

# Physique : DM12

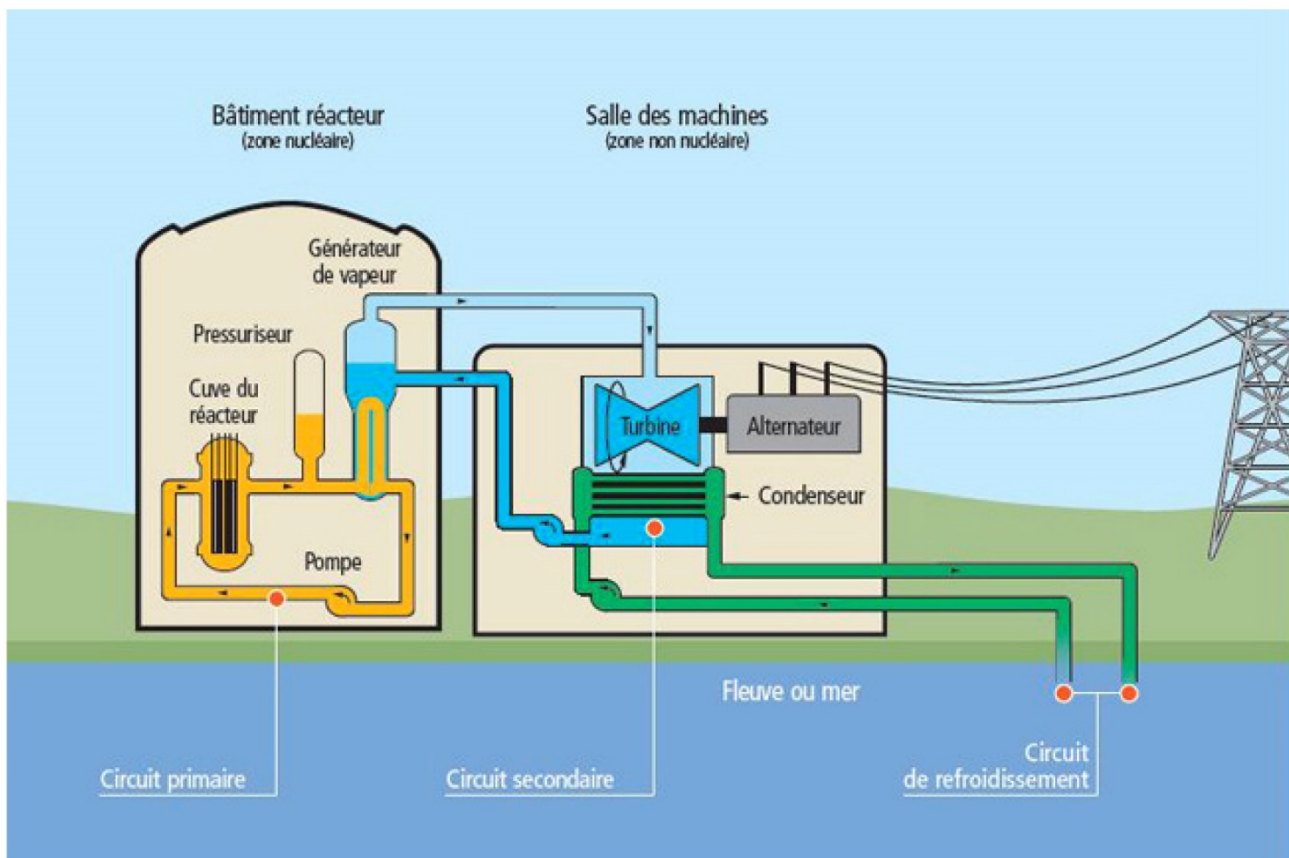
## Partie A – Etude d'une installation nucléaire REP

Ce sujet comporte un document réponse à rendre avec la copie. Les données numériques utiles sont fournies en fin d'énoncé.

La France compte 19 centrales nucléaires en exploitation, dans lesquelles tous les réacteurs (58 au total) sont des réacteurs à eau pressurisée. Actuellement, ces installations produisent près de 80% de l'électricité produite en France. Chaque centrale est soumise à un référentiel de normes de sûreté et de sécurité évoluant en fonction des enseignements des incidents passés nationaux ou internationaux.

Le but de ce problème est d'étudier quelques aspects liés au fonctionnement d'une centrale nucléaire REP, ainsi que plusieurs dispositions prises en matière de sûreté nucléaire : contrôle des rejets de la centrale et surveillance sismique d'un site nucléaire.

### I Circuit secondaire et enrichissement de l'uranium



**Figure 1** Schéma global d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Une centrale nucléaire REP (Réacteur à Eau Pressurisée) est constituée de deux grandes zones (voir figure 1) :

- une zone non nucléaire (salle des machines). Dans cette partie, semblable à celle utilisée dans les centrales thermiques classiques, s'écoule de l'eau dans un circuit secondaire. Cette eau est évaporée dans le Générateur de Vapeur (GV) par absorption de la chaleur produite dans la zone nucléaire, puis elle entraîne une turbine (T) couplée à un alternateur produisant de l'électricité, ensuite elle est condensée au contact d'un refroidisseur (rivière ou mer ou atmosphère via une tour aéroréfrigérante) et enfin, elle est comprimée avant d'être renvoyée vers le générateur de vapeur ;
- une zone nucléaire (dans le bâtiment réacteur), où ont lieu les réactions nucléaires de fission, qui produisent de l'énergie thermique et chauffent ainsi l'eau sous pression circulant dans le circuit primaire. Le transfert

d'énergie thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire se fait dans le générateur de vapeur, où la surface d'échange entre les deux fluides peut atteindre près de  $5000 \text{ m}^2$  (réseau de tubulures).

### I.A – Description du circuit secondaire de la centrale

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique  $P_e = 900 \text{ MW}$ . Le fluide circulant dans le circuit secondaire est de l'eau, dont l'écoulement est supposé stationnaire. Le cycle thermodynamique décrit par l'eau est un cycle ditherme moteur. L'eau liquide sera supposée incompressible et de capacité thermique massique isobare supposée constante. Le tableau en fin d'énoncé donne diverses données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.

#### I.A.1) Cycle de Carnot

Dans une première approche simplifiée, on considère le moteur ditherme de Carnot fonctionnant de manière réversible entre deux sources de température  $T_{\text{ch}}$  et  $T_{\text{fr}}$  ( $T_{\text{fr}} < T_{\text{ch}}$ ).

- Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle.
- Donner la valeur numérique de ce rendement en prenant  $T_{\text{ch}} = 543 \text{ K}$  et  $T_{\text{fr}} = 303 \text{ K}$ , les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.
- Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique  $P_t = 2785 \text{ MW}$ , que vaut le rendement thermodynamique réel de l'installation ? On supposera que la puissance mécanique transmise à la turbine est intégralement convertie en puissance électrique. Commenter.

#### I.A.2) Cycle de Rankine

L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes (représentées dans la figure 2)

- de  $A$  à  $B$  : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression  $P_2 = 55 \text{ bar}$  jusqu'à un état de liquide saturant (état noté  $A'$ ), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (état  $B$ ) ;
- de  $B$  à  $C$  : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression  $P_2$  à la pression  $P_1 = 43 \text{ mbar}$  ;
- en  $C$ , le fluide est diphasé ;
- de  $C$  à  $D$  : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de  $D$  à  $A$  : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.

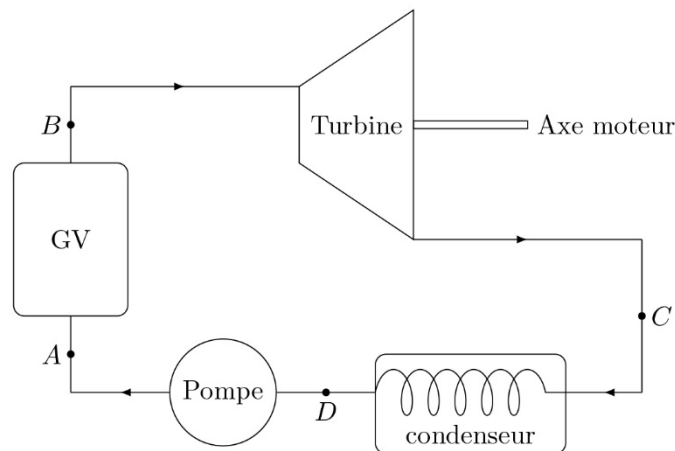


Figure 2 Cycle de Rankine

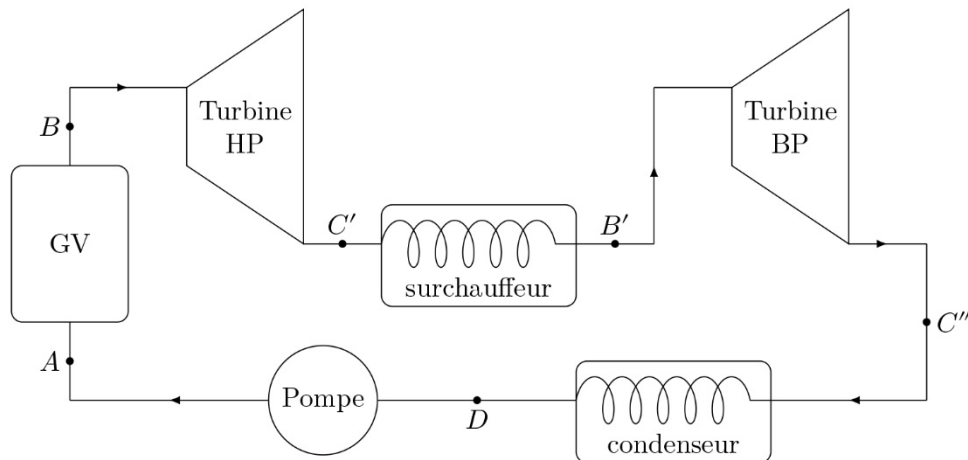
- Représenter dans le diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ) l'allure de la courbe de saturation de l'eau, ainsi que les isothermes  $T_B$ ,  $T_D$  et  $T_{\text{critique}}$ , cette dernière température étant celle du point critique de l'eau. Préciser les domaines du liquide, de la vapeur, de la vapeur saturante. Représenter sur ce même diagramme l'allure du cycle décrit par l'eau du circuit secondaire. Indiquer le sens de parcours du cycle et placer les points  $A$ ,  $A'$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$ .
- D'après l'extrait de table thermodynamique donné en fin d'énoncé, quelles sont les valeurs des températures, des enthalpies massiques et des entropies massiques aux points  $A'$ ,  $B$  et  $D$  ? On pourra donner les valeurs sous forme de tableau.
- Dans le document réponse figure le diagramme enthalpique ( $P, h$ ) de l'eau. Placer, avec soin et à l'échelle, les points  $A'$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  du cycle. On explicitera la méthode.
- Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle dans les bilans énergétiques. Exprimer alors, sans démonstration, le premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire recevant de manière algébrique le travail massique utile  $w_u$  et le transfert thermique massique  $q$ .
- Exprimer le travail massique  $w_{BC}$  reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.

- f) Exprimer le transfert thermique massique  $q_{AA'}$  reçu par l'eau liquide quand elle passe de manière isobare de la température  $T_A$  à la température  $T_{A'}$  dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique : on considérera  $T_A \approx T_D$ .
- g) Exprimer le transfert thermique massique  $q_{A'B}$  reçu par l'eau quand elle se vaporise complètement dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique.
- h) Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter. Comparer au rendement réel et commenter.
- i) Dans quel état se trouve l'eau à la fin de la détente de la turbine ? Donner le titre massique en vapeur à l'aide du diagramme enthalpique. En quoi est-ce un inconvénient pour les parties mobiles de la turbine ?

### I.A.3) Cycle de Rankine avec détente étagée

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment (voir figure 3). En effet, d'une part, la détente est étagée : elle se fait d'abord dans une turbine « haute pression » puis dans une turbine « basse pression ». D'autre part, entre les deux turbines, l'eau passe dans un « surchauffeur ». Les transformations sont maintenant modélisées par

- de  $A$  à  $B$  : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression  $P_2 = 55$  bar, jusqu'à un état de liquide saturant (état noté  $A'$ ), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point  $B$ ) ;
- de  $B$  à  $C'$  : détente adiabatique réversible dans la turbine « haute pression », de la pression  $P_2$  à la pression  $P_3 = 10$  bar ;
- de  $C'$  à  $B'$  : échauffement isobare à la pression  $P_3$ , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point  $B'$ ) ;
- de  $B'$  à  $C''$  : détente adiabatique réversible dans la turbine « basse pression », de la pression  $P_3$  à la pression  $P_1 = 43$  mbar ;
- de  $C''$  à  $D$  : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de  $D$  à  $A$  : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.



**Figure 3** Cycle de Rankine avec une détente étagée

- a) Placer les nouveaux points  $C'$ ,  $B'$ ,  $C''$  sur le diagramme enthalpique du document réponse.
- b) Comparer les titres massiques en vapeur des points  $C'$  et  $C''$  au titre massique en vapeur du point  $C$ . Quel est l'intérêt de la surchauffe ?
- c) À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

## Données

*Extrait de table thermodynamique relatif à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau*

$\theta$ (°C)	$P_{\text{sat}}$ (bar)	Liquide saturant			Vapeur saturante sèche		
		$v_l$ (m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	$h_l$ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	$s_l$ (J·K <sup>-1</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	$v_v$ (m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	$h_v$ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	$s_v$ (J·K <sup>-1</sup> ·kg <sup>-1</sup> )
30	0,043	1,0047	125,22	0,4348	32,892	2555,92	8,4530
180	10	1,1276	763,18	2,1395	0,119404	2777,84	6,5854
270	55	1,3053	1190,10	2,9853	0,03505	2788,46	5,9226

$\theta$  température

$s_l$  entropie massique du liquide saturant

$P_{\text{sat}}$  pression de vapeur saturante

$v_v$  volume massique de la vapeur saturante sèche

$v_l$  volume massique du liquide saturant

$h_v$  enthalpie massique de la vapeur saturante sèche

$h_l$  enthalpie massique du liquide saturant

$s_v$  entropie massique de la vapeur saturante sèche

*Capacité thermique massique isobare de l'eau*

$$c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$$

*Potentiels standard d'oxydo-réduction (à 25 °C)*

$$E^\circ(\text{H}^+/\text{H}_2) = 0,00 \text{ V}$$

$$E^\circ(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = 1,23 \text{ V}$$

*Masses atomiques*

Atome	F	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U
Masses atomiques (u)	19,0	235,0	238,0

*Constantes diverses*

Unité de masse atomique unifiée

$$1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Constante de Boltzmann

$$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$

Constante des gaz parfaits

$$R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Constante de Faraday

$$F = 96500 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$$

On prendra

$$0 \text{ °C} = 273 \text{ K}$$

## Formulaire

Expression du gradient d'une fonction scalaire  $f(r, \theta, z)$  en coordonnées cylindriques

$$\overrightarrow{\text{grad}} f = \frac{\partial f}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{e}_z$$

## Partie B – Cycle de Claude

**Les calculatrices sont autorisées**

La découverte du boson de Higgs au CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) n'aurait jamais été possible sans les installations frigorifiques perfectionnées nécessaires pour refroidir en particulier les aimants supraconducteurs du LHC (Large Hadron Collider).

Ce problème propose dans une première partie d'étudier, en la simplifiant largement, une installation de liquéfaction de l'hélium à la température de 4,2 K.

Est abordée dans une deuxième partie la modélisation d'un échangeur de chaleur dont le but est d'assurer à l'hélium liquide de rester à la température nécessaire au refroidissement des aimants supraconducteurs.

Dans une troisième partie, est abordé de manière succincte l'écoulement de l'hélium dans une ligne de distribution cryogénique.

La quatrième partie permet d'étudier un procédé de refroidissement de l'hélium liquide permettant de le faire passer de la température de 4,2 K à la température de 1,9 K.

Une cinquième et dernière partie se propose d'étudier différents procédés de mesure et de contrôle des paramètres température, pression, débit volumique et hauteur du bain d'hélium liquide.

Les différentes parties sont indépendantes les unes des autres.  
L'annexe en page X regroupe les principales données.

## A – Etude du cycle de Claude pour la liquéfaction de l'hélium.

### A.1. Bilan énergétique d'un système en écoulement.

Un fluide s'écoule en passant de l'état thermodynamique ① à l'état thermodynamique ② en traversant une machine thermique où il échange du travail et de la chaleur. L'écoulement est considéré comme permanent (figure 1).

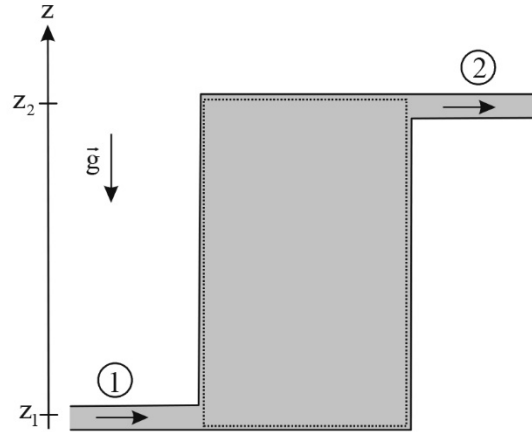


Figure 1 : système en écoulement

Pour une masse \$dm\$ de fluide circulant entre l'état ① et l'état ②, le bilan énergétique appliqué à cette masse s'écrit :

$$dm \left[ \left( h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \right) - \left( h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 \right) \right] = \delta W_u + \delta Q$$

**A.1.1.** Préciser la signification de chaque terme de la relation précédente.

**A.1.2.** Réécrire ce bilan énergétique en faisant apparaître les puissances et le débit massique \$D\_m\$ du fluide.

### A.2. Cycle de Claude.

On souhaite refroidir de l'hélium selon un cycle de Claude. Dans ce cycle, on pré-refroidit l'hélium avant de le liquéfier partiellement en lui faisant subir une détente de Joule-Thomson. Le principe de la machine thermique est représenté en figure 2, page 3.

On y distingue :

- le compresseur C où l'énergie est injectée pour comprimer l'hélium à température ambiante ;
- une boîte froide thermiquement isolée dans laquelle sont placés les différents échangeurs de chaleur E1 à E5 ainsi que le détendeur D. La boîte froide ne consomme pas d'énergie mais en rejette sous forme mécanique par l'intermédiaire des turbines T1 et T2.

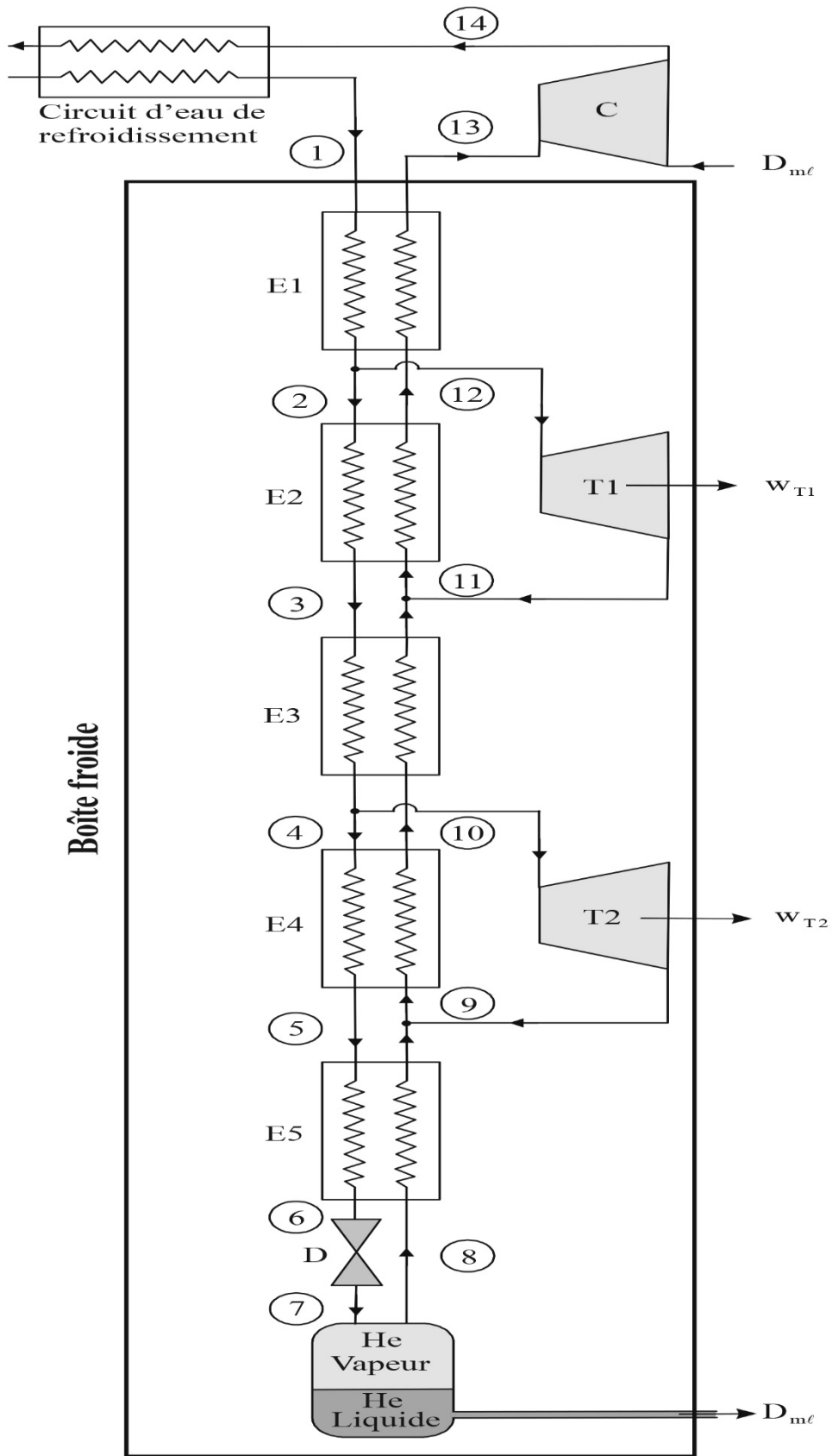


Figure 2 : cycle de Claude

Au repère ①, l'hélium gazeux entre à la pression  $P_2 = 20$  bar et à la température  $T_1$  avec le débit massique  $D_m = 1\,600$  g.s<sup>-1</sup>.

Une fraction massique  $x_1$  du gaz en sortie de l'échangeur E1 est prélevée pour lui faire subir une détente dans la turbine T1. De même, une fraction massique  $x_2$  du gaz sortant de l'échangeur E3 est prélevée pour lui faire subir une détente dans la turbine T2.

Les débits massiques aux repères ② et ④ sont donc respectivement :

$$D_{m2} = (1 - x_1)D_m \text{ et } D_{m4} = (1 - x_1)(1 - x_2)D_m .$$

Le gaz sortant de l'échangeur E5 passe dans le détendeur D où il subit une détente isenthalpique, amenant le fluide de la pression  $P_2 = 20$  bar (repère ⑥) à la pression  $P_1 = 1$  bar (repère ⑦).

L'hélium liquide formé avec un débit massique  $D_{ml}$  est prélevé en sortie.

Le gaz sortant du détendeur passe dans l'échangeur E5 (repère ⑧) pour refroidir le gaz circulant à contre-courant. Le gaz sortant de la turbine T2 se rajoute au gaz sortant de l'échangeur E5 (repère ⑨).

De même, le gaz sortant de la turbine T1 se rajoute au gaz sortant de l'échangeur E3 (repère ⑩).

Le compresseur C comprime le gaz de la pression  $P_1 = 1$  bar à la pression  $P_2 = 20$  bar. Un circuit d'eau de refroidissement permet alors de ramener le gaz à la température  $T_1$ . On injecte la quantité de gaz nécessaire pour que le débit massique en ① soit à nouveau  $D_m$ .

Les écoulements dans les différents échangeurs de chaleur sont supposés isobares.

On notera :

- $h_i$  l'enthalpie massique du fluide dans l'état thermodynamique n (i), correspondant sur la figure 2 au repère noté i ;
- $h_{liq}$  et  $h_{vap}$  l'enthalpie massique de l'hélium liquide et vapeur à la pression  $P_1$  ;
- $\mathcal{P}_{T1}$  et  $\mathcal{P}_{T2}$  les puissances cédées par les gaz dans les turbines 1 et 2 respectivement. Ces puissances sont utilisées pour entraîner partiellement le compresseur.

On négligera systématiquement les variations d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur.

Les soutirages et l'injection de fluide se font sans addition de puissance.

Les données relatives à l'hélium sont regroupées en annexe, page 15.

**A.2.1.** Donner l'expression du débit massique entrant dans le compresseur (repère ⑬) en fonction de  $D_m$  et  $D_{ml}$ .

**A.2.2.** En considérant les puissances entrantes et sortantes de la boîte froide, écrire une relation reliant les grandeurs  $D_m$ ,  $D_{ml}$ ,  $h_1$ ,  $h_{13}$ ,  $h_{liq}$ ,  $\mathcal{P}_{T1}$  et  $\mathcal{P}_{T2}$ .

**A.2.3.** Par un bilan énergétique sur la turbine T1, écrire une relation entre les variables  $x_1$ ,  $D_m$ ,  $\mathcal{P}_{T1}$ ,  $h_2$  et  $h_{11}$ .

**A.2.4.** Par un bilan énergétique sur la turbine T2, écrire une relation entre les variables  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $D_m$ ,  $\mathcal{P}_{T2}$ ,  $h_4$  et  $h_9$ .

On définit le taux de liquéfaction de la machine comme le rapport  $y = \frac{D_{m\ell}}{D_m}$ .

**A.2.5.** Montrer que  $y = \frac{h_1 - h_{13} + x_1(h_{11} - h_2) + x_2(1 - x_1)(h_9 - h_4)}{h_{liq} - h_{13}}$ .

**A.2.6.** En faisant un bilan énergétique sur le premier échangeur de chaleur E1, exprimer le débit massique  $D_{m\ell}$  en fonction de  $D_m$  et des enthalpies massiques  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_{12}$  et  $h_{13}$ .

En déduire la valeur du taux de liquéfaction. Faire l'application numérique.

**A.2.7.** En faisant un bilan énergétique sur le deuxième échangeur de chaleur, exprimer et calculer la fraction massique  $x_1$ .

**A.2.8.** Par un raisonnement analogue, exprimer et calculer la fraction massique  $x_2$ .

Vérifier que la relation établie en **A.2.5.** permet bien de retrouver la valeur de  $y$  calculée précédemment.

**A.2.9.** Relier le titre en liquide  $x_\ell$  du mélange diphasé en sortie du détendeur aux grandeurs  $h_6$ ,  $h_{liq}$  et  $h_{vap}$ . En déduire une nouvelle expression du taux de liquéfaction et comparer avec celle calculée à la question **A.2.6.**

**A.2.10.** En déduire l'expression du débit volumique  $D_{V\ell}$  de l'hélium liquide formé à la température de 4,2 K et calculer sa valeur que l'on exprimera en  $L.s^{-1}$ .

La puissance frigorifique équivalente  $\mathcal{P}_{f,eq}$  est définie comme la puissance à prélever au gaz froid de débit massique  $D_{m\ell}$  pour le liquéfier :  $\mathcal{P}_{f,eq} = D_{m\ell}L_{vm}$  où  $L_{vm}$  représente la chaleur latente massique de vaporisation.

**A.2.11.** Calculer la puissance frigorifique équivalente pour l'hélium à la température de 4,2 K. On considère que les puissances  $\mathcal{P}_{T1}$  et  $\mathcal{P}_{T2}$ , que les gaz cèdent dans les turbines T1 et T2, sont intégralement récupérées par le compresseur.

**A.2.12.** Donner l'expression de la puissance mécanique  $\mathcal{P}_C$  qu'il reste à fournir au compresseur pour que celui-ci comprime effectivement le gaz de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ .

**A.2.13.** En déduire la puissance à fournir à l'installation pour prélever une puissance frigorifique équivalente de 1 kW. Comparer le rendement de l'installation à celui du cycle idéal de Carnot fonctionnant entre les températures  $T_F = 4,2$  K et  $T_C = 280$  K.

Les installations du CERN sont capables quant à elles de produire plusieurs kilogrammes d'hélium liquide par seconde. Leur rendement par rapport au cycle de Carnot atteint 30 %, soit un des meilleurs rendements possibles actuellement.

**ANNEXE**

- **Masse molaire de l'hélium** :  $M = 4 \text{ g.mol}^{-1}$
- **Constante des gaz parfaits** :  $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- **Viscosité dynamique de l'hélium à  $T = 4,2 \text{ K}$**  :  $\eta = 3,6.10^{-6} \text{ Pa.s}$
- **Célérité du son dans l'hélium liquide à la température  $T = 4,2 \text{ K}$**  :  $c = 178 \text{ m.s}^{-1}$

**Données relatives à l'hélium à l'état diphasé**

<b>Température <math>T = 4,2\text{K}</math></b>	<b>Masse volumique (<math>\text{kg.m}^{-3}</math>)</b>	<b>Enthalpie (<math>\text{kJ.kg}^{-1}</math>)</b>
<b>Liquide</b>	125,4	9,90
<b>Vapeur</b>	16,49	30,74

<b>Température <math>T = 1,9\text{K}</math></b>	<b>Masse volumique (<math>\text{kg.m}^{-3}</math>)</b>	<b>Enthalpie (<math>\text{kJ.kg}^{-1}</math>)</b>
<b>Liquide</b>	145,5	1,186
<b>Vapeur</b>	0,609	24,63

**Données relatives à l'hélium à l'état gazeux**

<b>Etat</b>	<b>Pression (bar)</b>	<b>Température (K)</b>	<b>Enthalpie (<math>\text{kJ.kg}^{-1}</math>)</b>
<b>1</b>	20	280	1 476
<b>2</b>	20	200	1 060
<b>3</b>	20	100	540,3
<b>4</b>	20	50	277,4
<b>5</b>	20	20	110,5
<b>6</b>	20	7,15	29,3
<b>7</b>	1	4,2	
<b>8</b>	1	4,2	30,74
<b>9</b>	1	19,9	118
<b>10</b>	1	45,2	250
<b>11</b>	1	98,5	527,2
<b>12</b>	1	193	1 017,9
<b>13</b>	1	277	1 454,2
<b>14</b>	20	370	1 900

**Fin de l'énoncé**

# Annexe partie I :

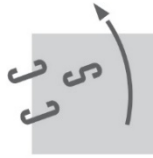
NOM : \_\_\_\_\_  
 Prénom : \_\_\_\_\_  
 Signature : \_\_\_\_\_

Épreuve de Physique-chimie 2 Filière MP

NUMÉRO DE PLACE

--	--	--	--

Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir rempli complètement l'en-tête



CONCOURS CENTRALE-SUPÉLEC

Ne rien écrire dans la partie barrée

2016-02-24 13:52:11

2015-016-DR

Les températures sont exprimées en °C

