

NOTE IMPORTANTE

- Une grande importance sera attribuée à la qualité de la REDACTION, de la présentation et au soin de la copie.
- Tous les calculs devront être effectués de manière littérale dans un premier temps. **Les résultats littéraux seront encadrés et tous les résultats numériques soulignés.**
- Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au professeur, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Exercice 1: Cycle de Hirn d'une centrale thermique

On s'intéresse à l'installation représentée figure 1, qui modélise une centrale thermique à flamme (gaz ou charbon). Le fluide thermodynamique est de l'eau, qui suit un cycle de Hirn avec resurchauffe.

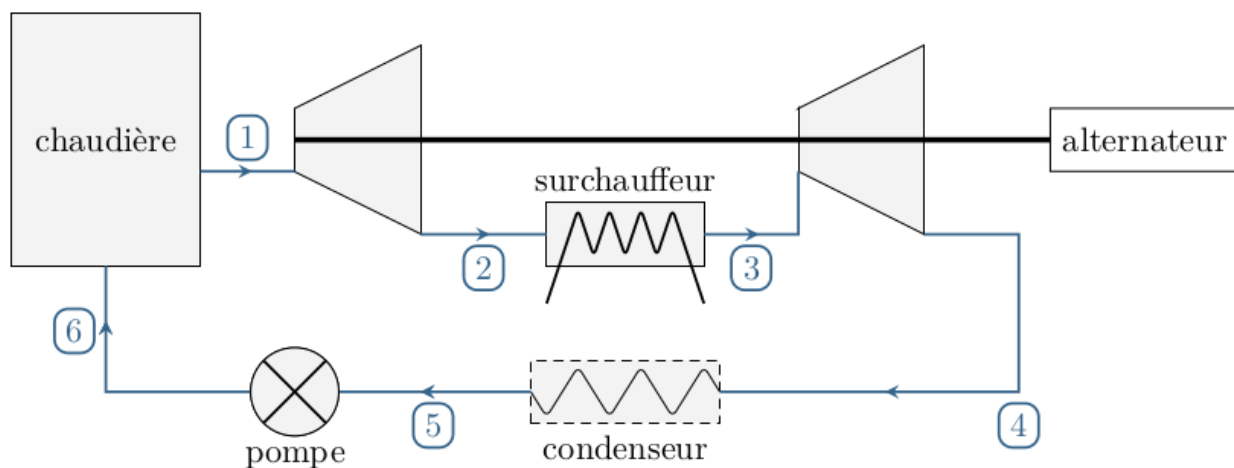


Figure 1 – Turbine à vapeur étagée.

L'eau liquide est chauffée de manière isobare par une chaudière thermique, qui débite de la vapeur d'eau à 550 °C et 100 bar (état 1). Cette vapeur subit une détente adiabatique réversible dans une première turbine dite haute pression, d'où elle sort à la pression de 10 bar (état 2). Un surchauffeur isobare, lui aussi relié à la chaudière, ramène la vapeur à la température initiale (état 3). La vapeur passe ensuite dans la seconde turbine, dite basse pression, où elle subit toujours une détente adiabatique réversible et d'où sort de l'eau à la température de 40 °C (état 4). Cette eau est envoyée dans un condenseur d'où elle subit une transformation isobare et sort à l'état de liquide juste saturant (état 5), puis elle est pompée de manière adiabatique réversible (état 6) et renvoyée en entrée du générateur de vapeur où elle subit un échauffement isobare. Les arbres des deux turbines sont liés entre eux.

1. Tracer le cycle parcouru par l'eau dans le diagramme entropique de la figure 2 présenté en annexe (à rendre avec votre copie) en justifiant votre tracé. Pourquoi le point 6 est-il confondu avec le point 5 ?

Aide : les isobares en phase liquide sont toutes confondues avec la courbe d'ébullition

2. En déduire la température de l'eau dans l'état 2 et l'état de l'eau dans l'état 4.
3. Déterminer les enthalpies massiques de l'eau aux six points du cycle. Comment interpréter physiquement l'égalité $h_5 = h_6$?
4. Déterminer le travail massique disponible sur l'arbre des turbines.
5. Si on considère que l'alternateur a un rendement électromécanique de 90 %, déterminer le débit d'eau à imposer pour obtenir une puissance électrique de 400 MW.
6. Quelle est la quantité de chaleur massique dépensée au surchauffeur ?
7. Calculer le rendement thermodynamique de l'installation.

Exercice 2: Puits canadien

Aide mathématique :

On a $f'(x) = \frac{df}{dx}(x) = \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{f(x+dx) - f(x)}{dx}$ donc quand dx est un élément de longueur infiniment petite, on approxime $\frac{df}{dx}(x) \approx \frac{f(x+dx) - f(x)}{dx}$

On étudie un puits canadien, qui est un système de préchauffage passif de l'air utilisant l'inertie thermique du sol. Il s'agit d'une simple conduite enterrée à environ 2 m de profondeur dans laquelle transite l'air utilisé pour le renouvellement de l'habitation, comme schématisé figure 1. Sous nos latitudes, la température moyenne du sol vaut environ 11 °C et ses variations sont relativement faibles à la profondeur où est enterré le tuyau. Ce faisant, un puits canadien permet non seulement de réchauffer l'air entrant dans la maison en hiver, mais aussi de le rafraîchir en été, permettant de se passer de système de climatisation. Cette technique est de plus en plus utilisée en construction neuve, mais reste difficilement accessible en rénovation à cause des travaux de terrassement qu'elle exige.

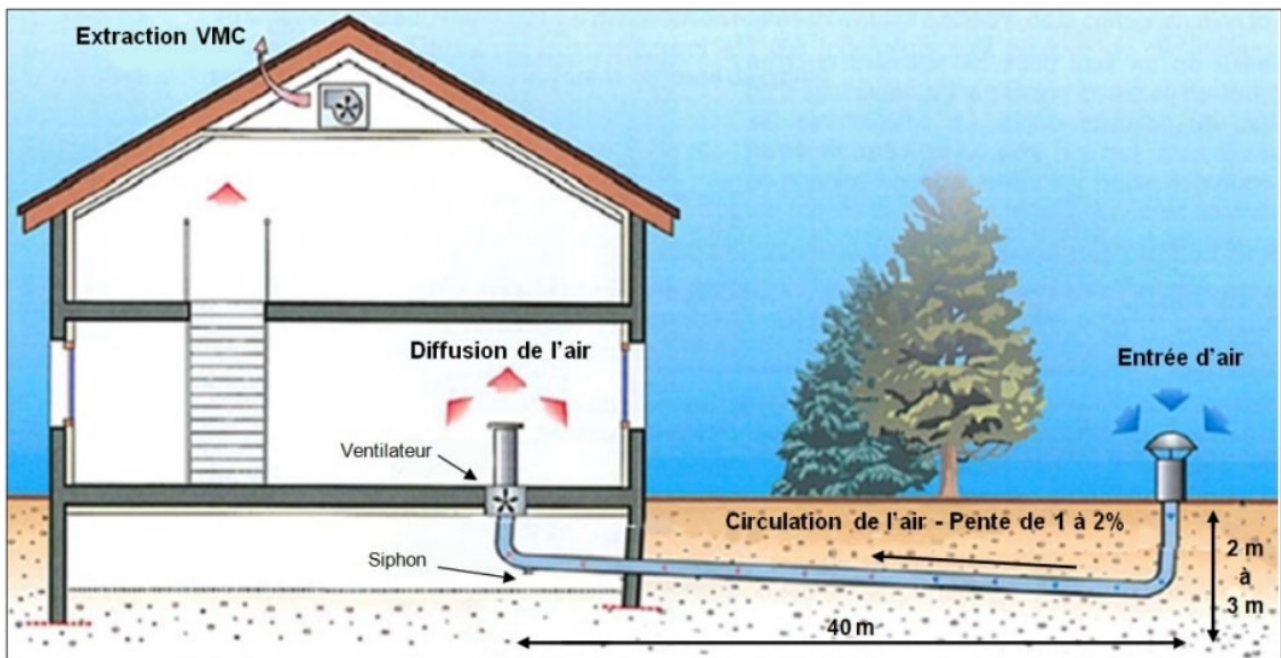


Figure 1 – Principe du préchauffage à l'aide d'un puits canadien.

On suppose l'air dans la conduite en écoulement stationnaire incompressible. L'air qui circule dans le tuyau horizontal reçoit de la chaleur de la part du sol, de température supposée constante, et on note

$$d\Phi = \alpha dx (T_{sol} - T(x))$$

le flux thermique (puissance thermique) reçu par un élément de longueur dx infiniment petite. La coordonnée x croît quand on se rapproche de la maison et l'abscisse $x=0$ correspond au point d'entrée d'air.

1. Quelle est la dimension de α ?
2. En effectuant un bilan d'énergie en régime stationnaire sur un système élémentaire qu'on précisera, montrer que la température de l'air à l'intérieur du tuyau horizontal est solution de l'équation différentielle

$$\frac{dT}{dx} + \frac{T(x)}{l_0} = \frac{T_{sol}}{l_0}$$

où l_0 s'exprime en fonction de D_m , débit massique de l'air, c_p capacité thermique massique de l'air, et du coefficient α .

3. Résoudre cette équation différentielle. On appelle T_{ext} la température de l'air extérieur. Quelle est la température limite que peut atteindre l'air à l'intérieur du tuyau ? Commenter l'intérêt du puits canadien. Est-il utile en toute saison ?

4. En déduire la puissance thermique économisée sur le chauffage de l'habitation lorsque l'air a parcouru une longueur L de tuyau.

On considère le réseau expérimental de courbes $\Phi = f(L)$ donné figure 2, obtenu pour une température du sol $T_{sol} = 11^\circ C$ et une température d'entrée de l'air $T_{ext} = -5^\circ C$. D est le diamètre du tuyau,

$Q = D_m / \mu$ le débit volumique de l'écoulement d'air. Justifier que le palier atteint ne dépend que du débit volumique Q . Comment, à l'aide de ces courbes, accéder à la valeur numérique de l_0 ? Donner un ordre de grandeur de l_0 pour le réseau de courbes ci-dessous. Comment justifier, pour un débit donné, l'existence d'un réseau de courbes qui varient en fonction du diamètre D du tuyau?

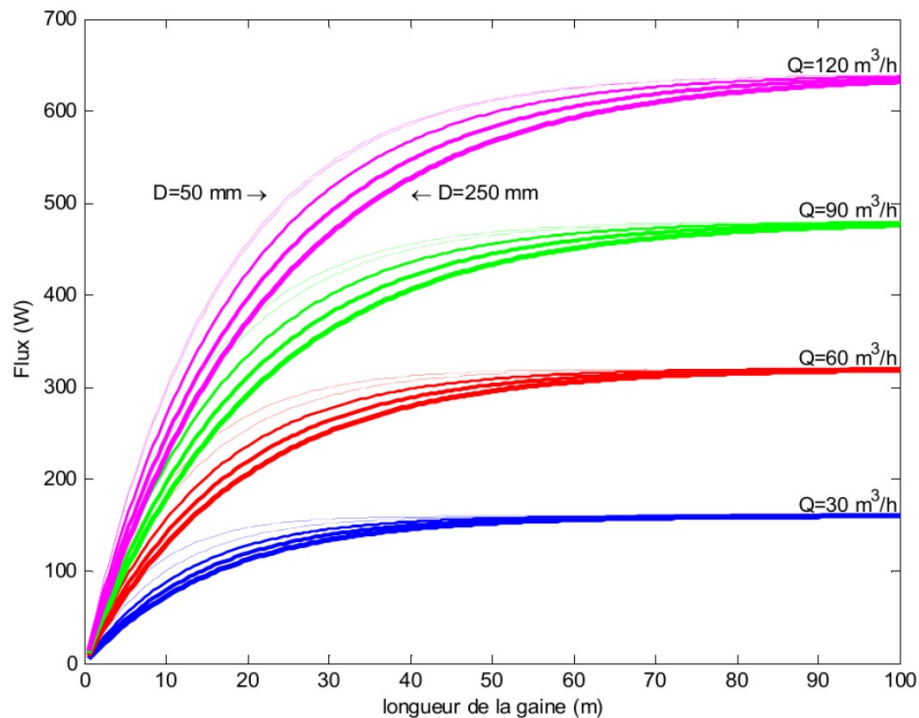


Figure 2 – Relevés expérimentaux.

Exercice 3 : Liquéfaction du gaz naturel (à ne chercher que si les précédents sont entièrement terminés. Exercice d'entraînement)

En plus du transport par gazoduc, l'approvisionnement en gaz naturel peut également se faire par bateau, ce qui permet de s'affranchir d'une infrastructure très lourde à construire. Pour transporter une masse élevée dans un volume restreint, le gaz naturel doit être liquéfié avant embarquement, puis regazéifié une fois débarqué avant d'être injecté sur le réseau de distribution domestique. La France compte trois terminaux permettant cette regazéification, à Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), Montoir-de-Bretagne (Loire Atlantique) et Dunkerque (Nord). Cet exercice s'intéresse au fonctionnement d'un terminal de liquéfaction, tel qu'il se trouve dans le pays exportateur.

On étudie plus précisément le procédé de Linde de liquéfaction du méthane, utilisé par exemple dans l'usine de Snøhvit en Norvège, d'où provient la majorité du GNL importé en France. Un schéma de principe est représenté figure 1 avec les différents états du fluide numérotés de 0 à 10, permettant d'obtenir un débit massique D_{m10} de méthane liquide saturant à la pression $P_{10} = 1 \text{ bar}$ à une température

$T_{10} = -161,7^\circ C$ (état 10).

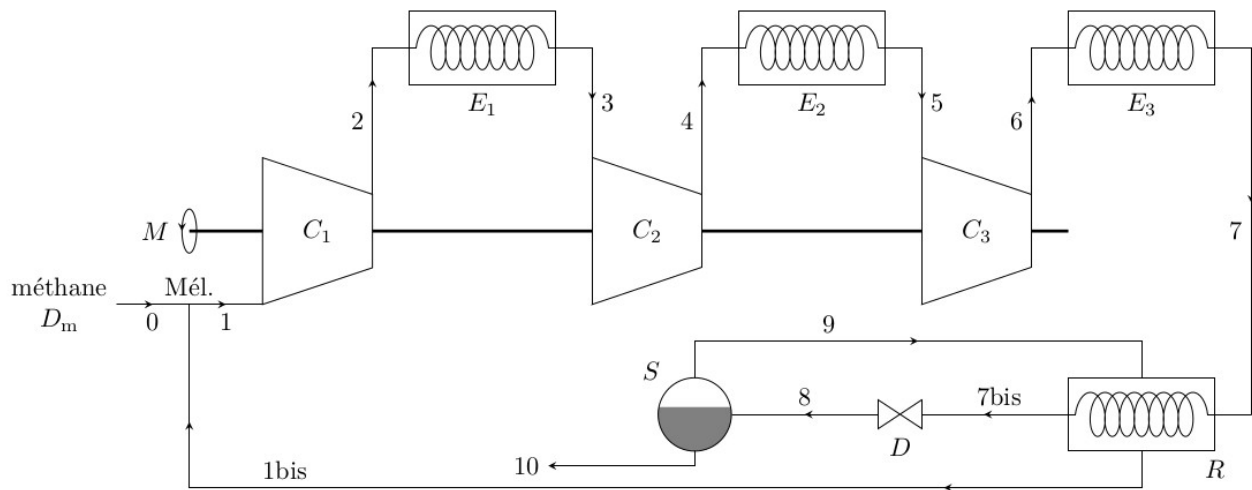


Figure 1 – Représentation par schéma bloc du procédé Linde.

Pour cela, on introduit un débit massique $D_m = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ de méthane gazeux à la température $T_0 = 7,0^\circ \text{C}$ et à la pression $P_0 = 1,0 \text{ bar}$ (état 0). Du gaz non liquéfié est réinjecté par un mélangeur globalement calorifugé, sans partie mobile et fonctionnant de façon isobare. La pression en 1 vaut donc $P_1 = 1,0 \text{ bar}$.

Trois compresseurs C_1, C_2 et C_3 fonctionnant de façon adiabatique et réversible, solidaires d'un même arbre entraîné sans perte par un moteur M , ainsi que trois échangeurs de chaleurs isobares (systèmes de refroidissement) E_1, E_2 et E_3 permettent d'obtenir en l'état 7 du gaz à la pression $P_7 = 100 \text{ bar}$ et à la température $T_7 = -63^\circ \text{C}$. Les pressions intermédiaires sont égales à $P_2 = 5,0 \text{ bar}$ et $P_4 = 25 \text{ bar}$. L'enthalpie massique du fluide dans l'état 3 est $h_3 = 866 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et dans l'état 5, $h_5 = 840 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Un régénérateur R , échangeur thermique isobare globalement calorifugé et fonctionnant de façon réversible, permet de refroidir le gaz comprimé non plus à -63°C mais à -82°C (état 7bis). Ce gaz refroidi est détendu isenthalpiquement de 100 bar à 1 bar par le détendeur D jusqu'à l'état diphasé 8 de titre massique en vapeur $x = 0,61$. Les phases liquide et gazeuse sont séparées dans le séparateur isobare S . La vapeur saturante sèche sortant du séparateur est recyclée dans le régénérateur R , puis réinjectée au niveau du mélangeur.

On se place en régime permanent d'écoulement. On négligera toute variation d'énergie mécanique du fluide.

1. En exploitant le diagramme en annexe, montrer que pour condenser totalement du gaz naturel assimilé à du méthane gazeux pur à la pression de 1 bar, il faut se placer à une température d'environ -162°C . Quel est alors le volume massique du GNL ?
2. On note respectivement les débits massiques de fluide D_{m1} et D_{m1bis} aux états 1 et 1bis. En utilisant le titre massique en vapeur x dans le séparateur, établir une relation entre D_{m1bis} , D_{m1} et x . Déterminer les valeurs des débits massiques D_{m1} et D_{m1bis} .
3. Déterminer graphiquement les enthalpies massiques aux états 7, 7bis et 9 respectivement notées h_7 , h_{7bis} et h_9 .
4. Établir le bilan énergétique global du régénérateur R globalement calorifugé. En déduire l'enthalpie massique h_{1bis} .
5. Écrire le premier principe appliqué au mélangeur. En déduire h_1 et placer le point 1 sur le diagramme.
6. La transformation au niveau du compresseur C_1 étant supposée isentropique, déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique h_2 à l'état 2. En déduire la puissance Pu_1 fournie par le moteur au compresseur C_1 .