

CF 2012

5x 6x

Devoir surveillé de Thermodynamique Appliquée

Etude de centrales géothermiques

13 mars 2012

Documents autorisés :

- Cours de thermodynamique appliquée édité par la caisse de secours
- TDs de thermodynamique appliquée édité par la caisse de secours
- Corrigés de TDs mis en ligne sur Claroline
- Notes manuscrites écrites par l'étudiant

Les ordinateurs et téléphones portables ne sont pas autorisés.

Toutes les réponses fournies devront être clairement justifiées. *Un résultat énoncé sans justification ne sera pas pris en compte.*

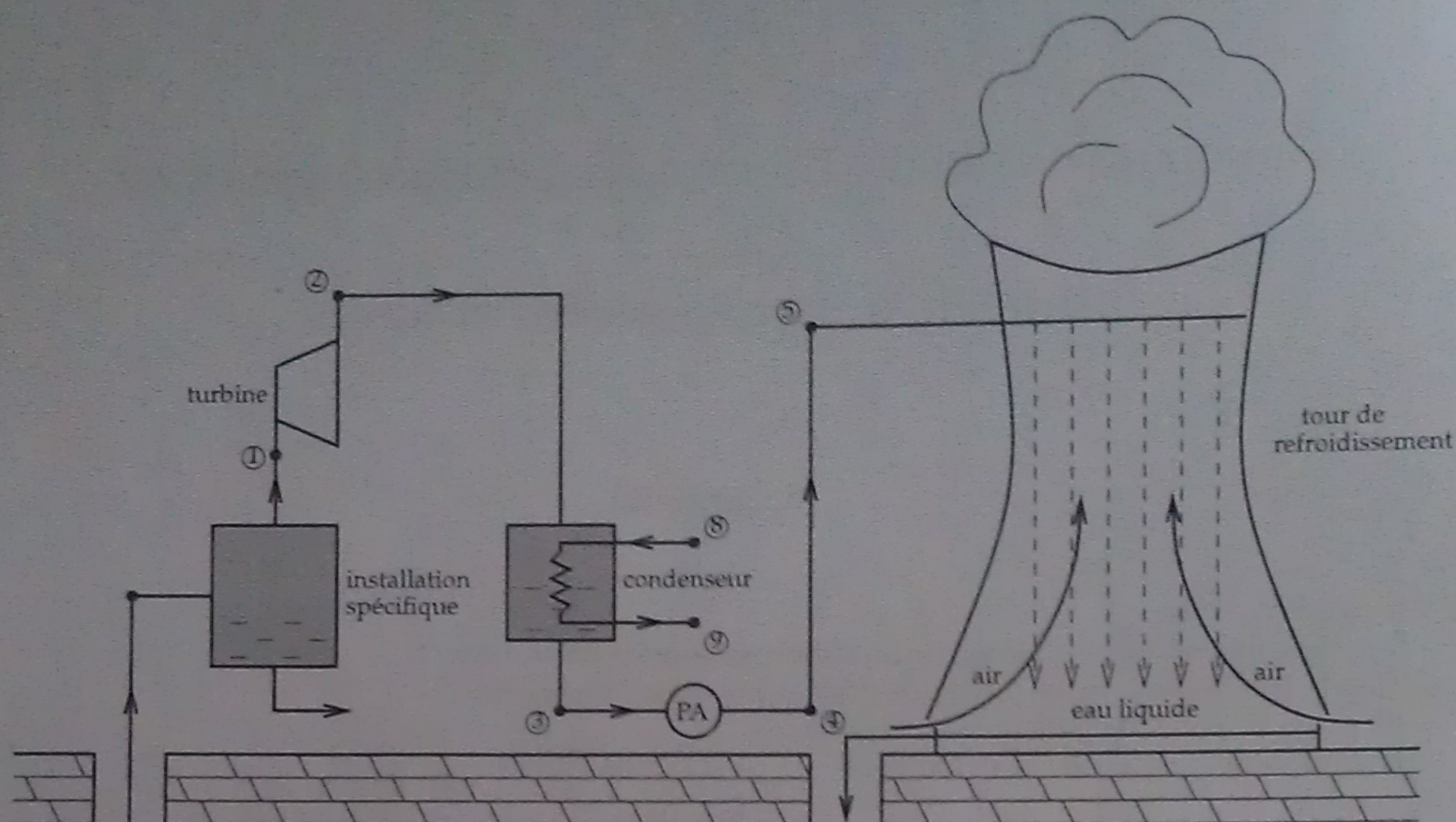
De nombreux pays disposent de ressources géothermiques importantes exploitées soit pour le chauffage soit pour faire fonctionner des centrales électrogènes de faible puissance.

On étudie deux types de centrales géothermiques électrogènes dont le principe décrit correspond à des installations existantes (respectivement Vallee Secolo, Italie, et Beowawe, USA).

Les deux problèmes sont indépendants.

1 Centrale géothermique avec vapeur sèche

Dans cette première installation, une source de vapeur humide à haute température fournit, après être passée dans une installation spécifique une vapeur sèche surchauffée ① qui se détend ensuite dans une turbine. Le fluide sortant ② passe alors dans un condenseur. L'eau liquide qui en est extraite, après avoir été comprimée par une pompe alimentaire, est pulvérisée au sommet d'une tour de refroidissement. L'eau liquide refroidie est récupérée à la base de la tour puis réinjectée dans le sol.



Les hypothèses suivantes peuvent être faites :

- les écoulements sont stationnaires ;
- les appareils et canalisations sont parfaitement calorifugées ;
- les variations d'énergie cinétique sont négligeables ;
- les variations d'énergie potentielle sont négligeables, sauf entre la pompe et alimentaire et le sommet de la tour de refroidissement ;
- les frottements au sein des canalisations sont supposés négligeables.

Données thermodynamiques

T (°C)	p^{sat} (kPa)	h_l^{sat} (kJ/kg)	h_v^{sat} (kJ/kg)	s_l^{sat} (kJ/(kg.K))	s_v^{sat} (kJ/(kg.K))
40	7.4	167.57	2574.30	0.5725	8.2570

T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg.K))
200	600	2850.10	6.9665

L'eau vapeur n'a pas un comportement de gaz parfait.

L'eau liquide est supposée être un fluide incompressible et indilatable dont la masse volumique est $\rho_l = 10^3 \text{ kg/m}^3$ et la capacité calorifique à pression constante est supposée constante $C_{p_l} = 4.185 \text{ kJ/(kg K)}$.

Le milieu ambiant est à $P_a = 101\,325 \text{ Pa}$ et $T_a = 20^\circ\text{C}$.

L'état ① est de la vapeur pure caractérisée par $P_1 = 600 \text{ kPa}$ et $T_1 = 200^\circ\text{C}$.

L'état ③ est du liquide pur à saturation.

Autres données

Le rendement isentropique de la turbine est $\eta_{is} = 0.85$ et le débit de vapeur à travers la turbine est $\dot{m}_1 = 110 \text{ kg/s}$.

Les transformations des fluides au sein du condenseur sont supposées être isobares.

1.1 Etat du fluide en sortie de turbine

La pression à la sortie de la turbine est de 7.4 kPa .

1.1.1 Détente réversible

On suppose dans un premier temps que la détente de la vapeur à travers la turbine est réversible et on note ②' l'état du fluide en sortie de turbine.

Montrer que l'état ②' est diphasique.

Déterminer les caractéristiques thermodynamiques de l'état ②' : enthalpie massique $h_{2'}$, entropie massique $s_{2'}$, température $T_{2'}$ et titre vapeur $x_{2'}$.

1.1.2 Détente réelle

On considère à présent la détente réelle.

Montrer que l'état ② en sortie de turbine est diphasique.

Déterminer les caractéristiques thermodynamiques de l'état ② : enthalpie massique h_2 , entropie massique s_2 , température T_2 et titre vapeur x_2 .

1.2 Diagramme thermodynamique

Tracer dans un diagramme $T - s$ l'évolution réaliste du fluide sur le trajet ① ② ③.

1.3 Puissance mécanique de la turbine

Exprimer la puissance mécanique récupérée à la turbine et calculer sa valeur numérique. *Le système étudié sera identifié et toutes les hypothèses utilisées pour aboutir au résultat seront explicitées.*

1.4 Condenseur

Le fluide de refroidissement du condenseur est de l'eau liquide entrant à la température ambiante et circulant à un débit massique $\dot{m}_c = 3 \cdot 10^3 \text{ kg/s}$.

Exprimer la température T_9 de cette eau à la sortie du condenseur et calculer sa valeur.

Exprimer la puissance calorifique cédée par le fluide du circuit au fluide de refroidissement au sein du condenseur et calculer sa valeur.

1.5 Dissipation exergétique à la turbine

Déterminer la dissipation exergétique \dot{D}_t^* à la turbine et calculer sa valeur.

1.6 Pompe d'alimentation

La pompe d'alimentation doit fournir à l'eau liquide la puissance nécessaire pour lui permettre d'atteindre le sommet de la tour de refroidissement situé à 10 m au-dessus du condenseur.

Déterminer la valeur de la puissance mécanique que la pompe doit fournir dans l'hypothèse où son fonctionnement est adiabatique réversible.

$$P_5 = 101\,325 \text{ Pa}; g = 9.81 \text{ m/s}^2.$$

1.7 Analyse du cycle

On peut montrer que si la pression de la vapeur à la sortie de la turbine est égale à la pression ambiante, la puissance fournie par la turbine est d'environ 30 MW.

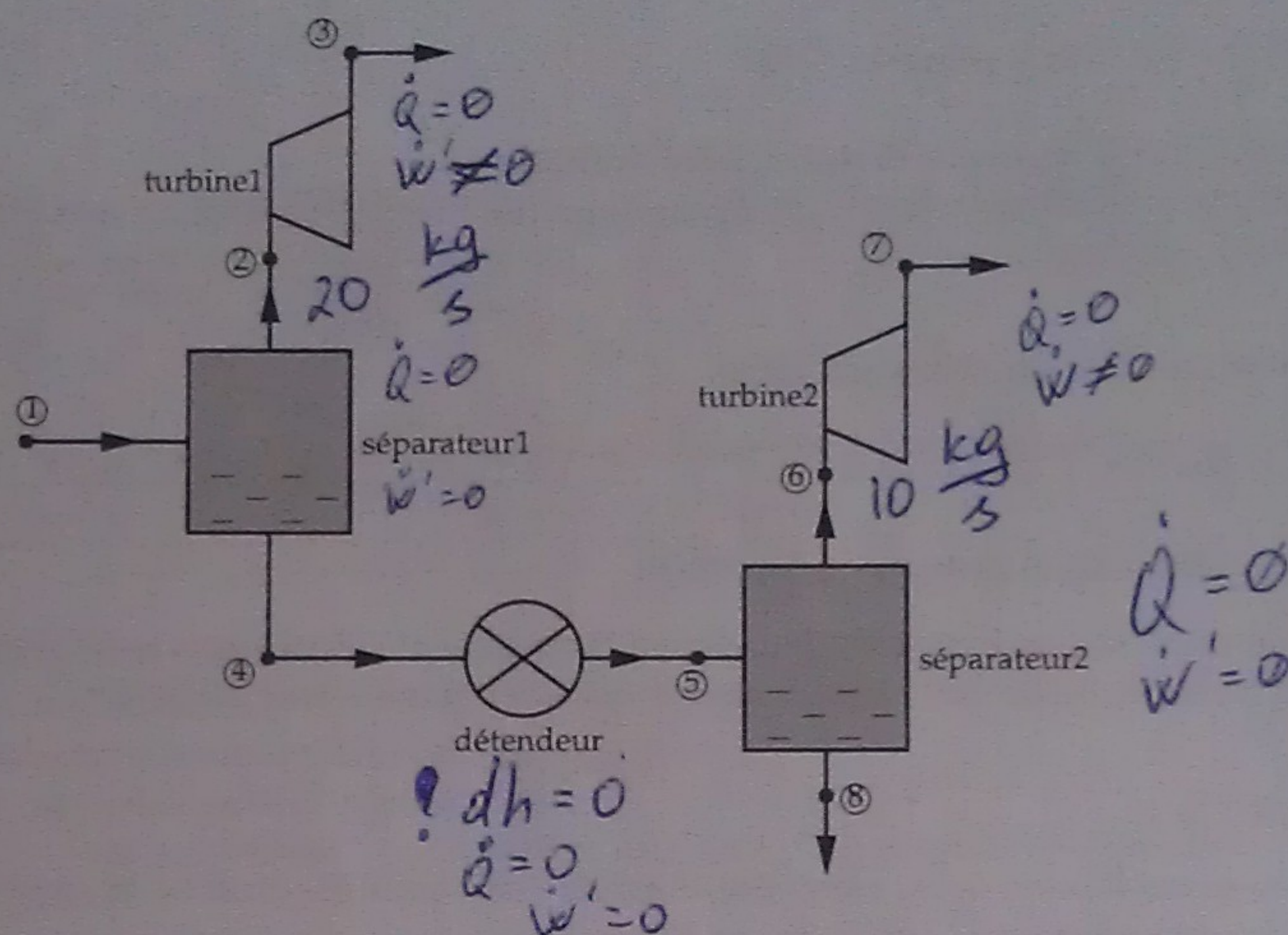
Discuter l'intérêt de l'installation étudiée par rapport à une installation où l'on effectue une simple détente de la vapeur à la pression ambiante (suivie d'un échange thermique pour ramener la température du fluide à la température ambiante).

2 Utilisation d'eau chaude

Dans cette installation, on dispose d'eau chaude sous forme diphasique liquide-vapeur à 165°C et 0.7 MPa. Cette eau passe dans un séparateur liquide-vapeur et le débit de vapeur est de 20 kg/s.

La vapeur est alors détendue dans une turbine jusqu'à une pression de 4.24 kPa (transformation ② - ③).

Le liquide passe quant à lui dans un détendeur amenant l'eau à la sortie du détendeur à une pression de 70.14 kPa (transformation ④ - ⑤). L'eau passe alors dans un séparateur liquide-vapeur et le débit de vapeur est de 10 kg/s. Cette vapeur est alors détendue dans une turbine jusqu'à une pression de 4.24 kPa (transformation ⑥ - ⑦).



Un séparateur est un composant dans lequel le fluide entre sous forme diphasique liquide-vapeur et en ressort, d'un côté, sous forme de liquide à saturation et, de l'autre, sous forme de vapeur à saturation.

Les hypothèses suivantes peuvent être faites :

- les écoulements sont stationnaires ;
- les appareils et canalisations sont parfaitement calorifugés ;
- les variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables ;
- les pertes de pression dans les canalisations et les séparateurs sont négligeables ;
- les turbines sont supposées fonctionner de manière adiabatique et réversible.

Données Les données thermodynamiques de l'eau à saturation sont les suivantes :

T (°C)	P^{sat} (kPa)	h_l^{sat} (kJ/kg)	h_v^{sat} (kJ/kg)	s_l^{sat} (kJ/(kg.K))	s_v^{sat} (kJ/(kg.K))
30	4.24	125.79	2556.30	0.4369	8.4533
90	70.14	376.92	2660.10	1.1925	7.4787
→ 165	700	697.34	2763.50	1.9925	6.7078

Les conditions ambiantes sont $P_a = 101\,325$ Pa et $T_a = 25^\circ\text{C}$ et les caractéristiques thermodynamiques de l'eau dans ces conditions sont :

T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg.K))
25	101.325	104.93	0.3672

2.1 Diagramme de Mollier

Dans un diagramme de Mollier, tracer l'allure de l'évolution thermodynamique du fluide dans son trajet ①, ④, ⑤, ⑥, ⑦ et ①, ②, ③.

2.2 Etat ③

Déterminer l'état ③ du fluide à la sortie de la première turbine : $(P_3, T_3, h_3, s_3, x_3)$.

2.3 Etat ⑦

Déterminer l'état ⑦ du fluide à la sortie de la seconde turbine : (P, T, h, s, x) .

2.4 Puissance mécanique

Calculer la puissance mécanique \dot{W}' totale fournie à l'extérieur par l'installation.

2.5 Bilans au second séparateur

Ecrire les bilans de masse et d'énergie au second séparateur.

2.6 Débit de masse en entrée du détendeur

A partir du bilan d'énergie dans le détendeur et des bilans de masse et d'énergie dans le séparateur suivant, déterminer la valeur du débit de masse \dot{m}_4 .

2.7 Analyse exergétique

2.7.1 Puissance maximale récupérable

Quelle est la puissance mécanique maximale récupérable à partir du fluide dans l'état ④ ?

2.7.2 Rendement

Quelle pourcentage de cette puissance maximale récupérable est effectivement récupérée par l'installation ?

2.7.3 Analyse

Qu'est devenue la puissance non récupérée ?

Quantifier les différentes contributions et en particulier la puissance dissipée dans le détendeur. Cette quantification sera donnée en pourcentage de la puissance maximale récupérable et on prêtera attention à bien introduire l'exergie ex_a du fluide en équilibre avec le milieu ambiant.

Parmi les fluides sortant en ⑦ et ⑧, quelle est celui dont l'énergie est la plus valorisable sous forme de puissance mécanique ?

Devoir surveillé de Thermodynamique Appliquée

Principe d'un réacteur nucléaire à eau sous pression

22 mai 2012

Documents autorisés :

- Cours de thermodynamique appliquée édité par la caisse de secours
- TDs de thermodynamique appliquée édité par la caisse de secours
- Corrigés de TDs mis en ligne sur Claroline
- Notes manuscrites écrites par l'étudiant

Les ordinateurs et téléphones portables ne sont pas autorisés.

Toutes les réponses fournies devront être clairement justifiées. *Un résultat énoncé sans justification ne sera pas pris en compte.*

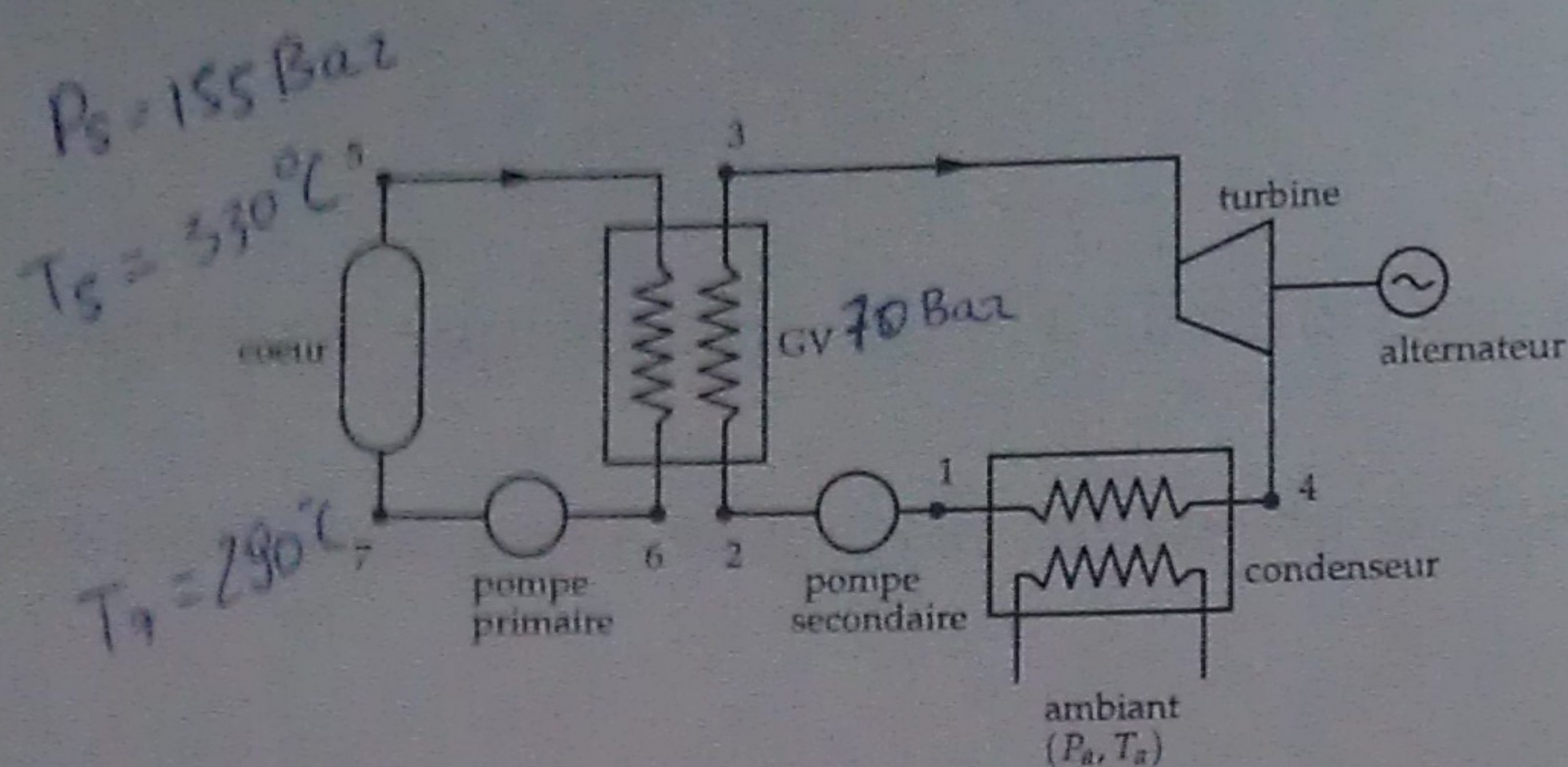
Les 58 réacteurs nucléaires français sont des réacteurs à eau sous pression et un grand nombre de réacteurs nucléaires dans le monde sont également de ce type.

On étudie le principe de fonctionnement de tels réacteurs permettant ainsi de disposer de quelques ordres de grandeur concernant leur fonctionnement thermodynamique. Les données fournies dans cette étude ont été adaptées par rapport à des données exactes de réacteurs en gardant toutefois les principaux ordres de grandeur thermodynamiques.

1 Principe de fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression

Un réacteur à eau sous pression est constitué de deux circuits principaux : le circuit primaire et le circuit secondaire. L'énergie dégagée par la réaction nucléaire se produisant dans le cœur est cédée à l'eau du circuit primaire. Cette eau est maintenue sous pression grâce à un pressuriseur (non représenté sur le schéma ci-dessous), d'où le nom de réacteur à eau sous pression. La puissance calorifique fournie au fluide à la traversée du cœur est cédée dans un générateur de vapeur. L'eau du circuit primaire est mise en mouvement grâce à une pompe primaire. C'est dans le circuit secondaire que la puissance calorifique est transformée en puissance mécanique. Cette transformation est basée sur le principe du cycle de Rankine. Le fluide du circuit secondaire est de l'eau qui se vaporise à la traversée du générateur de vapeur à travers lequel la puissance est transférée du circuit primaire au circuit secondaire. La vapeur sortant du générateur de vapeur est détendue à travers une turbine couplée à un alternateur qui produit l'énergie électrique. L'eau sortant de la turbine est condensée en passant dans un échangeur de chaleur. L'eau passe ensuite dans une pompe avant d'entrer dans le générateur de vapeur.

Ce principe de fonctionnement est illustré sur le schéma ci-dessous.



Hypothèses

Les hypothèses suivantes peuvent être faites :

- les écoulements sont stationnaires ;
- les différents composants et les canalisations sont parfaitement calorifugés ;
- les variations d'énergie cinétique sont négligeables ;
- les variations d'énergie potentielle sont négligeables ;
- les frottements au sein des canalisations sont supposés négligeables ;
- tous les échanges de chaleur sont supposés se produire à pression constante.

Données thermodynamiques de l'eau à saturation

p^{sat} (MPa)	T (K)	h_l^{sat} (kJ/kg)	h_v^{sat} (kJ/kg)	s_l^{sat} (kJ/(kg.K))	s_v^{sat} (kJ/(kg.K))
0.005	306	138	2561	0.4763	8.3939
7	559	1267	2773	3.1220	5.8146
15.5	618	1630	2596	3.7150	5.2789

Autres données thermodynamiques de l'eau

L'eau vapeur n'a pas un comportement de gaz parfait.

Le milieu ambiant est à $P_a = 101\,325$ Pa et $T_a = 25^\circ\text{C}$.

Données de fonctionnement du réacteur

La pression de l'eau du circuit primaire à la sortie du cœur est de 155 bar.

La pression de l'eau du circuit secondaire dans le générateur de vapeur est de 70 bar.

Le cœur nucléaire fournit au fluide primaire une puissance calorifique de 4250 MW.

La température en entrée cœur est de 290°C et la température en sortie cœur est de 330°C .

2 Etude du circuit primaire

2.1 Modèle thermodynamique du fluide primaire

Le comportement thermodynamique de l'eau liquide sous pression dans le circuit primaire peut être approché par l'équation d'état suivante :

$$h(P, T) = h_0 + \frac{P - P_0}{\rho_0} + C_{p0}(T - T_0)$$

où les grandeurs indicées par 0 sont des grandeurs de référence données dans le tableau ci-dessous

P_0 (MPa)	T_0 (K)	h_0 (kJ/kg)	s_0 (kJ/(kg.K))	ρ_0 (kg/m ³)	C_{p0} (kJ/(kg.K))
15.5	603.15	1517	3.5305	750	5.8

2.1.1 Entropie

Montrer que la capacité calorifique à pression constante est constante, $C_p = C_{p0}$, et en déduire que l'entropie du fluide s'exprime de la manière suivante :

$$s(P, T) = s_0 + C_{p0} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

2.1.2 Masse volumique

Montrer que la masse volumique du fluide est constante : $\rho = \rho_0$.

2.2 Circuit primaire parfait

Dans cette partie, on suppose que le fluide primaire est à une pression constante dans l'ensemble du circuit primaire.

2.2.1 Débit d'eau dans le circuit primaire

A partir d'un bilan d'énergie appliqué à un système que l'on identifiera et en explicitant toutes les hypothèses faites, déterminer le débit de masse d'eau du circuit primaire \dot{m}_p .

2.2.2 Puissance calorifique cédée au générateur de vapeur

En identifiant le système considéré, déterminer la puissance calorifique cédée par l'eau du circuit primaire dans le générateur de vapeur.

2.3 Circuit primaire réel

On suppose que l'état du fluide à la sortie du coeur ainsi que la température du fluide à l'entrée du coeur sont ceux donnés dans l'énoncé.

~~On suppose également que le débit massique est celui déterminé à la partie précédente.~~

2.3.1 Variation de pression

La pompe permet de faire circuler le fluide et elle augmente également la pression du fluide de 12 bar. Expliquer l'origine de la variation de pression du fluide entre les points 7 et 6 du circuit primaire.

2.3.2 Etats thermodynamiques aux bornes du coeur

En supposant que la variation de pression a lieu uniquement à la traversée du coeur, déterminer l'état du fluide en entrée et en sortie coeur : (P, T, h, s) .

2.3.3 Etat thermodynamique en amont de la pompe

Le rendement isentropique de la pompe est de 85% : $\eta_p = 0.85$.

Montrer que l'expression de la température en amont de la pompe est

$$T_6 = T_7 - \frac{P_7 - P_6}{\rho_0} \left(\frac{1}{\eta_p} - 1 \right)$$

En déduire l'état du fluide en amont de la pompe : (P, T, h, s) .

2.3.4 Puissance de la pompe primaire

Montrer que l'expression de la puissance mécanique fournie au fluide par la pompe primaire est

$$\dot{W}_{pp} = \dot{m}_p \frac{P_7 - P_6}{\eta_p \rho_0}$$

Déterminer sa valeur numérique.

2.3.5 Puissance calorifique cédée au générateur de vapeur

Déterminer la nouvelle puissance calorifique cédée par le fluide primaire dans le générateur de vapeur.

3 Etude du circuit secondaire

Le circuit secondaire est basé sur le cycle de Rankine. Certaines parties de ce circuit sont volontairement simplifiées et idéalisées pour en faciliter l'étude.

3.1 Principe du cycle secondaire

L'eau entre dans le générateur de vapeur à une pression de 70 bar et en sort sous forme de vapeur à saturation à cette même pression. La vapeur est alors détendue à travers une turbine ; la pression de sortie est de 0.05 bar. Le rendement isentropique de la turbine est de 80%. L'eau passe alors dans un condenseur d'où il ressort sous forme de liquide à saturation. Elle passe alors à travers la pompe secondaire dont le rendement isentropique est de 85%.

Tracer l'allure du cycle dans un diagramme $T-s$.

3.2 Etats du fluide au cours du cycle

3.2.1 Sortie de la turbine

Déterminer l'état du fluide à la sortie de la turbine : (P, T, h, s, x) .

En justifiant votre réponse, on précisera en particulier si l'eau est sous forme de liquide sous-refroidi, diphasique ou de vapeur surchauffée.

3.2.2 Sortie de la pompe

On suppose que le comportement thermodynamique de l'eau liquide à 70 bar peut être approché par l'équation d'état suivante

$$h(P, T) = h_0 + \frac{P - P_0}{\rho_0} + C_{p0}(T - T_0)$$

où les grandeurs indicées par 0 sont des grandeurs de référence données dans le tableau ci-dessous

P_0 (MPa)	T_0 (K)	h_0 (kJ/kg)	s_0 (kJ/(kg.K))	ρ_0 (kg/m ³)	C_{p0} (kJ/(kg.K))
7	306.15	145	0.4771	998	4.16

Montrer que l'enthalpie du fluide à la sortie de la pompe est d'environ 146 kJ/kg.

En déduire l'état du fluide à la sortie de la pompe : (P, T, h, s, x) .

En justifiant votre réponse, on précisera en particulier si l'eau est sous forme de liquide sous-refroidi, diphasique ou de vapeur surchauffée.

3.3 Analyse énergétique

3.3.1 Débit massique du circuit secondaire

Déterminer le débit massique du circuit secondaire.

3.3.2 Puissances échangées

Déterminer les puissances reçues par le fluide à travers les différents composants du circuit secondaire : générateur de vapeur, turbine, condenseur et pompe.

3.3.3 Rendements énergétiques

Donner l'expression du rendement énergétique du circuit secondaire et calculer sa valeur.

Même question pour le réacteur complet, c'est-à-dire comprenant les circuits primaire et secondaire. Discuter l'ordre de grandeur de ce dernier rendement.

4 Analyse exergétique

On suppose que la température d'échange dans le coeur est de 340°C et que l'échange au condenseur s'effectue avec un fluide aux conditions ambiantes.

4.1 Dissipations exergétiques

4.1.1 Dissipation exergétique à travers les pompes et la turbine

En justifiant votre réponse et en explicitant les hypothèses faites, donner l'expression de la dissipation d'exergie à travers les pompes et la turbine en fonction de la variation d'entropie du fluide à leurs bornes.

En déduire les valeurs de la dissipation d'exergie à travers la pompe primaire, la pompe secondaire et la turbine.

4.1.2 Dissipation exergétique dans le coeur

Donner l'expression de la dissipation d'exergie dans le coeur et calculer sa valeur.

4.1.3 Dissipation exergétique au condenseur

Donner l'expression de la dissipation d'exergie au condenseur et calculer sa valeur.

4.1.4 Dissipation exergétique dans le générateur de vapeur

Donner l'expression de la dissipation d'exergie dans le générateur de vapeur et calculer sa valeur.

4.1.5 Analyse

Quelle est l'origine physique principale de la dissipation d'exergie dans le générateur de vapeur ?
Même question pour la turbine.

4.2 Rendement

Donner l'expression du rendement exergétique du réacteur.
Calculer sa valeur et discuter la.

4.3 Optimisation du cycle

Avec les dissipations exergétiques calculées, vaut-il mieux chercher à optimiser le cycle au niveau de la pompe secondaire ou au niveau de la turbine ?

Proposer une manière d'optimiser le fonctionnement du composant identifié.