

MCG 2531 THERMODYNAMIQUE II

Chapitre 9 - Cycles de puissance à vapeur *Partie 1 - Le cycle de Rankine*

I- Comment procède-t-on pour l'analyse des cycles de puissance ? ☐

- 1- Cycle réel vs cycle simplifié ☐
- 2- Analyse thermodynamique ☐

II- Qu'est-ce qu'une centrale thermique (système réel) ? ☐

- 1- Objectifs d'une centrale thermique ☐
- 2- Sous-systèmes d'une centrale thermique ☐
 - a) Cycle de puissance à vapeur ☐
 - b) Combustion ☐
 - c) Refroidissement (psychrométrie) ☐
 - d) Conversion travail-électricité ☐

III- Cycle de puissance idéal : Cycle de Carnot ☐

IV- Cycle de puissance simplifié: Cycle de Rankine (*cycle 1 et 2*) ☐

- 1- Schéma du système et hypothèses ☐
- 2- Analyse thermodynamique ☐
 - a) Compréhension des opérations du cycle (bilans) ☐
 - b) Détermination des performances (rendement) ☐
 - c) Concept de température moyenne de chauffage ☐
 - c) Études de l'effet des paramètres d'opérations (P,T) ☐
 - d) Choix de design et réduction des simplifications ☐

Références: Chapitre 9 (Van Wylen, Sonntag, Desrochers, 2e édition), sections 9.1-9.2

Problèmes suggérés : (Réponses)

S-1 (756.6 Celsius, 4.82 kg/s)

S-2 (37%, $3.77 \cdot 10^5$ kg/hr, 270 MW, 170 MW, $7.3 \cdot 10^6$ kg/hr)

9.3 (36%, 34%, 28.6%, 25.5%, 0.78, 0.80, 0.86, 0.88)

9.4 (28.5%, 34%, 36%, 38%, 0.89, 0.80, 0.76, 0.71)

9.5 (34%, 36%, 42%, 0.80, 0.87, 0.97)

*La puissance ne consiste pas à frapper fort ou souvent,
mais à frapper juste.*

- Honoré de Balzac

Tout est cycle, cercle vicieux, éternel retour.

- Morgan Sportès

Chapitre 9 - Cycles de puissance à vapeur

Partie 1 - Le cycle de Rankine

Méthode d'analyse pour des cycles de puissance → cycle qui produit du travail ou de l'électricité

Système réel complexe

simplification

système simplifié

plus simple à analyser

analyse thermodynamique

- pertes de pression dans les tuyaux
- pas adiabatique
- pas réversible
- combustion incomplète

* Analyse thermodynamique

- 1^{ère} étape de la conception pour comprendre ce qui se passe
- Permet l'analyse des performances
- Permet l'étude des paramètres

Objectif:

- produire de l'électricité
- produire de la vapeur d'eau ou de l'eau chaude
- les deux (cogénération)

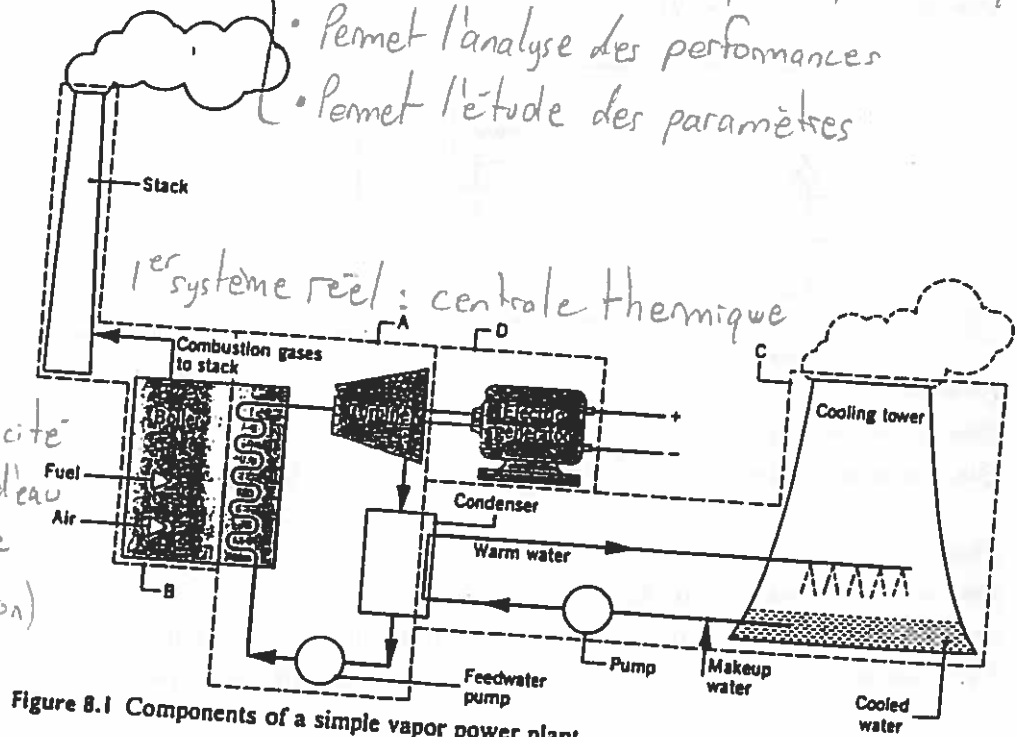


Figure 8.1 Components of a simple vapor power plant.

A) Conversion de l'énergie thermique en travail (cycle de puissance)

(chaudière) $Q_{in} \rightarrow W_{out}$ (turbine)

B) Fournir l'énergie nécessaire pour évaporer ou chauffer l'eau de la chaudière (combustion)

C) Fournir de l'eau froide au condenseur pour refroidir l'eau du cycle (psychrométrie)

D) Conversion du travail en électricité

Analyse de cycles de puissance - Rendement thermique

Mise en garde: Les lois de conservation présentées dans ce document sont sous une forme simplifiée ne s'appliquant qu'au cas particulier des cycles de Rankine. Comme déjà mentionné aux cours, il est plus prudent de refaire l'analyse complète que d'utiliser les formes simplifiées.

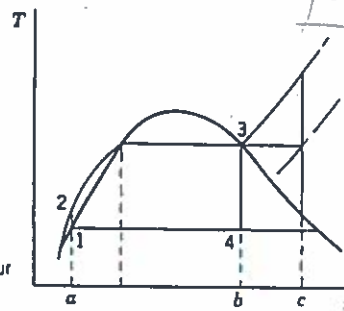
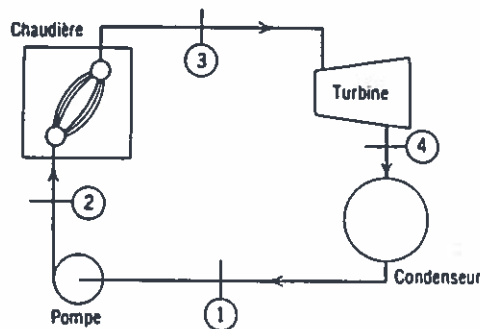
$$\text{Rendement thermique} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{Q}_c} \quad \oint \delta Q = \oint \delta W$$

Cycle 1

Cycle de Rankine de base

Pression à la chaudière (P_2): 2 Mpa

Pression au condenseur (P_1): 10 kPa



Pour Carnot: $\eta_{th} = 1 - \frac{Q_H}{Q_C} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

1→2: espèce de pompe compresse et adiabatique réversible

2→3: chauffage... réversible

3→4: turbine adiabatique réversible

4→1: refroidissement... réversible

Chaudière

Conservation de la masse: $\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}$

Conservation de l'énergie: $\dot{Q}_c = \dot{m} (h_3 - h_2)$ h_3 connue, h_2 inconnue

Pompe

Conservation de la masse: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

Conservation de l'énergie: $-\dot{W}_p = \dot{m} (h_2 - h_1)$ h_1 connue, h_2 inconnue

2^e me principe: $s_2 = s_1$ s_1 connue, trouve h_2 (avec s_2 et p_2)

Condenseur

Conservation de la masse: $\dot{m}_1 = \dot{m}_4 = \dot{m}$

Conservation de l'énergie: $\dot{Q}_F = \dot{m} (h_4 - h_1)$ h_1 connue, h_4 inconnue

Turbine

Conservation de la masse: $\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}$

Conservation de l'énergie: $\dot{W}_t = \dot{m} (h_3 - h_4)$ h_3 connue, h_4 inconnue

2^e me principe: $s_3 = s_4$ s_3 connue, trouve h_4 (avec s_4 et p_4)

Rendement = 30.3 % (vs 34.4% pour Carnot)

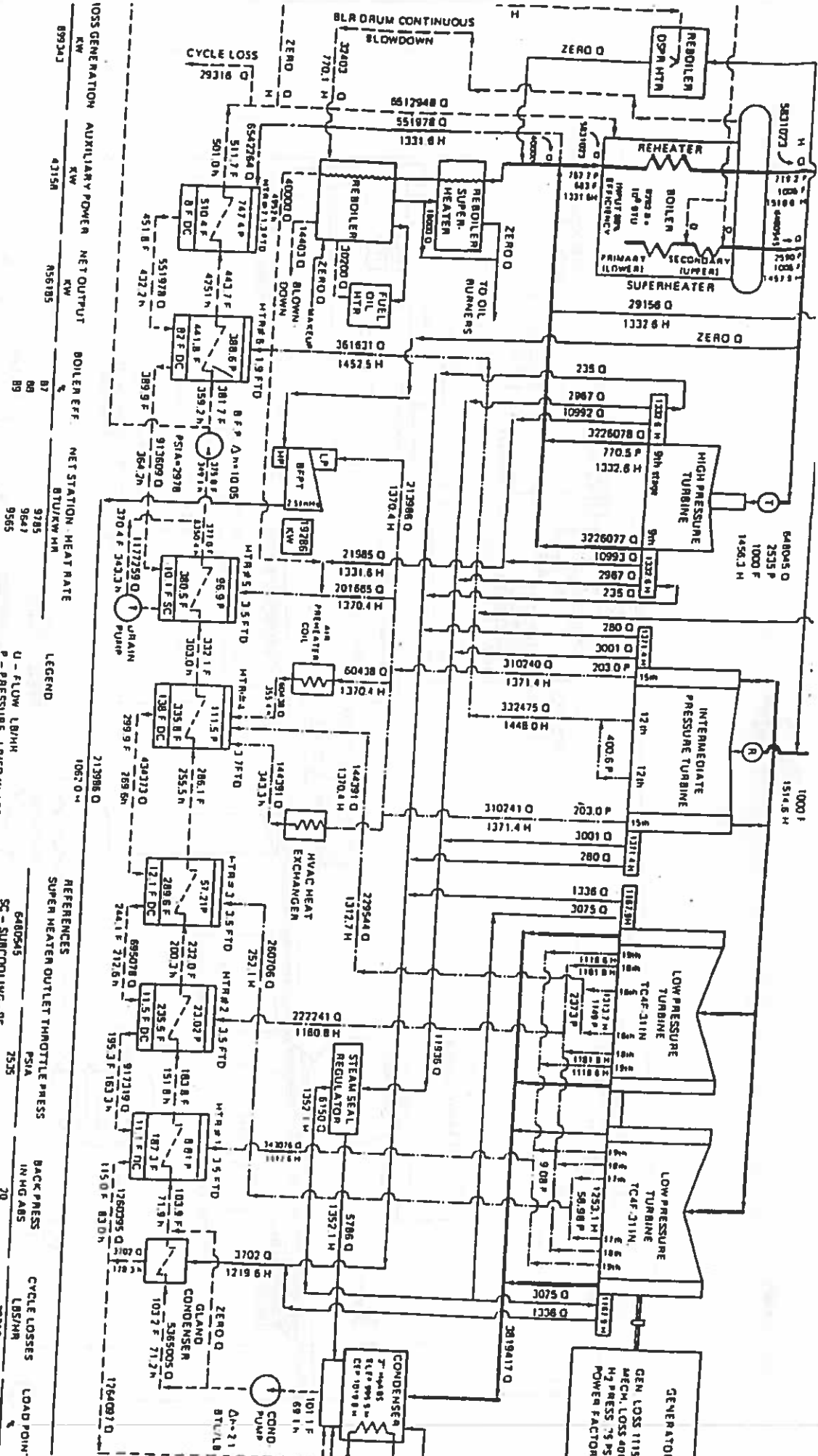


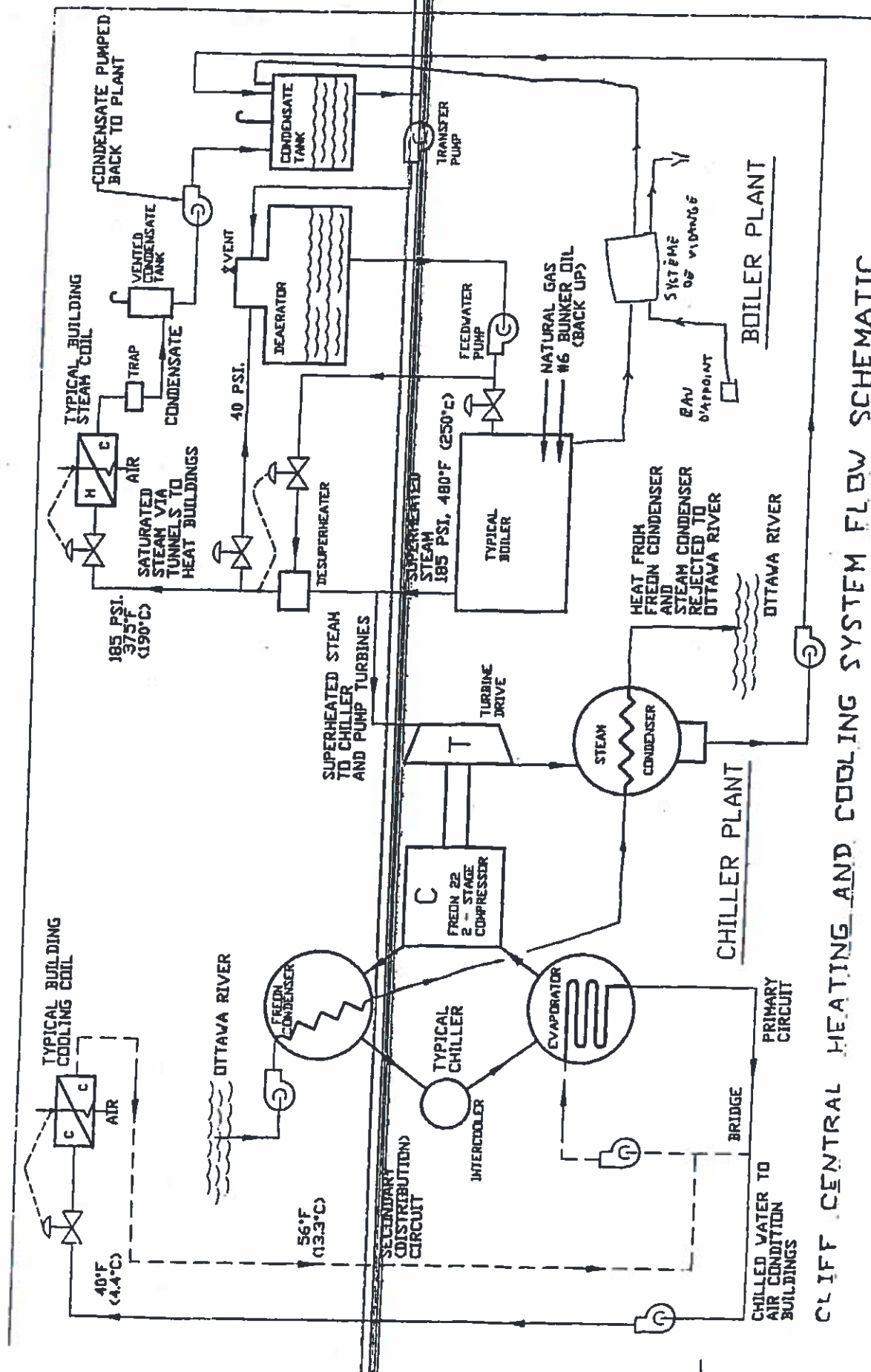
FIGURE 8.13 Heat balance for Charles F. Smith Power Project, Astoria, New York, at 110% load point.

(Numbers on the Power Auxiliary of New York.)

1055 GENERATION	AUXILIARY POWER	NET OUTPUT	BOILER EFF.	NET STATION HEAT RATE
89343	43158	856185	B7	9785
			B8	9647
			B9	9565

- LEGEND
- U - FLOW LB/MH
 - P - PRESSURE LB/ISO IN ABS
 - F - TEMPERATURE OF
 - M - ENTHALPY OF STEAM BTU/LB
 - FTD - ENTHALPY OF LIQUID - BTU/LB
 - OC - TERMINAL DIFFERENCE OF
 - DC - DRAIN COOLER APPROACH OF
 - M - REHEAT INTERCEPT VALVE

REFERENCES	SUPER HEATER OUTLET THROTTLE PRESS	BACK PRESS	CYCLE LOSSES	LOAD POW.
6400645	PSIA	IN HG ABS	LB57/M	
	7535	70	79316	110



(15)

Cycle de Rankine

Hypothèses: → pression constante dans la chaudière et le condenseur
 → ① est en liquide saturé
 → pompe et turbine réversibles

Analyse du cycle de Rankine

But: trouver q_{th} $q_{th} = \frac{|W_t| - |W_p|}{Q_c}$

Pompe: $\xrightarrow{①} \text{pompe} \xrightarrow{②}$ $P_1 = 10 \text{ kPa} \rightarrow P_2 = 2 \text{ MPa}$
 l. liquide sat

Hypothèses: a) ERP
 b) Réversible
 c) Adiabatique
 d) $\Delta E_p = 0 = \Delta E_c$

C. masse $\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s$
 $\dot{m}_e = \dot{m}_s$

1^{er} Principe simplifié: $W_p = m(h_e - h_s)$ $* h_e = 191,8 \text{ kJ/kg}$

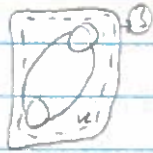
2^e Principe: $\frac{ds_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \sum (\dot{Q}/T) + \dot{S}_{gen}$

$$s_e = s_s$$

$$* h_e = 191,8 \text{ kJ/kg}$$

$$* h_s = 193,8 \text{ kJ/kg}$$

Enfin: $W_p/m = -d \text{ kJ/kg}$

Chaudière: 
 $P_3 = P_2$
 vap. sat

Hypothèses: a) ERP
 b) $\Delta E_p = 0 = \Delta E_c$
 c) $\dot{W}_c = 0$

C. masse: $\dot{m}_e = \dot{m}_s = m$

1^{er} Principe simplifié: $Q_{cv} = m(h_e - h_e)$

$$* h_e = 193,8 \text{ kJ/kg}$$

$$* h_s = h_g @ 2 \text{ MPa} = 2800 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_c/m = 2605,7 \text{ kJ/kg}$$

2^e Principe
 pour la chaudière

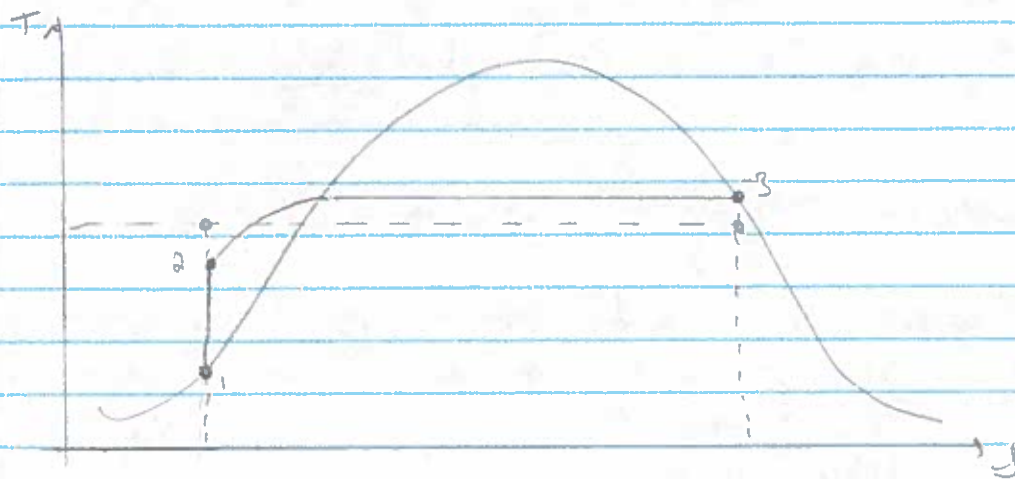
Hilroy

Concept de température moyenne de chauffage ...


2^e Principe: $dS_{\text{tot}}/dt = \sum \dot{m}_i s_{e,i} - \sum \dot{m}_j s_{f,j} + \sum \frac{\dot{Q}_k}{T} + \dot{S}_{\text{gen}}$

* SUPPOSER RÉVERSIBLE

$$T(s_s - s_e) = \frac{Q_{\text{rev}}}{\dot{m}} = \int_e^s T ds = \bar{T}_e^s (s_s - s_e)$$



\bar{T}_e^s : c'est la température moyenne à laquelle s'effectuerait l'échange de chaleur réversible entre les mêmes entropies.

Turbine:  $P_2 = 2 \text{ MPa, vapor}$
 $P_1 = 10 \text{ kPa}$

Hypothèses: a) ERP
 b) $\dot{Q}_{\text{ext}} = 0 = \dot{Q}_{\text{int}}$
 c) $\dot{Q}_{\text{ext}} = 0$
 d) Réversible

- Masse $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$

- 1^{er} Principe: $\dot{W}_T = \dot{m}(h_e - h_s)$
 $h_e = 2800 \text{ kJ/kg}$

- 2^e Principe $s_e = s_s$
 $s_e = 6.341 \text{ kJ/kgK}$
 $\dots x_s = 0.7588$
 $\dots h_s = 2008 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{|\dot{W}_T| - |\dot{W}_p|}{\dot{Q}_e} = \text{Rankine}$$

$$\eta_{\text{th}} = 30.3\%$$

Enfin: $\dot{W}_T/\dot{m} = 792 \text{ kJ/kg}$

(16)

En utilisant le concept,

$$\eta_{th} = \frac{|W_T| - |W_P|}{Q_c} = 1 - \frac{Q_F}{Q_c} = 1 - \frac{m \bar{T}|_4 (s_4 - s_1)}{m \bar{T}|_3 (s_3 - s_2)}$$

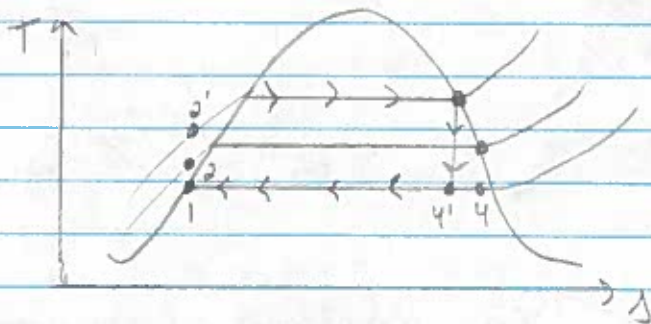
$$\eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}|_4}{\bar{T}|_3} \quad \text{Pour augmenter } \eta_{th}, \text{ on peut diminuer } \bar{T}|_4 \text{ ou augmenter } \bar{T}|_3$$

Étude des paramètres d'opérations

Pour les cycles de Rankine, les paramètres sont :

- 1) P_{max}
- 2) P_{min}
- 3) T_{max}

Effet de la pression dans la chaudière



$\bar{T}|_3$ augmente
donc η_{th} augmente

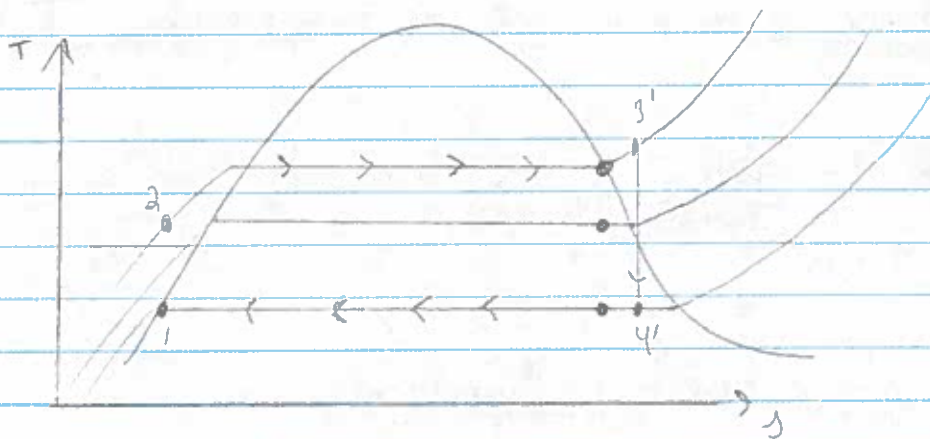
Désavantage: $x_{4'} < x_4$ donc plus d'eau liquide qui viennent frapper les pales de la turbine, donc durée de vie moins élevée.

Effet de la pression dans le condenseur

$\bar{T}|_4$ diminue, donc η_{th} augmente

Désavantage: limite réelle $\approx 10 \text{ kPa}$

Effet de la température maximale



\bar{T}_{12} augmente donc q_h augmente
 Désavantage: $x_{4'} > x_4$

On reprend le cycle de Rankine: $P_{\text{cond}} = 10 \text{ kPa}$ } Refaire l'analyse
 $P_{\text{chaud}} = 4 \text{ MPa}$
 $T_{\text{sortie chaud}} = 400^\circ\text{C}$

Résultats: $w_p/m = -4 \text{ kJ/kg}$
 $q_c/m = 3017 \text{ kJ/kg}$
 $w_t/m = 1069 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_{th} = \frac{|w_t| - |w_p|}{q_c} \Rightarrow \eta_{th} = 35,3\%$$

Avec Carnot $\eta_{th} = 1 - T_1/T_2$ maintenant est plus grand = 39%

MCG 2531 THERMODYNAMIQUE II

Chapitre 9, partie 1 - Problèmes supplémentaires

Problème S-1

Une centrale thermique ayant pour fluide moteur de l'eau opère selon le cycle idéal de Rankine avec une pression à la chaudière de 5 MPa et une pression au condenseur de 15 kPa. La turbine devrait produire une puissance de 7.5 MW et le titre à sa sortie ne doit pas être inférieur à 95%. Déterminez la température requise à la sortie de la chaudière et le débit massique de fluide moteur requis.

Problème S-2

Un cycle de puissance idéal de Rankine opère avec comme fluide moteur de l'eau. La vapeur saturée entre dans la turbine à une pression de 8.0 MPa et du liquide saturé quitte le condenseur à une pression de 0.008 MPa. La puissance nette du cycle est de 100 MW. Déterminez pour ce cycle :

- a) Le rendement thermique
- b) Le débit massique de vapeur d'eau, en kg/hr
- c) Le taux de transfert de chaleur dans la chaudière, en MW
- d) Le taux de transfert de chaleur dans le condenseur, en MW
- e) Le débit massique de l'eau de refroidissement utilisée dans le condenseur, en kg/hr, si l'eau de refroidissement utilisée entre dans le condenseur à 15 degrés Celsius et en ressort à 35 degrés Celsius

