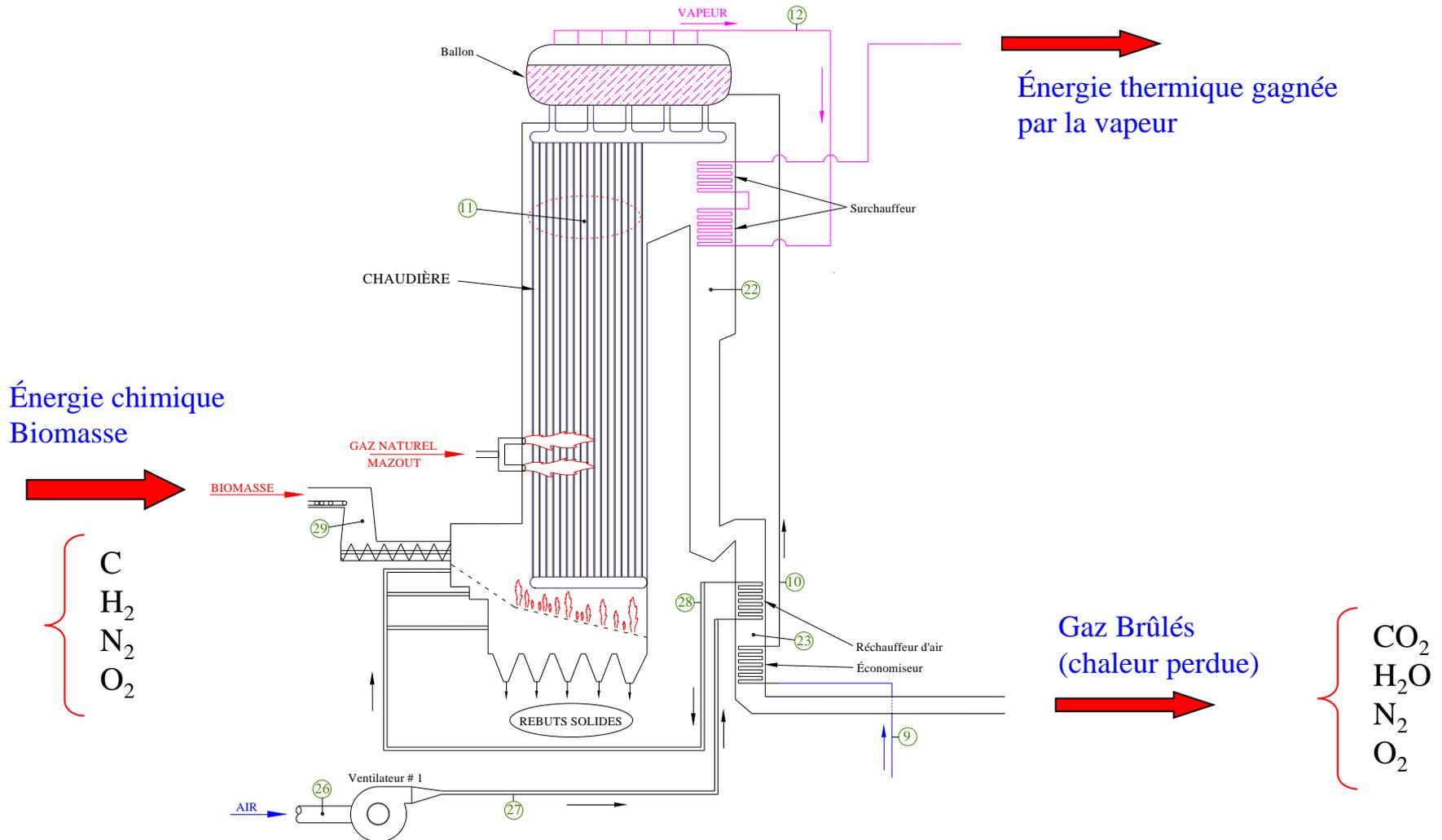
1. Alimentation de Biomasse
2. Énergie récupérée par le rebouilleur PTM
3. Énergie thermique fournie par l'eau d'appoint

## **TYPES DE PERTES POUR LE SYSTÈME TOTAL :**

- 1) Pertes dans la Turbine : frottement du fluide, frottement mécanique  
Différence en puissance réel et puissance isentropique
- 2) Pertes par la conversion mécanique / électrique dans l'Alternateur
- 3) Puissance électrique utilisée par les 3 Pompes
- 4) Puissance électrique utilisée par les 2 Ventilateurs et autres besoins internes
- 5) Énergie thermique perdue par la Chaudière
- 6) Pertes par les Gaz Brûlés à la cheminée :  
Différence entre conditions point (24) et conditions atmosphériques (25)

**NOTE importante :** la vapeur d'eau contenue dans les gaz brûlés se condensera à la sortie de la cheminée, cette énergie latente est non récupérée et doit être considérée comme une perte. Il faut utiliser les propriétés de l'eau comme gaz réel pour les points 22 – 23 – 24 – 25

# ÉNERGIE FOURNIE AU SYSTÈME PAR LE COMBUSTIBLE (BIOMASSE)



$$\text{Rendement thermique de la chaudière} = \frac{\text{Énergie récupérée par la vapeur}}{\text{Énergie fournie par la Biomasse}}$$

## POUVOIR CALORIFIQUE D'UN COMBUSTIBLE

### **PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur (kJ/kg)**

Pouvoir calorifique : transformation de l'énergie chimique en énergie thermique

Pouvoir Calorifique Supérieur : La vapeur d'eau des gaz brûlés est condensée

Le PCS représente la limite supérieure de l'énergie que l'on peut récupérer !

$$\text{PCS de la Biomasse} = 19\,035 \text{ kJ/kg}$$

Énergie totale alimentée à la chaudière par le combustible :

$$\dot{Q}_{\text{BM}} = \dot{m}_{\text{BM}} \times \text{PCS}$$

$\dot{m}_{\text{BM}}$  : Débit massique de Biomasse (kg/s)

Le terme  $\dot{Q}_{\text{BM}}$  représente 100 % de l'énergie entrante à la Chaudière

Mais ce n'est pas toute l'énergie entrante dans le système

# MESURE EN LABORATOIRE DU : PCS

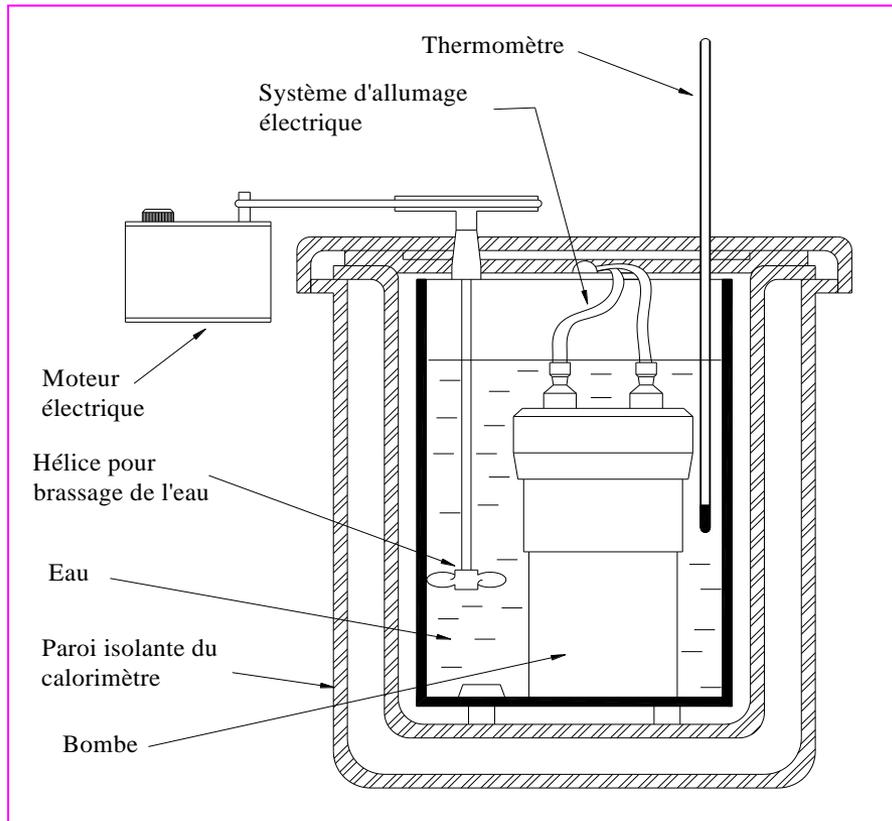
## Calorimètre à Volume constant :

Pour les solides :

Charbon - Bois - Céréales - Viande ....

Pour les liquides :

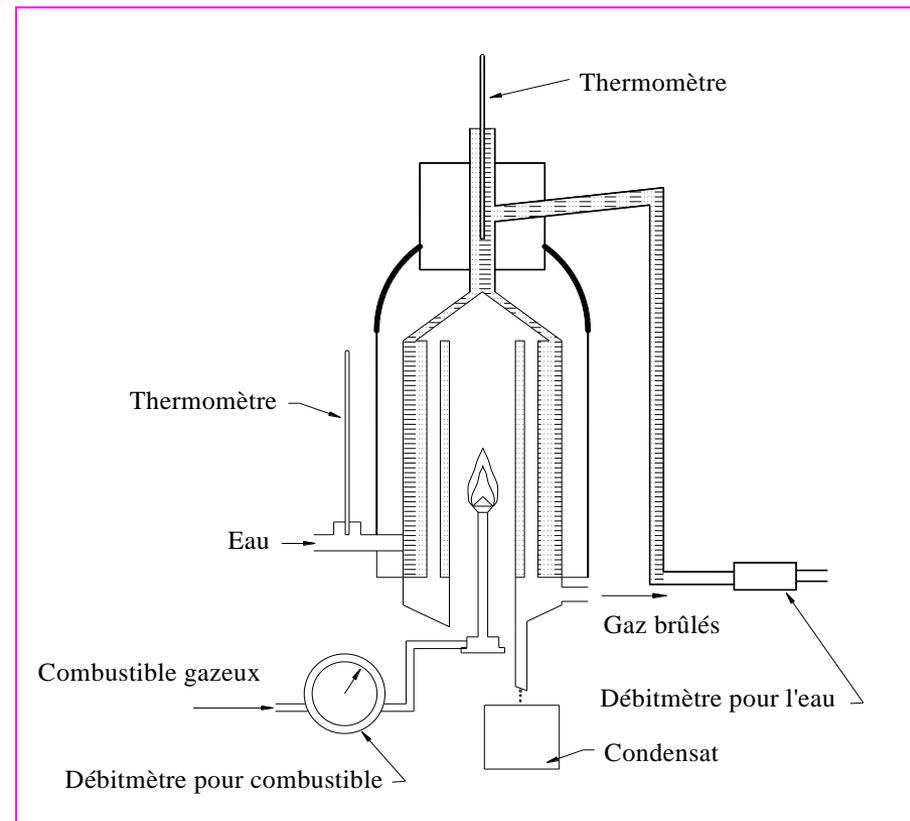
Essence - Alcools - Huile végétale ....



## Calorimètre à Pression constante :

Pour les gaz :

Gaz naturel - Gaz de ville - Propane ....



# TABLEAU DES DONNÉES À UTILISER

POINT	NOM	CARACTÉRISTIQUES	DÉBIT	P*	T	TITRE
			(kg / s)	( kPa )	( °C )	( - )
1	Entrée de l'eau d'appoint	Liquide	25.37	200	15	
2	Retour condensat des Utilisateurs	Liquide	23.62	200	100	
3	Entrée de condensat à la Pompe # 1	Liquide				
4	Sortie de la Pompe # 1	Liquide		240		
5	Entrée vapeur au Dégazeur	Vapeur	7.86			
6	Sortie du Dégazeur	Liquide		238		
7	Entrée de la Pompe # 2	Liquide				
8	Sortie de la Pompe # 2	Liquide		9650		
9	Entrée eau à l'Économiseur	Liquide				
10	Sortie eau de l'Économiseur	Liquide		9600	256	
11	Eau de Chaudière	Liquide saturé		8620		0
12	Vapeur sortant du ballon supérieur	Vapeur saturée		8620		1
13	Entrée de la vapeur à la Turbine	Vapeur surchauffée		8600	460	
14	Extraction de vapeur	Vers utilisation HP	18.06	1415		
15	Sortie Basse Pression de la Turbine	Vers utilisation BP & Dégazeur		274		
16	Entrée utilisation Haute Pression (HP)			1415		
17	Entrée utilisation Basse Pression (BP)			240		
18	Entrée Pompe # 3 vers utilisation HP		0.97			
19	Sortie Pompe # 3 vers utilisation HP			1415		
20	Entrée du Rebouilleur PTM	Liquide	15.27			
21	Sortie du Rebouilleur PTM	Vapeur saturée		240		1
22	Gaz Brûlés après le Surchauffeur	Gaz Brûlés		10	597	
23	Gaz Brûlés après le Réchauffeur d'air	Gaz Brûlés		8	453	
24	Gaz Brûlés après l'Économiseur	Gaz Brûlés vers la cheminée		5	172	
25	Atmosphère	Gaz Brûlés aux conditions atm.		0	5	
26	Entrée d'air au Ventilateur	Air froid		0	5	
27	Sortie d'air du Ventilateur	Air froid d'alimentation		15	6	
28	Sortie de l'air du Réchauffeur d'air	Air chaud		10	196	
29	Entrée de la Biomasse (Fuel)	Matière sèche combustible	7.917			

## DONNÉES IMPORTANTES :

\*Toutes les pressions sont en valeur **manométrique**

Pression barométrique de référence = 101.3 kPa

Hauteur séparant le Dégazeur de l'entrée de la Pompe # 2 .....  $Z = 35$  m

Rendement de la première section de la Turbine ( avant l'extraction # 1 ) = 79 %

Rendement de la deuxième section de la Turbine ( avant l'extraction # 2 ) = 83 %

Rendement de la Pompe # 1 = 88 %

Rendement de la Pompe # 2 = 85 %

Rendement de la Pompe # 3 = 85 %

Rapport massique « Air / Combustible » :  $AF = 7.5913$  (kg Air / kg Combustible)

Rendement de l'Alternateur = 96 %

Pouvoir calorifique supérieur de la biomasse (PCS) = 19 035 kJ/kg

Besoin énergétique pour les ventilateurs :

Ventilateur # 1 = 252 kW    Ventilateur # 2 = 271 kW

Besoins énergétiques pour les autres services de la centrale : 500 kW

### Composition des gaz brûlés ( % Volumétrique = % Molaire ) :

ESPÈCE GAZ BRÛLÉS	CONCENTRATION (%)
CO <sub>2</sub>	13.9
H <sub>2</sub> O	9.64
N <sub>2</sub>	72.0
O <sub>2</sub>	4.47

## HYPOTHÈSES ADDITIONNELLES (au-delà de celles des travaux #3 et # 4) :

- Les pertes dans les moteurs électriques des pompes sont négligeables (puissance électrique consommée par la pompe égale à puissance sur fluide à travers la pompe)
- Le réservoir thermique chaud ( $T_H$  du cycle Carnot) est à la plus haute température connue (donnée) des gaz brûlés

### NOTE :

La vapeur d'eau contenue dans les gaz brûlés se condensera à la sortie de la cheminée, cette énergie latente est non récupérée et doit être considérée comme une **perte**. Ce qui justifie le fait d'utiliser le PCS comme base de comparaison pour évaluer le rendement.

## TRAVAIL À FAIRE APRÈS LA RENCONTRE # 6

À partir des paramètres thermodynamiques, principalement la température, l'enthalpie et l'entropie pour chaque point, **vous devez calculer** :

- La puissance électrique utilisée par les trois Pompes :  **$W_{\text{dot\_Pompe}}$**  (kW)
- La puissance mécanique brute de la Turbine avec irréversibilités :  **$W_{\text{dot\_Turbine}}$**  (kW)
- La puissance nette du cycle Rankine :  **$W_{\text{dot\_Rankine}}$**  (kW)
- Le rapport de puissance des Pompes sur la puissance de la Turbine :  
**Rapport\_Pompe\_Turbine (%)**
- La puissance électrique utilisée par les deux Ventilateurs :  **$W_{\text{dot\_Ventilateur}}$**  (kW)
- La puissance électrique brute produite par l'Alternateur :  **$W_{\text{dot\_Alternateur}}$**  (kW)
- La puissance électrique nette vendue à Hydro-Québec :  **$W_{\text{dot\_Réseau}}$**  (kW)
- La chaleur fournie à l'eau par la Chaudière :  **$Q_{\text{dot\_Chaudière}}$**  (kW)
- La chaleur fournie à l'eau par l'Économiseur :  **$Q_{\text{dot\_Économiseur}}$**  (kW)
- La chaleur récupérée par le Rebouilleur PTM :  **$Q_{\text{dot\_PTM}}$**  (kW)
- L'énergie thermique fournie par l'eau d'Appoint  **$Q_{\text{dot\_Appoint}}$**  (kW)
- L'énergie thermique fournie aux Utilisateurs (machines à papier) :  **$Q_{\text{dot\_Utilisateur}}$**  (kW)
- La chaleur fournie à l'air par le Réchauffeur :  **$Q_{\text{dot\_Réchauffeur}}$**  (kW)

## TRAVAIL À FAIRE APRÈS LA RENCONTRE # 6 (suite)

- L'énergie utile totale de la centrale:  **$E_{\dot{U}} \text{ (kW)}$**
- La masse moléculaire moyenne des Gaz Brûlés (kg/kmol)
- Le débit massique total des Gaz Brûlés :  **$m_{\dot{GB}} \text{ (kg/s)}$**
- L'enthalpie pondérée des Gaz Brûlés aux points 22 - 23 - 24 - 25 :  $h_{GB[xx]} \text{ (kJ/kg)}$
- Le bilan énergétique appliqué à l'Économiseur : **Bilan\_Économiseur (kW)**
- Le bilan énergétique appliqué au Réchauffeur d'air : **Bilan\_Réchauffeur (kW)**
- L'énergie fournie par le combustible (Biomasse) :  **$Q_{\dot{Fuel}} \text{ (kW)}$**
- L'énergie perdue par les Gaz brûlés :  **$Q_{\dot{Pertes\_GB}} \text{ (kW)}$**  et **Pertes\_GB (%)** (de l'énergie fournie par le combustible)
- Le rendement thermique de la Chaudière : **eta\_Chaudière (%)**
- Le rendement du cycle de Carnot : **eta\_Carnot (%)** (à réviser avec nouvelle valeur de  $T_H$ )
- Le rendement du cycle Rankine avec irréversibilités : **eta\_Rankine (%)**
- Le rendement électrique global de la centrale : **eta\_Centrale (%)**
- Le débit massique de CO2 produit par la centrale par année :  **$m_{\dot{CO2}} \text{ (kg/year)}$**

Marquer les **variables globaux en gras** comme *key variables* dans EES

## NOTES :

- Calcul de l'énergie utile et du rendement électrique global de la centrale:

$$E_{\text{dot}}_{\text{Utile}} = W_{\text{dot}}_{\text{Réseau}} + Q_{\text{dot}}_{\text{Utilisateur}}$$

$$\eta_{\text{Centrale}} = (W_{\text{dot}}_{\text{Réseau}} / Q_{\text{dot}}_{\text{Fuel}})$$

Note:  $Q_{\text{dot}}_{\text{PCM}}$  n'entre pas dans le calcul de  $W_{\text{dot}}_{\text{Réseau}}$

- Calcul du bilan énergétique de l'Économiseur:

$$\text{Bilan}_{\text{Économiseur}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Gains de chaleur de} \\ \text{l'eau à l'Économiseur} \\ \text{entre les Points 9 et 10} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Pertes de chaleur des} \\ \text{Gaz Brûlés entre les} \\ \text{Points 23 et 24} \end{array} \right\}$$

- Calcul du bilan énergétique du Réchauffeur d'air:

$$\text{Bilan}_{\text{Réchauffeur}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Gains de chaleur de} \\ \text{l'air au Réchauffeur} \\ \text{entre les Points 27 et 28} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Pertes de chaleur des} \\ \text{Gaz Brûlés entre les} \\ \text{Points 22 et 23} \end{array} \right\}$$