MEC1210 - THERMODYNAMIQUE
PROJET

RENCONTRE # 3
CYCLE RANKINE AVEC DÉGAZEUR

PROCÉDURE DE REMISE DU TRAVAIL

1) Il est demandé aux étudiants de déposer le programme EES dans le site **Moodle** avant la prochaine rencontre du projet.

2) On vous demande de nommer le fichier contenant le programme EES en utilisant le **numéro matricule** des 2 étudiants de l'équipe et en les séparant par un tiret (le plus petit numéro en premier).

   Exemple : 2222222-3333333.EES

3) Vous devez déposer **un seul fichier** par équipe de 2 étudiants.

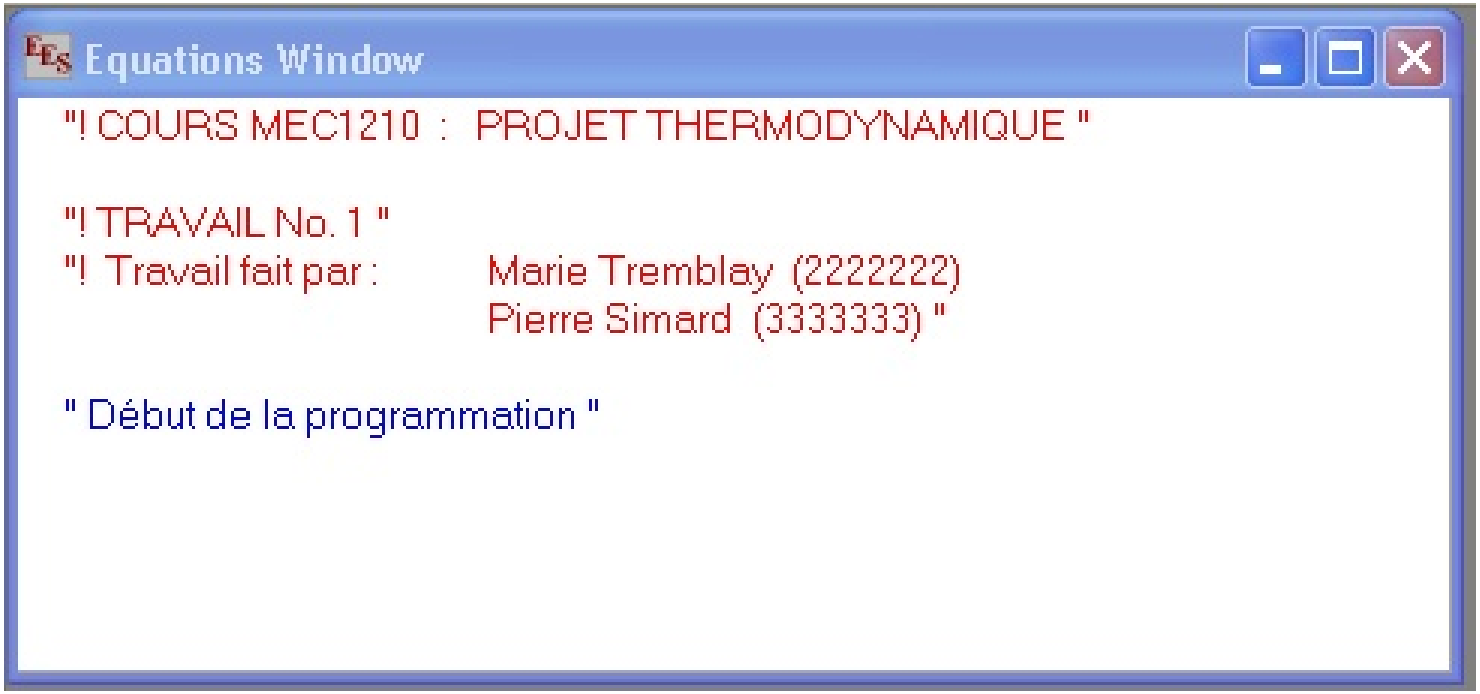
4) Pour les étudiants qui n'auront pas fait cette tâche, ils se verront **retirer 1 point** sur la note globale du projet (20 points).

5) Assurez vous que le programme EES **fonctionne** correctement (permette le calcul)

6) Vérifiez les **dates et heures limites** du dépôt !!

IDENTIFICATION DU TRAVAIL

Au début du programme EES vous devez vous identifier afin d'éviter les erreurs. Méthode proposée :



NOTION DE RENDEMENT THERMIQUE

Rendement du cycle de Carnot :

$$\eta_{th,Ca} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

~ T Entrée de l'eau d'appoint

~ T Entrée turbine

Rendement du cycle Rankine :

$$\eta_{th,Ra} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

Bilan énergétique d'un appareil (Dégazeur) :

$$\Delta \text{ Énergie} = \text{Énergie entrante} - \text{Énergie sortante}$$

$$\Delta\text{Énergie} = \left(\sum \dot{m} \cdot h\right)_{entrée} - \left(\sum \dot{m} \cdot h\right)_{sortie}$$

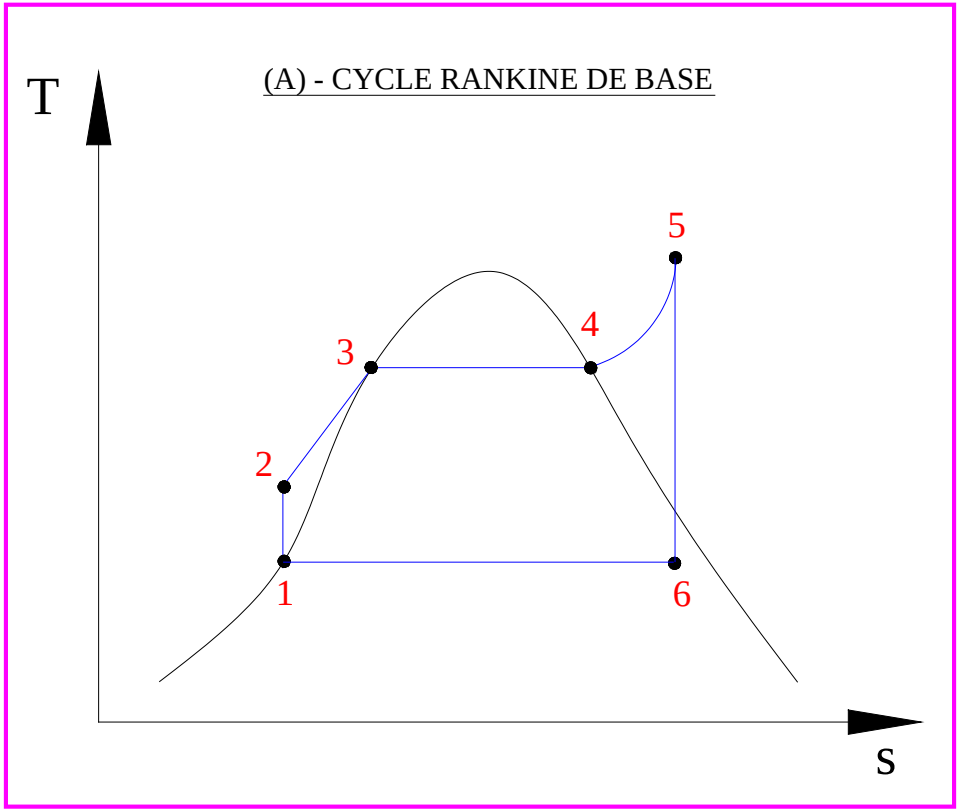
CYCLE RANKINE ÉLÉMENTAIRE

QUESTION :

Comment augmenter le rendement du cycle Rankine ?

RÉPONSE :

Il y a plusieurs approches



A) Augmentation du rendement par :

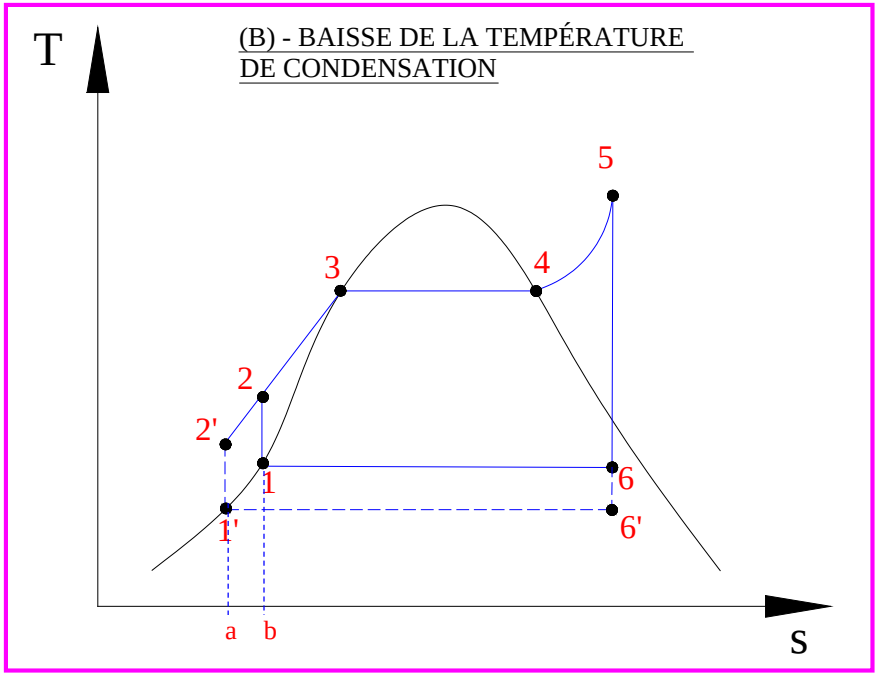
Baisse de la température de condensation !

Si : $P_{6'} < P_6$

→ **Alors :** $\mathbf{x_{6'} < x_6}$

Il y aura alors plus d'humidité dans la vapeur et plus de risque de dommage aux pales de la turbine

Cette humidité fait diminuer le rendement de la turbine (η_T)



Surface (6 – 6' – 1' – 2' – 2 – 1) ------> Augmentation du travail net

Surface (a – 2' – 2 – b) ----------> Augmentation de la chaleur fournie

B) Augmentation du rendement par :

Augmentation de la température à l'entrée de la turbine !

SURFACE (5–5'–6'–6) :

Augmentation de la chaleur fournie

Donc augmentation de η_{net}

EFFET :

Diminution de l'humidité dans la turbine

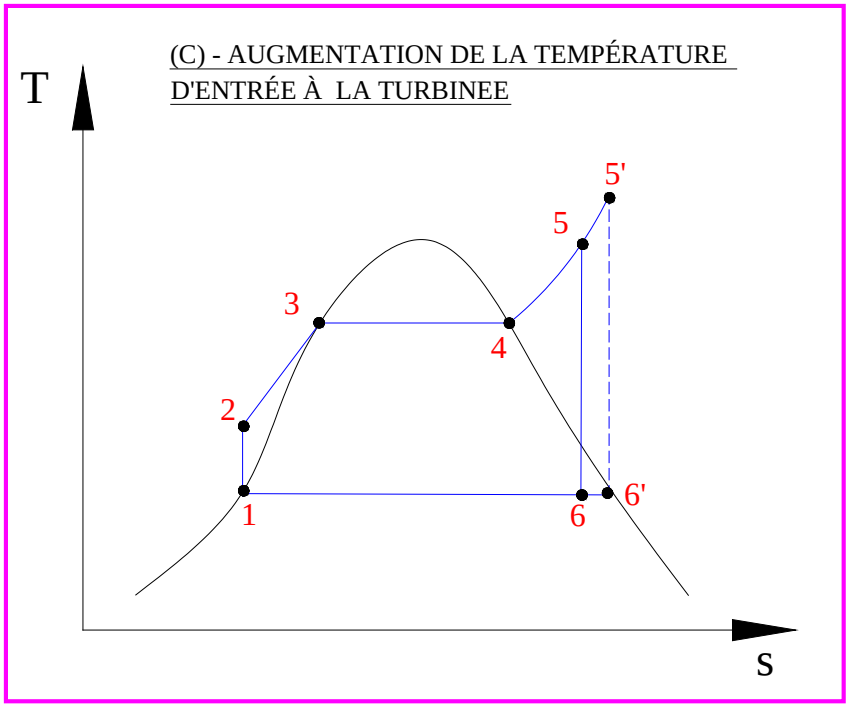
$$x_{6'} > x_6$$

Ce qui est un avantage !

PROBLÈME :

La température est limitée par la résistance des métaux.

Actuellement la limite est d'environ 620 °C (893 K) pour les centrales classiques



C) Augmentation du rendement par :

Augmentation de la pression de fonctionnement de la chaudière !

Si : $T_{5'} = T_5$ et $P_{6'} = P_6$

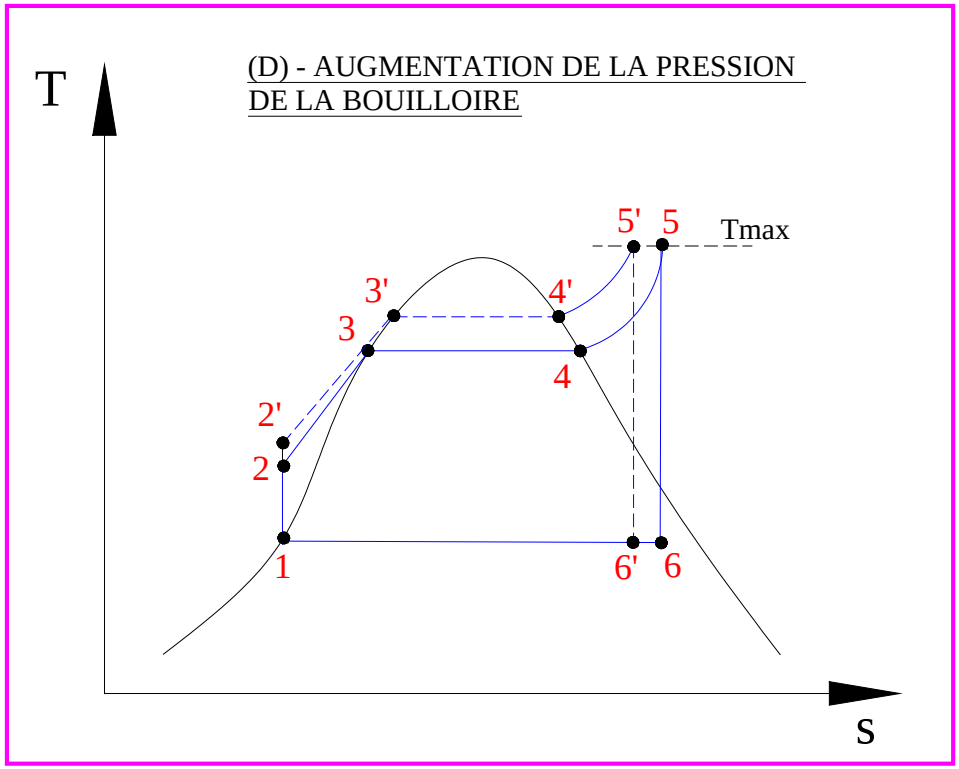
Et si : P_3 augmente

Alors : T_3 augmente

et η_{net} augmente

Mais : $x_{6'} < x_6$

Effet indésirable !!



SOLUTION :

Aucun des cas (A) – (B) – (C) n'est idéal.
Il faut chercher une autre modification du cycle !

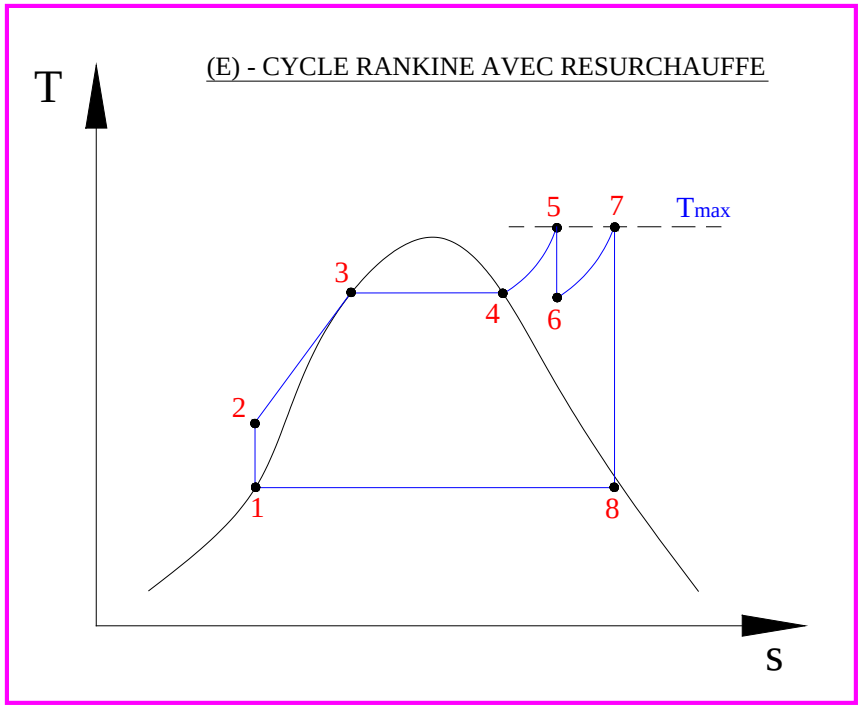
RESURCHAUFFE :

Il faut utiliser 2 turbines :

Haute pression (HP)

Basse pression (BP)

Donc il faut faire repasser la vapeur dans la chaudière (d'où le nom du cycle)



AVANTAGES :

Ce cycle permet d'augmenter la pression d'opération de la turbine HP sans baisser le titre de la vapeur à la fin de la détente.

Cette approche est utilisée dans les centrales de grande puissance, mais n'est pas justifiée dans le cas de la centrale Bowater (lien entre puissance et coûts)

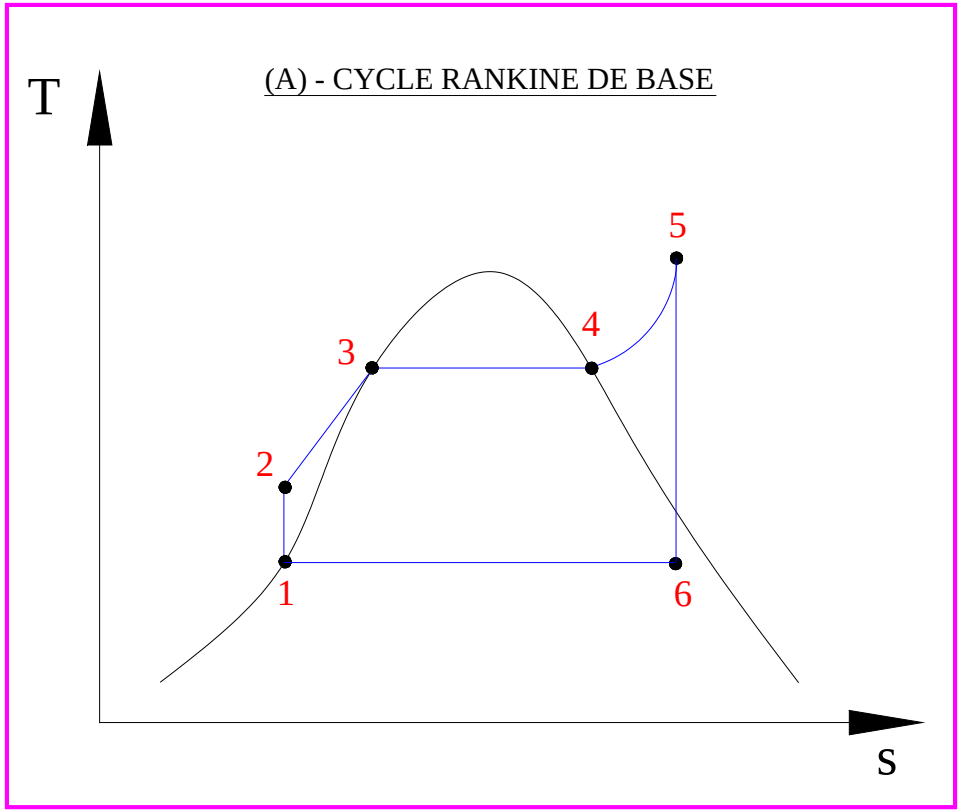
CYCLE RANKINE AVEC RÉGÉNÉRATION

Autre façon d'augmenter le rendement du cycle Rankine :

Augmenter la température moyenne de l'eau d'alimentation de la chaudière !

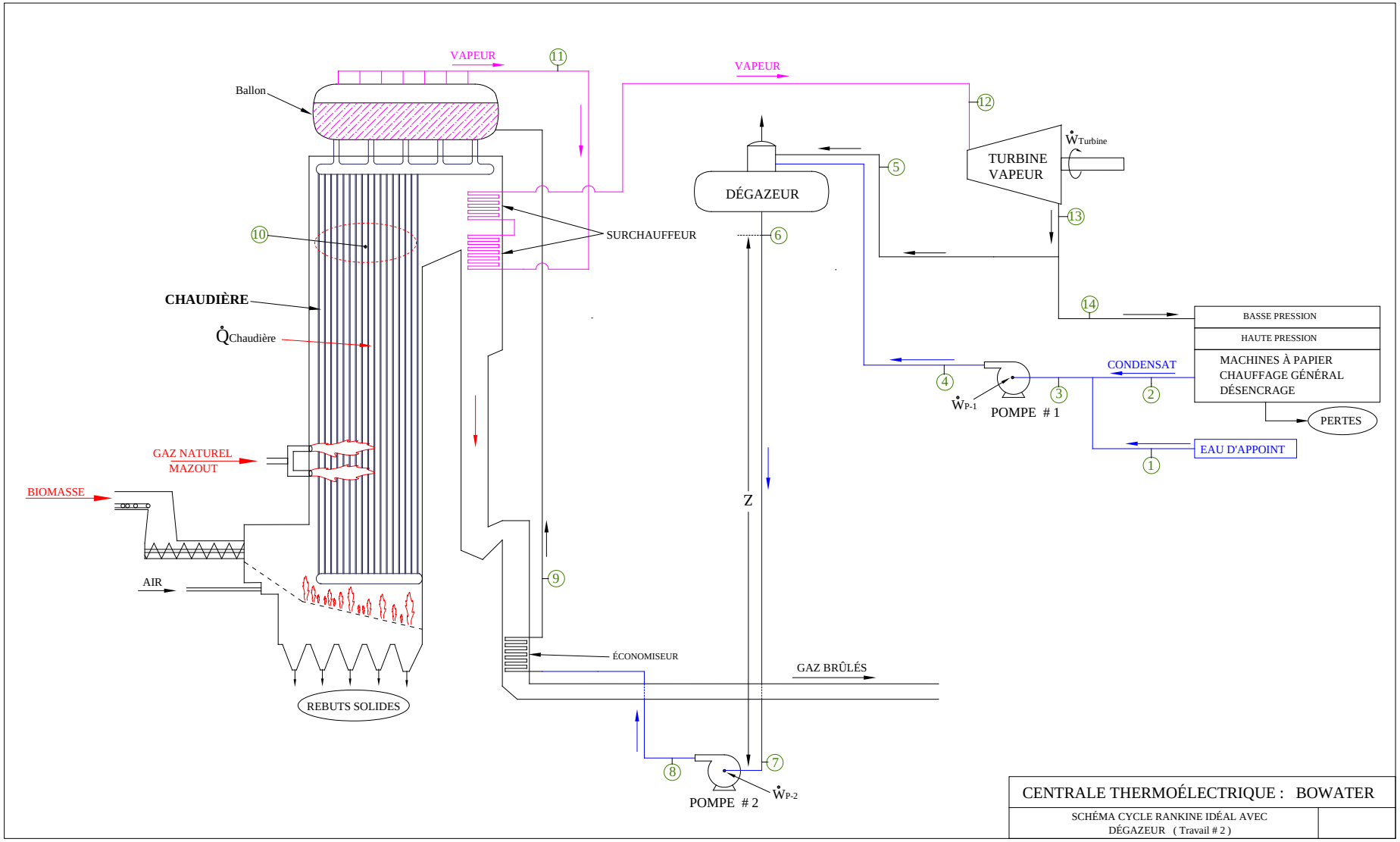
Point 2 : entrée de l'eau dans la chaudière.

Comment augmenter la T de ce points puisque qu'il n'est pas dans la chaudière ??



ATTENTION : La numérotation des points ne correspond pas au cycle analysé de la centrale Bowater

APPROCHE : CYCLE RANKINE AVEC DÉGAZEUR



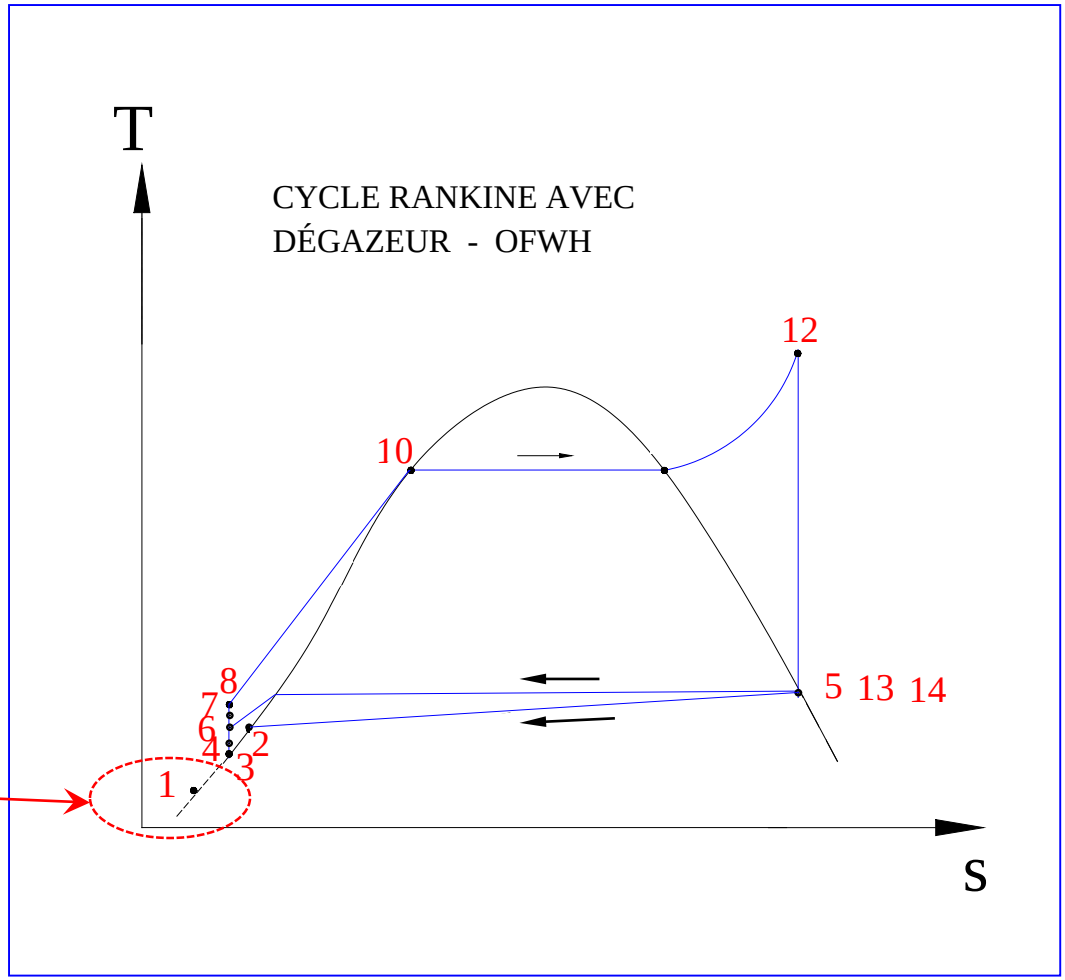
CYCLE RANKINE AVEC DÉGAZEUR : DIAGRAMME T-S

HYPOTHÈSES :

Turbine :
détente isentropique

Pompes :
travail isentropique

Entrée eau d'appoint
(froide)



ATTENTION: Ce diagramme T-s pas entièrement représentatif du cycle de Bowater

DESCRIPTION FONCTIONNEMENT : DÉGAZEUR

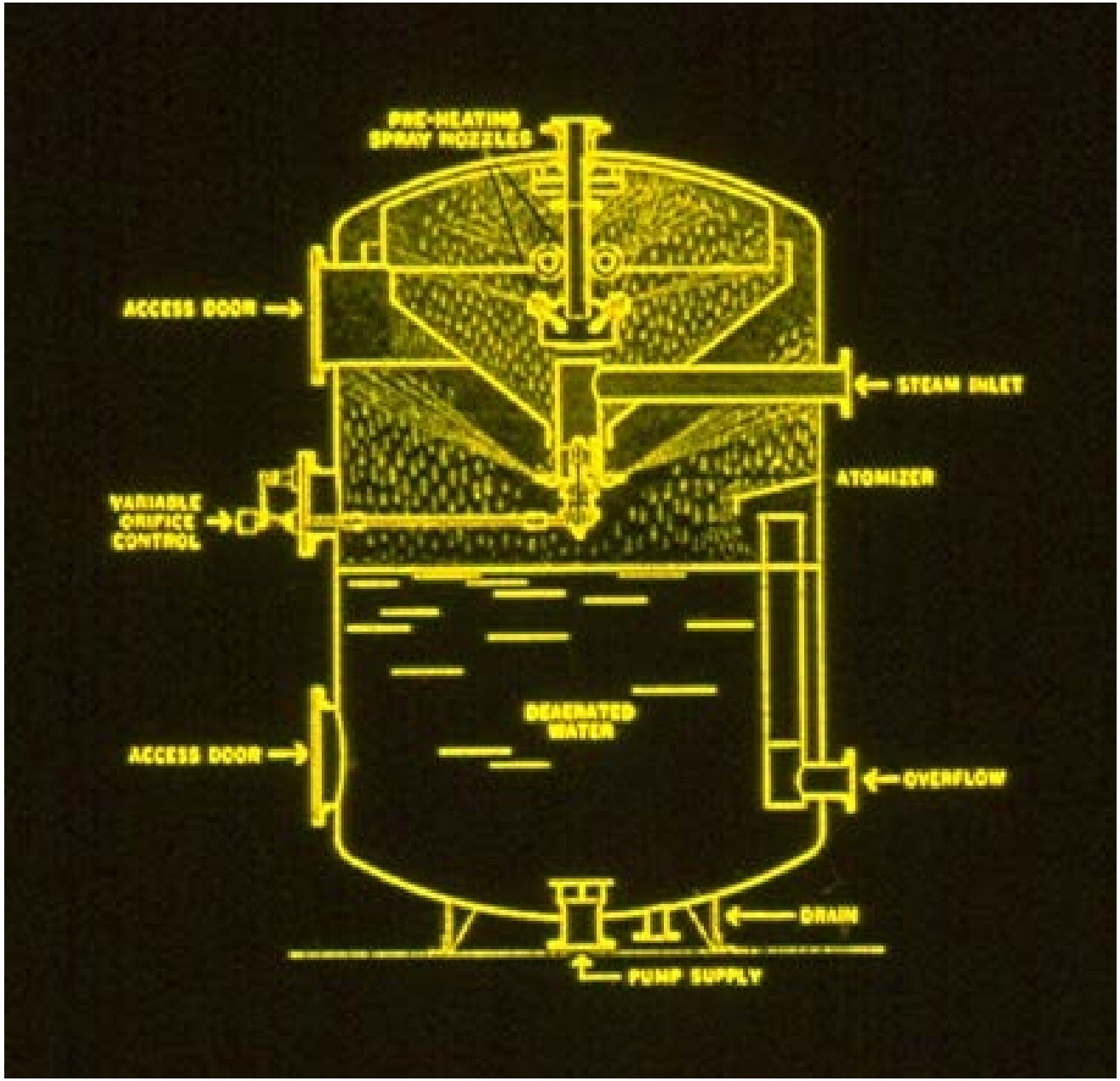
1) Une faible portion de la vapeur est soutirée de la turbine après une détente partielle ou totale
2) Cette vapeur est introduite dans le Dégazeur
3) Le reste de la vapeur termine son chemin et passe par les machines à papier pour devenir liquide
4) Ce condensat est pompé dans le Dégazeur où il est mélangé avec la vapeur soutirée
5) La quantité de vapeur fournie permet d'amener le liquide condensé au niveau de la saturation et à une pression intermédiaire plus faible que la pression de la chaudière. Ceci facilite le dégazage
6) Une autre pompe est nécessaire pour remonter la pression au niveau désiré
7) Ce système permet de retirer l'oxygène de l'eau pour protéger la tubulure de la chaudière et la turbine de la corrosion

DÉGAZEUR : VUE DE L'EXTÉRIEUR

Dégazeur

Réservoir

DÉGAZEUR : VUE DE L'INTÉRIEUR



LOI DE HENRY

Les gaz peuvent être solubles dans les liquides :

CO_2 dans des boissons gazeuses
CO_2 dans le Champagne
N_2 dans le sang

ÉQUATION DE SOLUBILITÉ :

$$P_A = k_H \, y_A$$

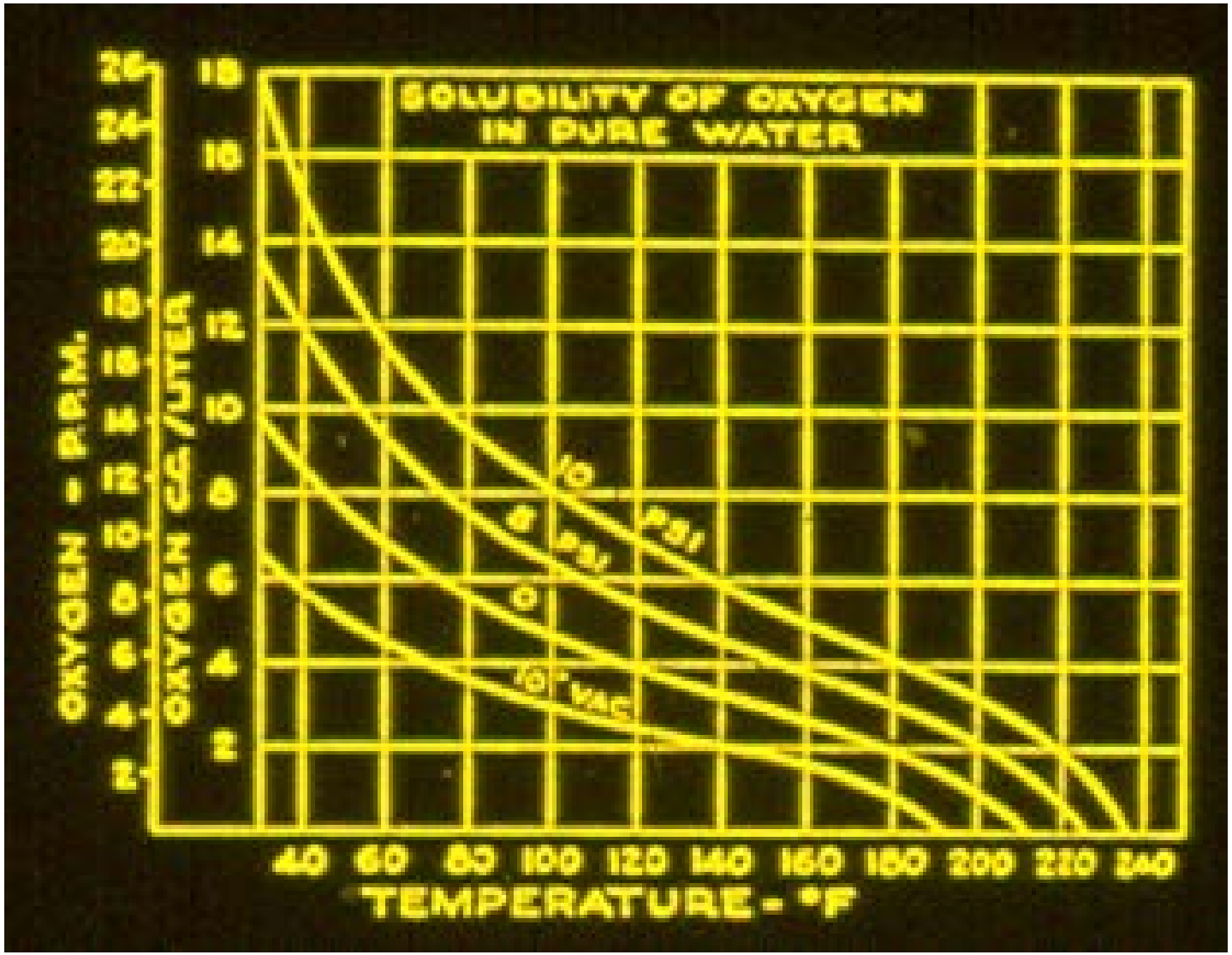
P_A : pression partielle du gaz au dessus du liquide

k_H : constante de Henry , fonction du type de liquide et du type de gaz

y_A : fraction molaire du gaz en solution dans le liquide

SOLUBILITÉ DU O_2 DANS DE L'EAU : FONCTION DE

- PRESSION
- TEMPÉRATURE



RAPPEL

VARIATION DE PROPRIÉTÉS À TRAVERS COLONNE D'EAU

i) Enthalpie:

Équation de conservation de l'énergie entre les points [6] et [7] :

$$\cancel{\dot{Q}} - \cancel{\dot{W}} = \dot{m} \cdot (h_7 - h_6) + \dot{m} \cdot g \cdot (Z_7 - Z_6)$$

Hypothèse : Évolution adiabatique, sans travail $\dot{Q} = 0$ et $\dot{W} = 0$

$$\dot{m} \cdot (h_7 - h_6) = \dot{m} \cdot g \cdot (Z_6 - Z_7) = \dot{m} \cdot g \cdot \Delta Z$$

$$h_7 = h_6 + g \cdot \Delta Z$$

Ne pas oublier la conversion des unités (J à kJ)

ii) Pression: $P_7 = P_6 + \rho \cdot g \cdot \Delta Z$ (ρ: fonction 'Density' dans EES)

Ne pas oublier la conversion des unités (Pa à kPa)

TRAVAIL DEMANDÉ APRÈS LA 3e RENCONTRE

Terminer le **programme EES de calcul** des paramètres thermodynamiques du cycle Rankine avec Dégazeur en supposant que les évolutions sont isentropiques pour les pompes et la turbine. Vous devez utiliser les données suivantes :

POINT	NOM	ÉTAT	DÉBIT	P*	T	TITRE
			(kg / s)	(kPa)	(°C)	(-)
1	Entrée de l'eau d'appoint	Liquide	25.37	200	15	
2	Retour du condensat des Utilisateurs	Liquide	23.62	200	100	
3	Mélange des fluides de 1 et 2	Liquide				
4	Sortie de la Pompe # 1	Liquide		240		
5	Extraction de vapeur	Mélange diphasique	7.86			
6	Sortie du Dégazeur	Liquide		238		
7	Entrée de la Pompe # 2	Liquide				
8	Sortie de la Pompe # 2	Liquide comprimé		9650		
9	Sortie de l'Économiseur	Liquide comprimé		9600	256	
10	Point de transition Liquide – Vapeur	Liquide		8620		0
11	Sortie du Ballon	Vapeur saturée		8620		1
12	Entrée de la Turbine	Vapeur surchauffée		8600	460	
13	Sortie de la Turbine	Mélange diphasique		274		
14	Entrée Utilisateurs	Mélange diphasique				

NOTES IMPORTANTES :

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

Pression barométrique de référence = **101.3 kPa**

Hauteur séparant le Dégazeur de la Pompe # 2 (point [6] à [7]) ……. Z = 35 m

Pour être plus exact, utiliser g = 9.807 m/s^2 (au lieu de 9.81) ou simplement g# dans EES

TRAVAIL À FAIRE : Hypothèses à utiliser

1) Le régime est permanent
2) Les pertes de pression par frottement dans les conduites sont négligées, sauf où la pression a été mesurée
3) Les pertes de chaleur sont négligées
4) La détente de la vapeur dans les turbines se fait selon une évolution isentropique
5) L'augmentation de pression par les pompes se fait selon une évolution isentropique
6) La condensation de la vapeur se fait au niveau des machines à papier (Utilisateur)
7) La perte de chaleur du dégazeur à l'environnement est négligeable
8) L'eau perdue par les machines à papier a les mêmes propriétés thermodynamiques que le condensat qui sort de ces machines

NOUVEAUX ÉLÉMENTS DU CYCLE :

a) Une extraction de vapeur de la Turbine pour alimenter le Dégazeur
b) Deux pompes : Haute (# 2) & Basse pression (# 1)
c) Un Dégazeur
d) Soutirage de la vapeur de la Turbine pour alimenter le Dégazeur

TRAVAIL À FAIRE (SUITE)

Calculer :

- La chaleur fournie par la chaudière et par l'économiseur : **Q_dot_Vapeur** (en kW)
- L'énergie utilisée par les machines à papier : **Q_dot_Utilisateur** (en kW)
- L'énergie entrant au système par l'eau d'appoint : **Q_dot_Appoint** (en kW)
- La puissance brute produite par la turbine : **W_dot_Turbine** (en kW)
- La puissance utilisée par les 2 pompes : **W_dot_Pompe** (en kW)
- La puissance nette du cycle Rankine (puissance mécanique de la turbine moins puissance des pompes HP et BP) : **W_dot_Rankine** (en kW)
- Le rapport de la puissance utilisée par les pompes sur la puissance produite par la turbine: **Rapport_Pompe_Turbine** (en %)
- Le rendement thermique du cycle Rankine avec Dégazeur : **eta_Rankine** (en %)
- Le rendement du cycle de Carnot correspondant : **eta_Carnot** (en %)

NOTES :

1) Utiliser les **noms de variables** présentés **en gras** ci-dessus pour les paramètres globaux à calculer dans votre programme
2) Pour être en mesure de calculer les conditions à la sortie du Dégazeur, il faut faire un bilan d'énergie sur cet équipement
3) Les propriétés thermodynamiques des points [5], [13] et [14] sont les mêmes

TRAVAIL À FAIRE (SUITE)

Construire le diagramme (T – s) (température - entropie)
du cycle Rankine avec 1 Turbine, 1 Extraction, 2 Pompes et un Dégazeur

Ne pas oublier que la construction de ce diagramme nécessite que les paramètres soient sous forme de vecteurs (ex : T[2]).

Construire un Tableau Paramétrique :

- Faire varier la température à l'entrée de la turbine TC_12 :
  TC_12 = 400 - 420 - 440 - 460 - 480 - 500 (°C)
- Calcul de la puissance de la Turbine
- Calcul du rendement thermique du cycle Rankine
- Utiliser l'instruction suivante dans votre programme EES :

```
$IFNOT ParametricTable
        TC_12 = Lookup('Données' , 12 , 'T' )
$ENDIF
```

Construction du Graphique X-Y représentant :

- Sur l'axe des X : la variation de la température TC_12 (en °C)
- Sur l'axe des Y à gauche : La variation de la puissance de la Turbine
- Sur l'axe des Y à droite : La variation du rendement du cycle Rankine