

DM 2 Thermodynamique

Exercice 1 : L'énergie électrique d'origine nucléaire

Les deux 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 en fin d'énoncé.

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.

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

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 (MWe) — 900 MWe permet d'alimenter près de 500 000 foyers. À cela s'ajoutent 20 réacteurs de 1300 MWe, tandis que les quatre derniers délivrent 1450 MWe. Un 59^{ème} 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 MWe. Actuellement, ces installations produisent près de 80% de l'électricité produite en France.

Le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire est représenté FIGURE 1. Le réacteur chauffe une certaine quantité d'eau qui circule, en boucle fermée, dans le circuit primaire. L'eau du circuit primaire permet de vaporiser l'eau contenue dans le circuit secondaire pour la circulation assure la rotation de turbines couplées à des alternateurs. Le circuit tertiaire est utilisé pour liquéfier l'eau du circuit secondaire en sortie des turbines, avant qu'elle ne soit à nouveau injectée dans les générateurs de vapeur.

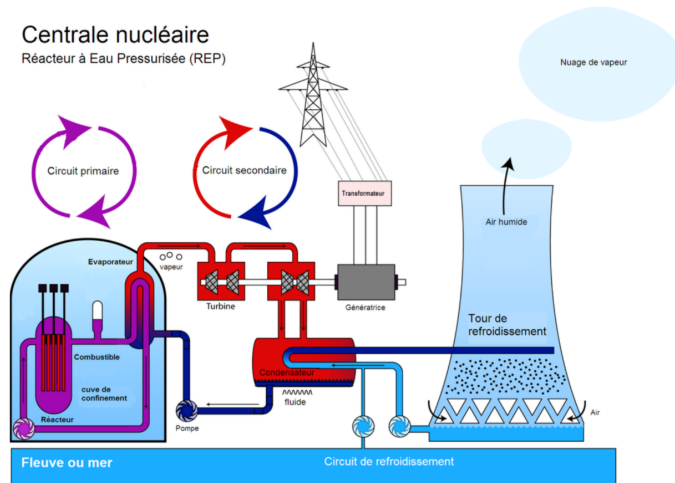


FIGURE 1 – Principe d'une centrale nucléaire

I – Le cœur du réacteur

Au cœur d'une tranche de centrale (qui comporte en général 2 ou 3 tranches), le combustible nucléaire est sous forme de pastilles cylindriques. Ces pastilles sont regroupées en crayons, eux-même réunis en assemblages (FIGURE 2). Un assemblage contient 600 kg de dioxyde d'uranium enrichi. Un cœur de réacteur est l'association de 241 assemblages.

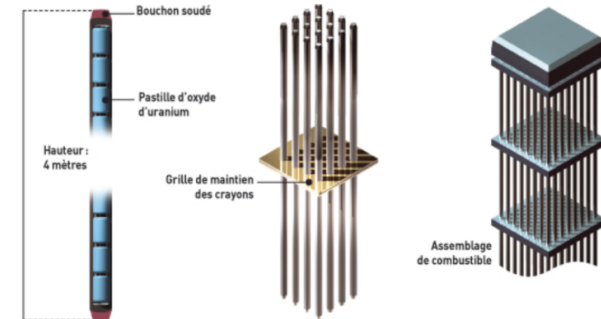


FIGURE 2 – Assemblage de combustible

I.A Quelques analyses préliminaires

- Q.1** Pourquoi produire le combustible sous forme de pastilles au lieu de cylindres prêts à mettre dans la gaine du crayon ? Quel est l'intérêt de faire une multitude de petits crayons de combustibles plutôt que quelques-uns, plus gros ?
- Q.2** Un assemblage est un quadrillage de 17×17 emplacements. Or, il ne contient que 265 crayons de combustible. À quoi peuvent servir les autres emplacements ?
- Q.3** Vérifier que la surface totale d'échange entre l'eau du circuit primaire et les crayons indiquée dans les données (environ 8000 m^2) est cohérente avec la structure du cœur du réacteur.

I.B Approche théorique

On modélise un crayon radioactif par un cylindre d'axe (Oz) et de rayon R dans lequel les réactions nucléaires produisent une puissance volumique uniforme. Le régime est considéré stationnaire. On utilise le système de coordonnées cylindriques d'axe (Oz) : (r, θ, z) .

- Q.4** Justifier que la température est une fonction de r uniquement. Que peut-on en déduire sur la densité de courant thermique $\vec{j}$?
- Q.5** La FIGURE 3 présente quatre profils de température à l'intérieur du crayon, ainsi que les expressions analytiques de $T(r)$ associées (pour chacune de ces expressions, la constante K est une constante positive). Parmi ces profils, quel est le seul susceptible de correspondre au crayon radioactif étudié ? Justifier votre réponse à partir d'arguments qualitatifs uniquement.
- Q.6** En admettant que le profil identifié représente réellement le champ de température à l'intérieur du crayon, relier la constante K aux grandeurs physiques pertinentes dont les valeurs numériques sont données en fin d'énoncé.
- Q.7** À l'aide des caractéristiques du cœur fournies, proposer une estimation de la puissance volumique libérée dans le combustible lorsque le réacteur est en fonctionnement nominal.
- Q.8** Proposer une définition plausible de la puissance linéique et en estimer la valeur. Comment expliquer l'existence d'une puissance linéique maximale ?

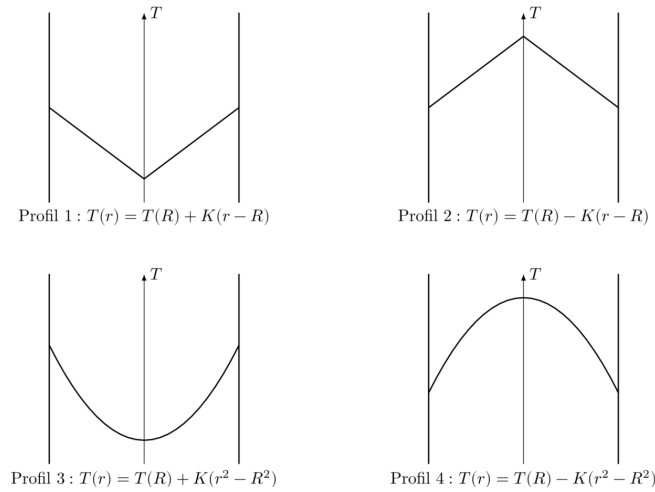


FIGURE 3 – Profils de température

- Q.9** En supposant que la température en $r = R$ est celle de l'eau au voisinage des crayons, calculer numériquement la température au centre du crayon (en $r = 0$). Commenter.
- Q.10** Pourquoi la température en $r = R$ ne vaut-elle pas exactement la température de l'eau indiquée dans les données ?
- Q.11** À l'aide d'une démarche à préciser (une page maximum), proposer un modèle conduisant à une meilleure estimation de la température au cœur du crayon en tenant compte du constat précédent. Ne pas hésiter, pour cela, à introduire les grandeurs physiques pertinentes en proposant, le cas échéant, des ordres de grandeur raisonnables.
- Q.12** En réalité, la conductivité thermique du dioxyde d'uranium n'est pas indépendante de la température mais possède le profil donné FIGURE 4. Expliquer, de manière qualitative mais argumentée, de quelle manière est modifié le profil de température et, en particulier, si on peut s'attendre à une température plus élevée ou plus basse que celle calculée précédemment.

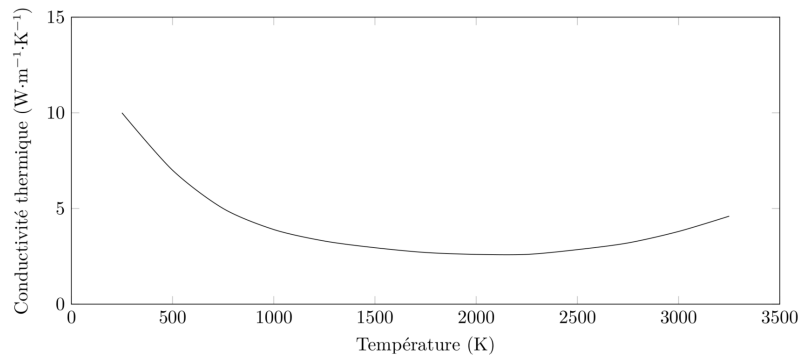


FIGURE 4 – Évolution de la conductivité thermique du dioxyde d'uranium

II – Du réacteur aux turbines

Au niveau du circuit secondaire, la centrale fonctionne comme représenté sur le schéma de la FIGURE 5. Dans ce schéma x désigne le titre de vapeur, c'est à dire le rapport entre le débit massique de vapeur d'eau et le débit massique total (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 haute pression, 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 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 sort 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).

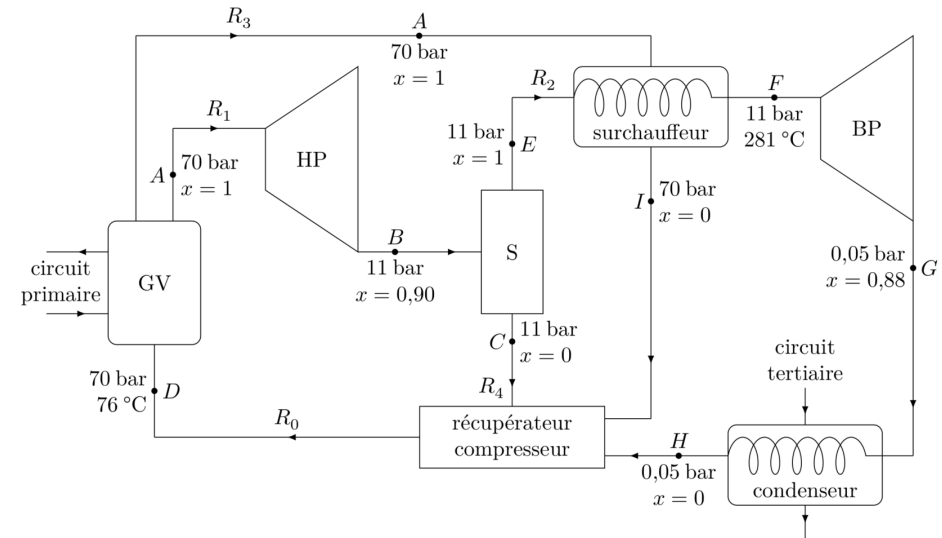


FIGURE 5 – Circuit secondaire d'une centrale nucléaire

II.A 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 ;
- P_u la puissance fournie au fluide par les forces autres que pressantes ;
- 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.

Q.13 Énoncer le premier principe industriel en termes de puissance pour cet élément.

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

$$\sum_{i(\text{sorties})} R_i h_{s,i} - \sum_{j(\text{entrées})} R_j h_{e,j} = P_u + P_{th}$$

II.B Analyse du cycle

- Q.14** Placer tous les états $A, B, C, \dots, I$ sur le diagramme entropique de l'eau fourni FIGURE 6 dans le document réponse à rendre avec la copie.
- Q.15** Par lecture graphique, déterminer la valeur de l'enthalpie massique h_F de l'eau dans l'état (F) .
- Q.16** Calculer les valeurs des enthalpies massiques h_B et h_G à partir des données numériques fournies.
- Q.17** Estimer la valeur de l'enthalpie massique h_D .
- Q.18** 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 .
- Q.19** 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.
- Q.20** Calculer numériquement les différents débits.

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).

- Q.21** 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 ?

Le condenseur fonctionne de la même manière que le surchauffeur.

- Q.22** 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.

II.C Rendement du cycle

- Q.23** 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.)
- Q.24** À l'aide d'une démarche à préciser, déterminer une estimation du rendement que l'on obtiendrait en l'absence de surchauffeur. Commenter.

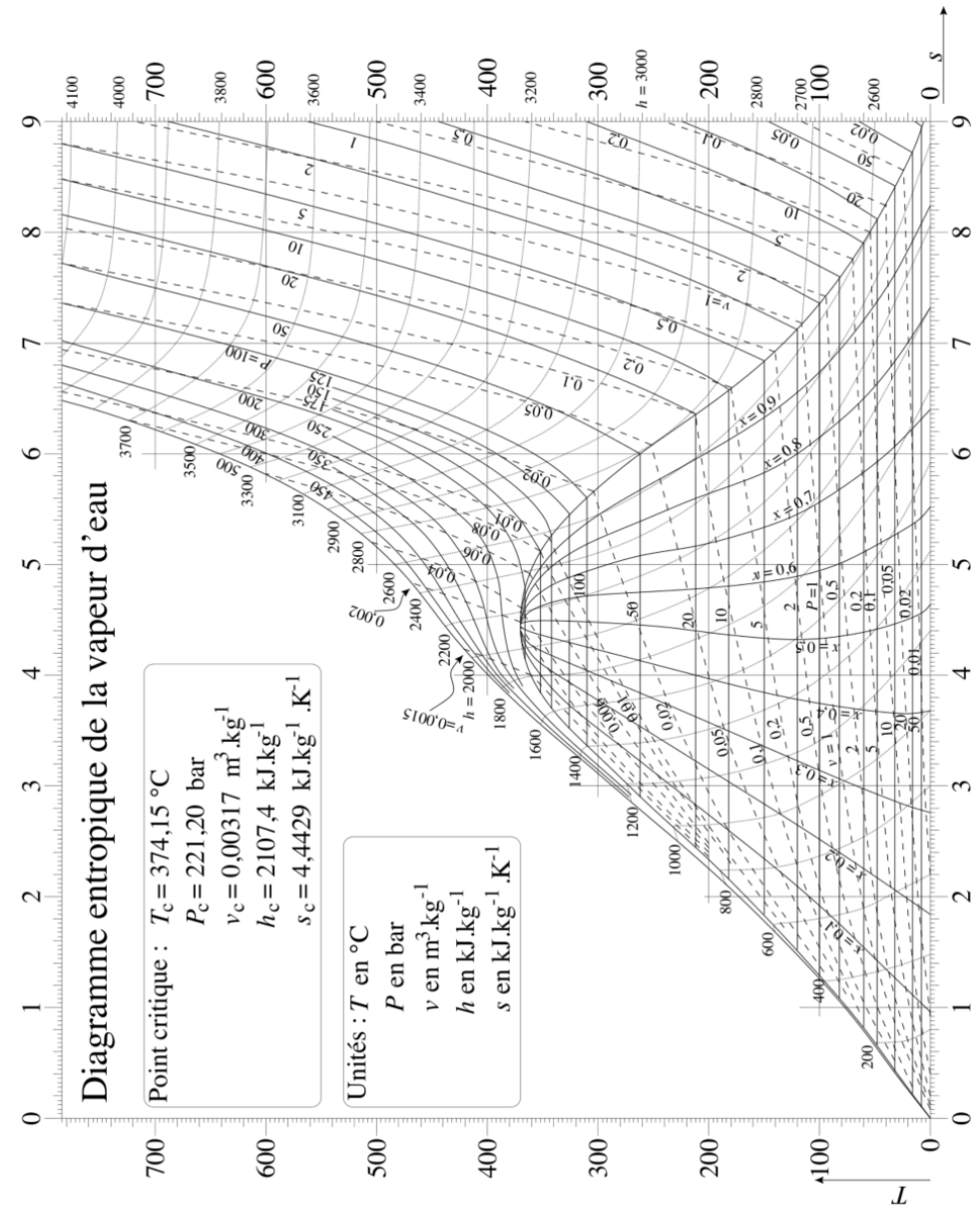


FIGURE 6 – Diagramme entropique de l'eau

Formulaire d’analyse vectorielle

En coordonnées cylindriques, pour un champ scalaire $f(r, \theta, z)$:

$$\overrightarrow{\text{grad}}f = \frac{\partial f}{\partial r}\vec{u}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial f}{\partial \theta}\vec{u}_\theta + \frac{\partial f}{\partial z}\vec{u}_z \quad \text{et} \quad \Delta f = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial f}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

et pour un champ vectoriel $\vec{A} = A_r(r, \theta, z)\vec{u}_r + A_\theta(r, \theta, z)\vec{u}_\theta + A_z(r, \theta, z)\vec{u}_z$:

$$\text{div}\vec{A} = \frac{1}{r}\frac{\partial(rA_r)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

Données numériques

Constantes

Fission	
Énergie libérée par un ^{235}U	$2,0 \times 10^2 \text{ MeV}$
Constante d’Avogadro	
$\mathcal{N}_A$	$6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Unités énergétiques	
1 eV	$1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$
1 tonne équivalent charbon	$29,3 \times 10^9 \text{ J}$
1 tonne équivalent pétrole	$41,9 \times 10^9 \text{ J}$

Caractéristiques du cœur du réacteur

Pastille de combustible	
forme géométrique	cylindre
Hauteur	14 mm
Diamètre	8,2 mm
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 de UO_2 par assemblage	600 kg
Combustible (dioxyde d’uranium)	
Conductivité thermique moyenne	$5,0 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Température de fusion	$2865 \text{ }^\circ\text{C}$

Circuit primaire	
Débit par boucle	$27,2 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Nombre de boucles	4
Pression	155 bar
Température à l’entrée	$296 \text{ }^\circ\text{C}$
Température au voisinage des crayons	$332 \text{ }^\circ\text{C}$
Température à la sortie	$330 \text{ }^\circ\text{C}$
Surface d’échange	8000 m^2
Densité de courant thermique en périphérie d’un crayon (fonctionnement nominal)	$157 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$
Puissance linéique (fonctionnement nominal)	$470 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}$
Puissance linéique à ne pas dépasser	$590 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}$

Caractéristiques du circuit secondaire

Générateur de vapeur $D \rightarrow A$	
Débit de vapeur	$640 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
État physique à l’entrée	liquide
Température entrée	$76 \text{ }^\circ\text{C}$
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	
État physique à l’entrée	vapeur sèche
Température entrée	$250 \text{ }^\circ\text{C}$
Pression entrée	11 bar
État physique à la sortie	vapeur humide
Titre en vapeur à la sortie	0,88
Pression sortie	0,05 bar

Propriétés de l’eau

Pression de 70 bar	
Température d’équilibre liquide – vapeur	$286 \text{ }^\circ\text{C}$
Enthalpie massique du liquide	$1268 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Enthalpie massique de la vapeur	$2772 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entropie massique du liquide	$3,12 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entropie massique de la vapeur	$5,81 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Pression de 11 bar	
Température d’équilibre liquide – vapeur	$184 \text{ }^\circ\text{C}$
Enthalpie massique du liquide	$781 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Enthalpie massique de la vapeur	$2781 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entropie massique du liquide	$2,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entropie massique de la vapeur	$6,55 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

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)	$250 \text{ }^\circ\text{C}$
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

Pression de 0,05 bar	
Température d’équilibre liquide – vapeur	$33 \text{ }^\circ\text{C}$
Enthalpie massique du liquide	$137,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Enthalpie massique de la vapeur	$2561 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entropie massique du liquide	$0,48 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entropie massique de la vapeur	$8,39 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$