
DM N°13
Thermodynamique industrielle

Lycée *LANGEVIN* - *WALLON*

28 novembre 2020

À lire attentivement...

Les candidats devront vérifier que le sujet comporte bien 10 pages numérotées 1/10, 2/10, ... 10/10.

Les candidats sont invités à porter une attention particulière à la rédaction : les copies illisibles ou mal présentées seront pénalisées.

Toute application numérique ne comportant pas d'unité ne donnera pas lieu à attribution de points. Les résultats numériques devront être donnés sous la forme appropriée.

Le sujet comporte :

- 2 exercices d'annale de physique.

Les diverses parties peuvent être traitées dans l'ordre choisi par le candidat. Il prendra toutefois soin de bien numéroter les questions.



Fig. 1 – Carte mémoire de thermodynamique industrielle

L'EMPLOI DE LA CALCULATRICE OU DE TOUTE AUTRE AIDE ÉLECTRONIQUE,
NOTAMMENT PYTHON, EST AUTORISÉ.

LE TRAVAIL AVEC SON COURS SOUS LES YEUX EST RECOMMANDÉ.

LE PHOTO-COPIAGE DU TRAVAIL D'UN CAMARADE SERA SANCTIONNÉ.

UN RÉSULTAT NON ENCADRÉ NE SERA PAS PRIS EN COMPTE.

Si au cours de la rédaction, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et poursuivra sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

1 2018 Banque PT B Physique

Le problème comporte trois parties largement indépendantes. Dans une première partie, on s'intéresse à l'isolation thermique et au concept de bâtiments dits à énergie positive. La seconde partie abordera le chauffage d'un appartement. Enfin, la troisième partie étudiera une PAC air/eau soit une énergie renouvelable et avec un bon bilan carbone.

1.1 Géothermie et PAC air/eau

1.1.1 Géothermie basse énergie

Dans les profondeurs de la Terre en deçà de quelques centaines de mètres, des roches poreuses contiennent souvent de l'eau chaude à environ 70°C . La porosité des roches est de l'ordre de 15 %, c'est-à-dire qu'il y a 15 m^3 d'eau chaude pour 100 m^3 de roches. L'épaisseur de la nappe de roche poreuse contenant l'eau chaude supposée constante est d'environ $H = 100\text{ m}$.

On rappelle qu'un litre d'eau a une masse de 1 kg et une chaleur massique : $C_{Pm, \text{eau}} = 4,18\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} = 1\text{ kcal/K/kg}$.

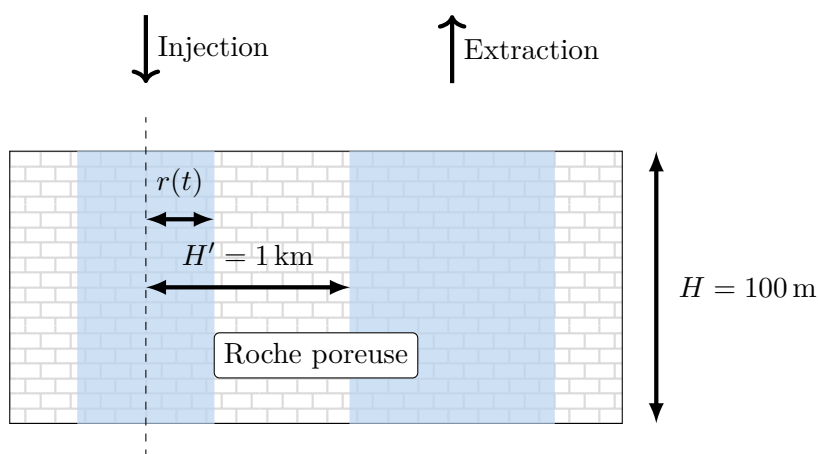


Fig. 1.1

L'eau à 70°C est pompée vers la surface, et après utilisation, elle est réinjectée pour maintenir la pression en amont (schéma simpliste 1.1 ci-dessus). Elle a alors une température de 10°C . La distance entre les puits d'injection et de réinjection est d'environ $H' = 1\text{ km}$.

L'eau est réinjectée avec un débit volumique $D_V = 100\text{ m}^3/\text{h}$ constant et avec une symétrie cylindrique de hauteur H autour du puits de réinjection.

On note $r(t)$ la distance parcourue par l'eau froide depuis le puits à une date t . La distance $r(t)$ est appelée distance du front froid par rapport au puits de réinjection. On a évidemment $r(t = 0) = 0$.

1. (a) Calculer le volume d'eau froide réinjectée entre t et $t + dt$ en fonction de r , dr et H .
- (b) En déduire $r(t)$ en fonction de t , H et D_V .
- (c) Au bout de combien d'années le front froid atteint le puits d'extraction situé à 1 km (cf. schéma 1.1). Donner une expression littérale puis une estimation grossière en années. Conclure sur la pérennité de l'installation.

2. (a) Déterminer en kilocalories (kcal) l'énergie récupérable par unité de surface de la nappe puis l'énergie en kilocalories (kcal) récupérable par m^3 d'eau de roche. La comparer à celle d'un mètre cube de pétrole. On donne $E_{\text{pétrole}}$ pour un mètre cube = 60 Mcal.
- (b) Commenter le résultat. Le procédé est-il rentable ? Justifier votre réponse.

1.1.2 Pompe à chaleur air/eau

3. Rappeler à l'aide d'un schéma annoté le principe élémentaire d'une pompe à chaleur fonctionnant entre deux sources de chaleur idéales, source chaude notée S_c et source froide notée S_f .
 - (a) Définir en français ce que sont en général pour une machine ditherme la source chaude et la source froide.
 - (b) Le système considéré étant le fluide de la machine, justifier en particulier le signe des différents échanges thermiques W , Q_c , Q_f : W travail reçu algébriquement par le fluide sur un cycle, Q_c chaleur reçue algébriquement par le fluide de la source chaude et Q_f chaleur reçue algébriquement par le fluide de la source froide.
 - (c) Déterminer le COP (coefficient de performance) ou efficacité de la machine pour un fonctionnement réversible en fonction de T_c et T_f , températures des sources chaudes et froides.
4. On considère une PAC air/eau utilisée en hiver dont le fluide frigorigène est le R410A dont le diagramme des frigoristes est donné en annexe. Ce gaz n'a pas d'effet sur la couche d'ozone mais un impact non négligeable sur le réchauffement climatique.

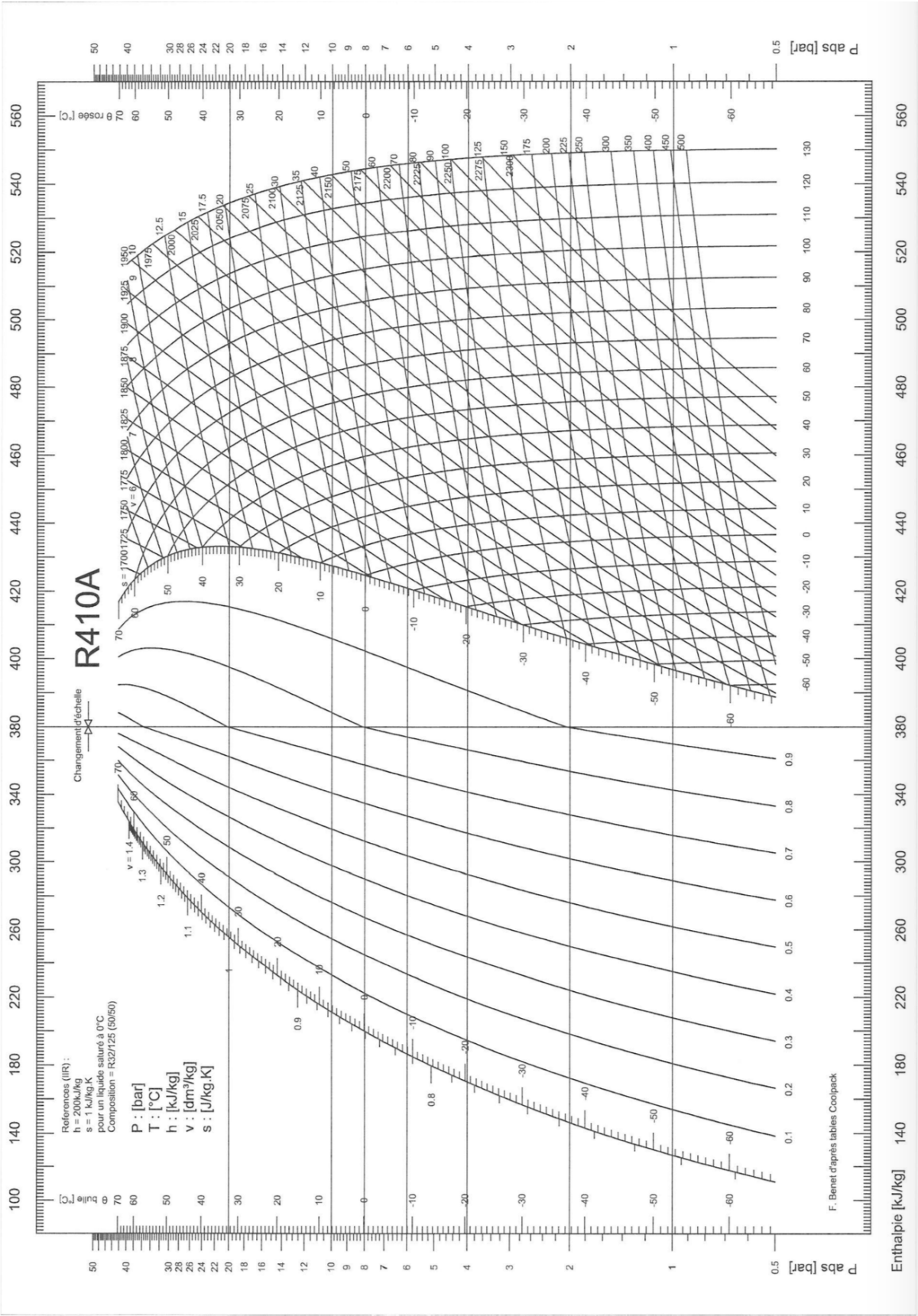
Le fluide est vaporisé entièrement (étape 1 \rightarrow 2) puis surchauffé de manière isobare (étape 2 \rightarrow 3), le compresseur isentrope (transformation isentropique) l'amène à une pression de 20 bar (étape 3 \rightarrow 4), le fluide est liquéfié (étape 4 \rightarrow 5) puis sous refroidi (étape 5 \rightarrow 6). Une détente isenthalpe le ramène à l'état 1.

On donne les coordonnées (h, P, s) suivantes à différents états du cycle (les unités sont celles du diagramme fourni en annexe).

État du fluide	h : enthalpie massique en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	P : pression en bar	s : entropie massique en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
État 1	240	5,0	
État 2 (vapeur saturante)	h_2	5,0	
État 3 (vapeur surchauffée)	h_3	5,0	1900
État 4	h_4	20	1900
État 5	h_5	20	
État 6	240	20	

On note h enthalpie massique du fluide, w travail indiqué massique reçu algébriquement par le fluide, q chaleur reçue algébriquement par le fluide.

- (a) Déterminer graphiquement les valeurs numériques de : h_2 , h_3 , h_4 et h_5 .
- (b) Représenter le cycle sur le diagramme des frigoristes fourni en l'orientant. On fera attention au changement d'échelle dans le document.
5. Expliquer pourquoi le condenseur est en contact avec la source chaude.
6. (a) En négligeant les variations d'énergie cinétique et potentielle, déterminer littéralement : $q_{1 \rightarrow 2}$, $q_{2 \rightarrow 3}$, $w_{3 \rightarrow 4}$, $q_{4 \rightarrow 5}$ et $q_{5 \rightarrow 6}$.
- (b) Donner par une mesure graphique leurs valeurs approchées.
7. En déduire la valeur approchée du COP de la PAC. Quel serait le COP idéal avec les mêmes températures extrêmes ?
8. Quel est le débit massique du fluide pour une puissance chauffante de la PAC de 5 kW ?



2020 CCS MP Physique Chimie 1 – L'énergie électrique d'origine nucléaire

Le but de ce problème est de regarder, en tant que scientifique non expert du sujet, quelques aspects d'une centrale nucléaire de type EPR (signifiant *Evolutionary Pressurised water Reactor*), qui est un type de réacteur à eau pressurisée (REP).

Les 19 centrales nucléaires actuellement en fonctionnement en France ont été globalement construites sur le même mode. Tous leurs réacteurs utilisent la même technologie, dans laquelle de l'eau sous pression sert à transporter la chaleur produite par les réactions nucléaires. [...]

Les centrales nucléaires regroupent un total de 58 réacteurs dont 34 produisent chacun une puissance électrique de 900 MégaWatt (MW) – 900 MW permet d'alimenter près de 500 000 foyers. À cela s'ajoutent 20 réacteurs de 1300 MW, tandis que les quatre derniers délivrent 1450 MW. Un 59^e réacteur est actuellement en construction à Flamanville, dans la Manche. De type EPR (*Evolutionary Pressurised water Reactor*), il développera une puissance électrique de l'ordre de 1600 MW. Actuellement, ces installations produisent près de 80 % de l'électricité produite en France.

Autorité de Sûreté Nucléaire, informations mises à jour en février 2018

Les trois parties du problème sont largement indépendantes, mais les données numériques fournies dans les différentes parties sont susceptibles d'être utilisées dans toutes les parties.

Les applications numériques seront faites avec un nombre de chiffres significatifs adapté. Les données numériques sont fournies dans le document réponse à rendre avec la copie.

Certaines questions peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

2.1 Du réacteur aux turbines

Au niveau du circuit secondaire, la centrale fonctionne comme représenté sur le schéma de la figure 2.1. Dans ce schéma x désigne le titre en vapeur, c'est à dire le rapport entre le débit massique de vapeur d'eau et le débit massique totale (liquide et vapeur).

Les échanges d'énergie avec le circuit primaire se font au niveau du générateur de vapeur (GV), dans lequel l'eau du circuit secondaire entre avec un débit R_0 , initialement à l'état (D). À la sortie du générateur de vapeur, l'eau est sous forme de vapeur saturante (état (A)). La plus grande partie (débit R_1) est dirigée vers la turbine haute pression (HP); une autre (débit R_3) est destinée au surchauffeur. Dans la turbine, l'eau passe de l'état (A) à l'état (B). De là, l'eau passe dans un séparateur dont le seul rôle est de répartir les deux phases par gravité. En haut de ce séparateur sort de la vapeur saturante dans l'état (E), avec un débit R_2 , qui est ensuite surchauffée jusqu'à $T_F = 281^\circ\text{C}$ grâce à la liquéfaction totale jusqu'à l'état (I) d'une partie de la vapeur issue du générateur de vapeur. Une fois surchauffée, la vapeur dans l'état (F) passe dans une turbine basse pression (BP) dont elle ressort à l'état (G). Elle est ensuite entièrement liquéfiée par échange thermique avec le circuit tertiaire (en général, de l'eau de rivière

ou de mer) jusqu'à l'état (H). Avant d'être réinjectée dans le générateur de vapeur, un récupérateur-compresseur récolte l'eau entièrement liquide issue du séparateur, du surchauffeur et du condenseur et les comprime jusqu'à l'état (D).

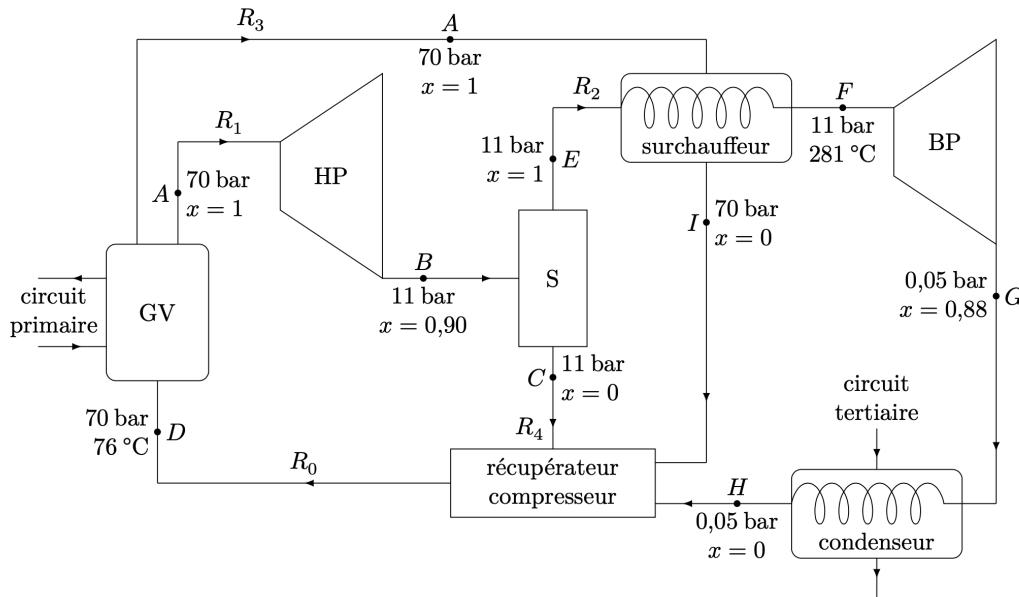


Fig. 2.1

2.1.1 Approche générale

Soit un élément quelconque, avec une seule entrée et une seule sortie, pour lequel on note :

- R le débit massique de fluide à travers l'élément ;
- \mathcal{P}_u la puissance fournie au fluide par les forces autres que pressantes ;
- \mathcal{P}_{th} la puissance thermique fournie au fluide ;
- h_e l'enthalpie massique du fluide juste avant l'entrée ;
- h_s l'enthalpie massique du fluide juste après la sortie.

1. Montrer que $R(h_s - h_e) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$.

Dans le cas d'un élément comportant plusieurs entrées et sorties, le bilan précédent se généralise en :

$$\sum_{i \text{ (sorties)}} R_i h_{s,i} - \sum_{j \text{ (entrées)}} R_j h_{e,j} = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

2.1.2 Analyse du cycle

2. Placer tous les états A, B, C, \dots, I sur le diagramme (T, s) de l'eau fourni dans le document réponse.

Enthalpies massiques

3. Par lecture graphique, déterminer la valeur de l'enthalpie massique h_F de l'eau dans l'état (F).
4. Calculer les valeurs des enthalpies massiques h_B et h_G à partir des données numériques fournies.
5. Estimer la valeur de l'enthalpie massique h_D .

Calcul des différents débits

6. Exprimer les relations simples qui existent entre les débits R_0 , R_1 et R_3 , puis entre R_2 , R_1 et x_B (titre de vapeur au point B) et enfin entre R_4 , R_1 et x_B .
7. Le surchauffeur est un simple échangeur de chaleur entre deux fluides ; il n'y a donc aucune puissance mécanique mise en jeu. En supposant que le surchauffeur soit parfaitement calorifugé, trouver une relation entre les débits R_2 et R_3 faisant intervenir des enthalpies massiques à préciser.
8. Calculer numériquement les différents débits.

Au niveau des turbines

Les machines réalisant la compression ou la détente d'un fluide ont une conception très compacte pour des raisons de poids, d'encombrement et de coût. Pour les mêmes raisons, elles tournent très vite (plusieurs milliers de tours par minute).

9. Les transformations dans les turbines HP et BP sont-elles réversibles ? Justifier soigneusement votre réponse. Dans le cas où les transformations sont irréversibles, quelles sont les causes de cette irréversibilité ?

Au niveau du condenseur

Le condenseur fonctionne de la même manière que le surchauffeur.

10. Déterminer l'expression du débit que doit avoir le circuit tertiaire pour que son élévation de température ne dépasse pas 5°C . Estimer puis commenter son ordre de grandeur. Justifier l'existence d'une limite supérieure de l'élévation de température.

2.1.3 Rendement du cycle

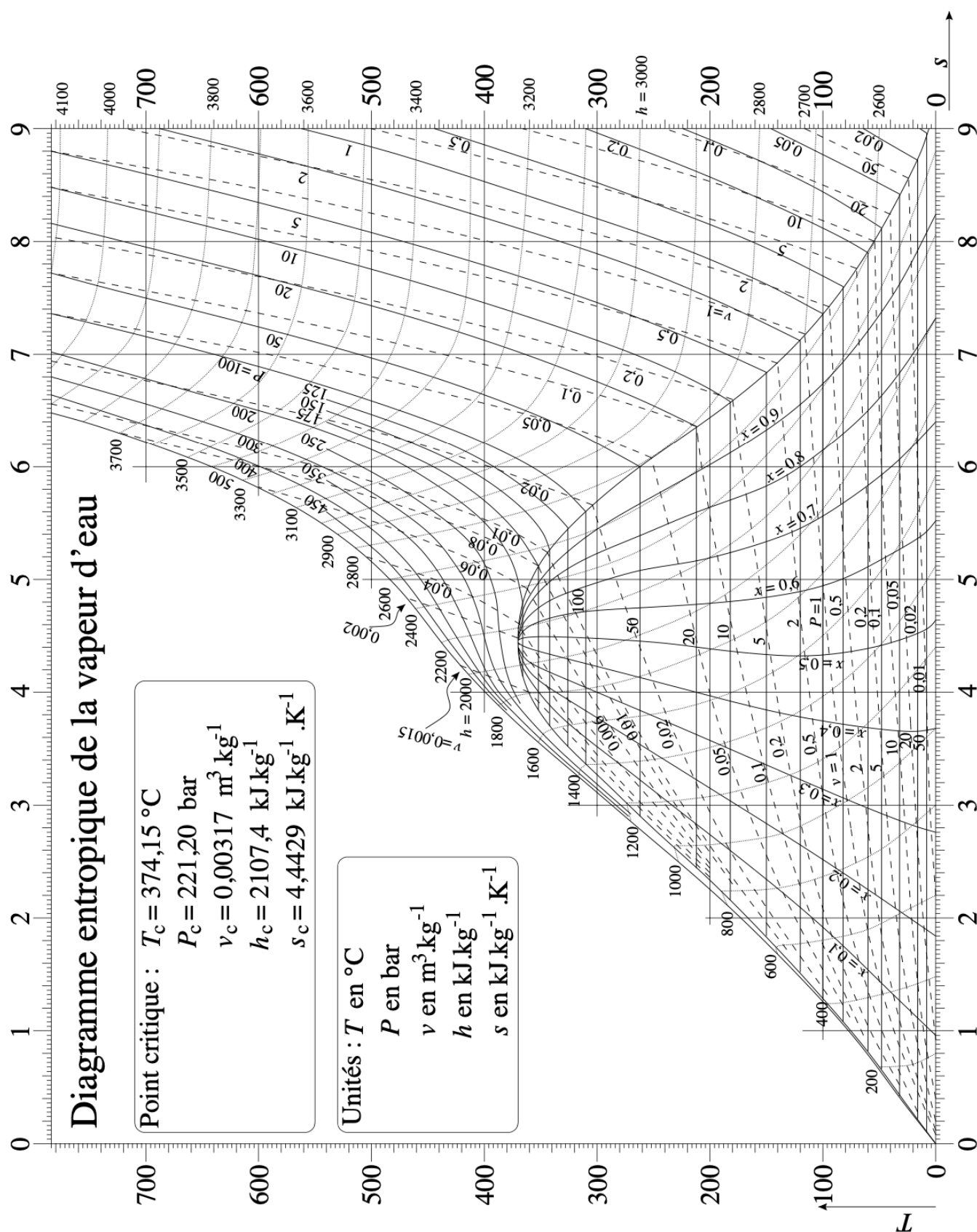
Rendement effectif

11. Définir et calculer un rendement pour l'ensemble du circuit secondaire. Comparer ce rendement à d'autres rendements connus. (Pour information, chaque réacteur est en fait associé à 4 circuits secondaires identiques.)

Intérêt du surchauffeur

12. À l'aide d'une démarche à préciser, déterminer une estimation du rendement que l'on obtiendrait en l'absence du surchauffeur. Commenter.

Données



Valeurs numériques

L'uranium source d'énergie

Uranium 235	
masse atomique ^{235}U	235,04 g.mol $^{-1}$
abondance naturelle ^{235}U	0,72 %
période radioactive ^{235}U	$703,8 \times 10^6$ années
Uranium 238	
masse atomique ^{238}U	238,04 g.mol $^{-1}$
abondance naturelle ^{238}U	99,28 %
période radioactive ^{238}U	$4,468 \times 10^9$ années
Désintégration α	
énergie libérée ^{235}U	4,68 MeV
énergie libérée ^{238}U	4,27 MeV
Fission	
énergie libérée ^{235}U	$2,0 \times 10^2$ MeV
Oxygène	
masse molaire	16 g.mol $^{-1}$
Constante d'Avogadro	
\mathcal{N}_A	$6,02 \times 10^{23}$ mol $^{-1}$

Dioxyde d'Uranium enrichi	
proportion ^{235}U	5,0 %
proportion ^{238}U	95,0 %
masse volumique du cristal	11,0 g.cm $^{-3}$
Pastille nucléaire	
forme géométrique	cylindre
hauteur	≈ 14 mm
diamètre	8,19 mm
Unité énergétique	
1 eV	$1,60 \times 10^{-19}$ J
1 tonne équivalent charbon	$29,3 \times 10^9$ J
1 tonne équivalent pétrole	$41,9 \times 10^9$ J

Sur les caractéristiques du cœur

Structure	
réseau assemblage	carré 17×17 crayons
nombre de crayons de combustible	265
diamètre d'un crayon	9,5 mm
épaisseur de la gaine d'un crayon	0,57 mm
nombre d'assemblages	241 par cœur
masse d'UO $_2$ par assemblage	600 kg
Combustible (dioxyde d'uranium)	
conductivité thermique moyenne	5,0 W.m $^{-1}$.K $^{-1}$
température de fusion	2865 °C

Circuit primaire	
débit par boucle	$27,2 \times 10^3$ m 3 .h $^{-1}$
nombre de boucles	4
pression	155 bar
température à l'entrée	296 °C
température au voisinage des crayons	332 °C
température à la sortie	330 °C
surface d'échange	8000 m 2
densité de courant thermique en périphérie d'un crayon (fonctionnement nominal)	157 W.cm $^{-2}$
puissance linéique (fonctionnement nominal)	470 W.cm $^{-1}$
puissance linéique maximale à ne pas dépasser	590 W.cm $^{-1}$

Sur les caractéristiques du circuit secondaire

générateur de vapeur $D \rightarrow A$	
débit de vapeur	640 kg.s $^{-1}$
état physique à l'entrée	liquide
température entrée	76 °C
état physique à la sortie	vapeur saturante
pression	70 bar
turbine haute pression $A \rightarrow B$	
état physique à l'entrée	vapeur saturante
pression entrée	70 bar
état physique à la sortie	vapeur humide
titre en vapeur à la sortie	0,90
pression sortie	11 bar
turbine basse pression $F \rightarrow G$	
état physique à l'entrée	vapeur sèche
température entrée	250 °C
pression entrée	11 bar
état physique à la sortie	vapeur humide
titre en vapeur à la sortie	0,88
pression sortie	0,05 bar

surchauffeur $A \rightarrow I$ et $E \rightarrow F$	
état physique à l'entrée (A)	vapeur saturante sèche
pression entrée (A)	70 bar
état physique sortie (I)	liquide saturant
pression sortie (I)	70 bar
état physique à l'entrée (E)	vapeur saturante sèche
pression entrée (E)	11 bar
état physique sortie (F)	vapeur sèche
pression sortie (F)	11 bar
température sortie (F)	250 °C
condenseur $G \rightarrow H$	
état physique à l'entrée	vapeur humide
titre en vapeur à l'entrée	0,88
état physique à la sortie	liquide saturant
pression	0,05 bar

Sur l'eau

Pression de 70 bar	
température d'équilibre liquide – vapeur	286 °C
enthalpie massique du liquide	1268 kJ·kg ⁻¹
enthalpie massique de la vapeur	2772 kJ·kg ⁻¹
entropie massique du liquide	3,12 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
entropie massique de la vapeur	5,81 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Pression de 11 bar	
température d'équilibre liquide – vapeur	184 °C
enthalpie massique du liquide	781 kJ·kg ⁻¹
enthalpie massique de la vapeur	2781 kJ·kg ⁻¹
entropie massique du liquide	2,18 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
entropie massique de la vapeur	6,55 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Pression de 0,05 bar	
température d'équilibre liquide – vapeur	33,0 °C
enthalpie massique du liquide	137,8 kJ·kg ⁻¹
enthalpie massique de la vapeur	2561 kJ·kg ⁻¹
entropie massique du liquide	0,476 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
entropie massique de la vapeur	8,39 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹