

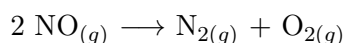
DS n°2
 (Samedi 11 octobre 2025 - Durée 4h00)

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.

Cet énoncé est accompagné d'un document réponse à rendre avec la copie.

1 CHIMIE - Décomposition du monoxyde d'azote

La décomposition à $\theta = 1151$ °C du monoxyde d'azote a lieu suivant la réaction d'équation :



avec une constante de vitesse k . À volume V constant, on a déterminé la vitesse initiale v_0 de cette réaction pour plusieurs valeurs de la pression partielle initial p_0 en $\text{NO}_{(g)}$. Les résultats sont groupés dans le tableau ci-dessous :

p_0 (bar)	0.13	0.20	0.26	0.39	0.53
v_0 (mol.L ⁻¹ .min ⁻¹)	$1,4 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$

- (a) Exprimer $[\text{NO}]_0$ en fonction de p_0 . En déduire les valeurs numériques de $[\text{NO}]_0$ (en mol.L⁻¹) correspondant aux pressions p_0 du tableau.
 (b) À l'aide d'une régression linéaire, déterminer l'ordre de la réaction (supposé entier) en se basant sur les valeurs de v_0 et de $[\text{NO}]_0$.
- Déterminer la valeur numérique de la constante de vitesse k pour la température $\theta = 1151$ °C.

Plusieurs mesures de k à différentes températures ont donné les résultats du tableau ci-dessous :

θ (°C)	974	1057	1260
k (L.mol ⁻¹ .min ⁻¹)	6,3	28	522

- Écrire l'équation différentielle donnant l'évolution de la concentration $[\text{NO}](t)$. En déduire l'expression de $[\text{NO}](t)$.
- Déterminer l'expression du temps de demi-réaction $\tau_{1/2}$ en fonction de $[\text{NO}]_0$, et k . Application numérique à $\theta = 1057$ °C et pour $p_0 = 0.26$ bar. Calculer $\tau_{1/2}$.
- Donner la loi d'Arrhénius et en déduire l'énergie d'activation E_a de cette réaction.

2 Sécurité d'une plongée à très grande profondeur : exemple de l'expédition Deepsea Challenger

Ce sujet porte sur l'exploration des très grandes profondeurs à l'aide de sous-marins autonomes et s'attache à discuter des contraintes de sécurité liées à ces expéditions.

Il reprend en particulier les données disponibles sur l'expédition menée par le réalisateur James Cameron dans la fosse des Mariannes, fosse océanique la plus profonde connue à ce jour, et son sous-marin nommé Deepsea Challenger.

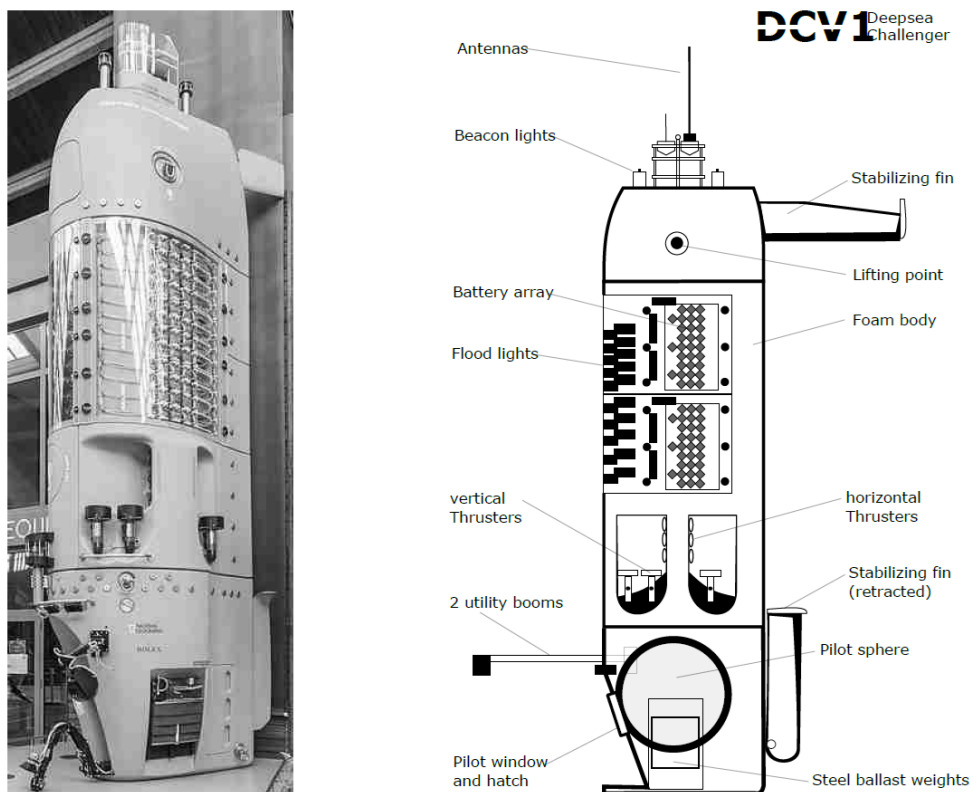


Figure 1 Le sous-marin Deepsea Challenger (Wikimedia)

Certaines données numériques et un formulaire sont regroupés en fin d'énoncé ; d'autres données relèvent de l'initiative du candidat.

I Pression et plongée

I.A – Pression hydrostatique

La contrainte principale à laquelle est soumis un sous-marin est celle liée à la pression exercée par le fluide environnant sur la structure de l'habitacle. L'évaluation des pressions rencontrées au fond de l'océan est donc cruciale pour déterminer les efforts que devront reprendre les parois qui protègent le pilote.

On se place dans un repère cartésien de centre O , placé sur l'interface eau-air, et d'axe Oz descendant.

Q 1. On suppose que le champ de pression P du fluide vérifie la relation $\rho \vec{g} - \overrightarrow{\text{grad}} P = \vec{0}$ (la démonstration de cette relation n'est pas attendue). Proposer une interprétation physique de celle-ci et indiquer la signification de chacun des termes.

On suppose, dans un premier temps, que l'eau de mer est un fluide incompressible de masse volumique $\rho_0 = \rho(z = 0)$.

Q 2. En déduire l'expression de la pression $P(z)$ à une profondeur donnée z , en fonction de P_0 la pression atmosphérique, g l'intensité de pesanteur uniforme qui règne dans l'océan, ρ_0 et z .

Lorsqu'on approche des profondeurs atteintes par James Cameron, le modèle du fluide incompressible peut éventuellement être remis en cause. On conserve l'hypothèse isotherme, mais on cherche à modéliser les variations de la masse volumique en introduisant le coefficient de compressibilité isotherme de l'eau par

$$\chi_T = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial P} \right|_T.$$

On considère désormais que l'océan est isotherme, mais que la masse volumique ρ est variable.

Q 3. Montrer que

$$\chi_T = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_T.$$

Q 4. On suppose que la grandeur χ_T est une constante. En utilisant la relation de la statique des fluides, montrer que la masse volumique varie avec la profondeur selon

$$\rho(z) = \frac{\rho_0}{1 - \rho_0 \chi_T g z}.$$

Q 5. En déduire que l'on a

$$P(z) = P_0 - \frac{1}{\chi_T} \ln(1 - \chi_T \rho_0 g z).$$

Q 6. La pression dans la fosse des Mariannes (profondeur $z_{\max} = 10,9$ km) a été mesurée à $1,13 \times 10^8$ Pa. Le modèle prenant en compte la compressibilité de l'eau est-il suffisant pour prédire la pression à de telles profondeurs ? Proposer une amélioration de ce modèle.

Pour résister à une telle pression, il faut renforcer toutes les structures porteuses et notamment équiper la zone habitable sphérique de parois d'une épaisseur de plus de 5 cm d'acier. Le surpoids lié à cette structure est contrebalancé par un ensemble de plaques de mousse spécialement développées qui assure la flottabilité du sous-marin.

Données et formulaire

Constantes diverses

Accélération de la pesanteur

$$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Données sur l'eau de mer

Masse volumique

$$\rho_0 = 1,02 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Viscosité dynamique à 20 °C

$$\eta = 1,00 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Coefficient de compressibilité isotherme

$$\chi_T = 4,41 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$

Coefficient de compressibilité isentropique

$$\chi_S = 4,10 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$

Permittivité diélectrique relative

$$\epsilon_r = 75$$

Conductivité électrique

$$\gamma = 5 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$$

Données sur Deepsea Challenger

Profondeur de la fosse des Mariannes

$$z_{\text{max}} = 10,9 \text{ km}$$

Diamètre équivalent du sous-marin

$$D_{DC} = 2,11 \text{ m}$$

Diamètre intérieur équivalent de la zone habitable du sous-marin

$$D = 1,09 \text{ m}$$

Hauteur du sous-marin

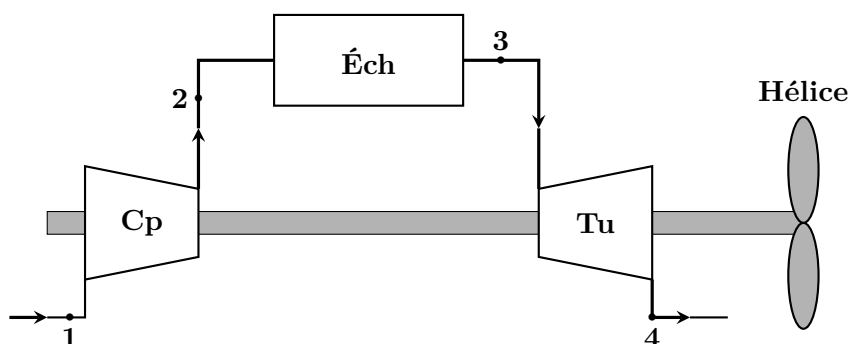
$$H_{DC} = 7,30 \text{ m}$$

3 Propulsion d'un navire

Constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

On prendra : $T \text{ (K)} = \theta \text{ (}^\circ\text{C)} + 273$

L'installation décrite ci-dessous sert à la propulsion d'un navire. Son schéma synoptique est donné ci-dessous. Elle est composée d'un compresseur (Cp), d'un échangeur thermique (Éch) et d'une turbine (Tu). Le compresseur et la turbine sont montés sur le même arbre, qui sert en plus à entraîner l'hélice propulsant le navire. Ainsi, la turbine sert de moteur et entraîne à la fois le compresseur et l'hélice.



Dans tout le problème, les machines fonctionnent en régime stationnaire. On néglige les variations d'énergie cinétique macroscopique et d'énergie potentielle de pesanteur.

Le fluide utilisé dans l'installation est de l'air de masse molaire $M_a = 29 \text{ g.mol}^{-1}$. Il circule dans le dispositif avec un débit massique constant $\mathcal{D}_m$. Au cours de son passage dans les différentes machines, il décrit les évolutions suivantes :

- Étape 1 $\rightarrow$ 2 : L'air est aspiré et comprimé dans (Cp). Le compresseur est supposé idéal et fonctionne de manière adiabatique et réversible.
- Étape 2 $\rightarrow$ 3 : L'air passe dans un échangeur thermique où, au contact avec une source chaude, il subit un chauffage isobare.
- Étape 3 $\rightarrow$ 4 : L'air entre dans la turbine idéale (Tu) qui fonctionne de façon adiabatique et réversible. Il est refoulé en (4) sous la pression $P_4 = P_1$.

Données numériques en certains points du dispositif :

$$T_1 = 300 \text{ K} ; P_1 = 1,0 \text{ bar} ; P_2 = 10 \text{ bar} \text{ et } T_3 = 1300 \text{ K}$$

I. Calcul dans le modèle du gaz parfait

Dans cette partie l'air est assimilé à un gaz parfait diatomique d'exposant adiabatique $\gamma = 1,40$.

- Q1.** a) Démontrer la relation de Mayer pour un gaz parfait. On explicitera cette relation pour n moles de gaz. En déduire les expressions des capacités thermiques massiques c_v et c_p du gaz en fonction de γ et de la constante massique du gaz $r = R/M_a$.
 b) Application numérique : calculer c_v et c_p .
- Q2.** On pose $\beta = \frac{P_2}{P_1}$. Déterminer l'expression de la température de l'air en sortie du compresseur T_2 en fonction de β , γ et T_1 . Déterminer également l'expression de la température de l'air en sortie de turbine T_4 en fonction de β , γ et de T_3 .

Applications numériques : calculer T_2 et T_4 .

- Q3.** Représenter schématiquement les évolutions du fluide sur le diagramme de Clapeyron (v, P).
- Q4.** Déterminer l'expression du travail utile massique total $w_{u,t}$ échangé au niveau du compresseur (Cp) et de la turbine (Tu). Commenter le signe de $w_{u,t}$.
- Q5.** Quel débit massique $\mathcal{D}_m$ doit-on imposer au fluide de l'installation pour obtenir une puissance utile pour l'hélice égale à 50 kW ?
- Q6.** a) Calculer la chaleur massique q_{23} reçue par l'air dans l'échangeur thermique.
b) Proposer une définition du rendement r de cette installation. Le calculer numériquement.

II. Utilisation du diagramme enthalpique de l'air

Compte-tenu de la valeur élevée de la pression P_2 on remet en cause dans cette partie le modèle du gaz parfait. L'étude sera désormais conduite en utilisant le diagramme enthalpique de l'air fourni avec le sujet, qui sera rendu avec la copie.

- Q7.** Montrer que la pente des courbes isentropiques est positive.
- Q8.** Placer les points (1), (2), (3) et (4) sur le diagramme enthalpique de l'air. En déduire les enthalpies massiques h_1 , h_2 , h_3 et h_4 .
- Q9.** a) Déterminer l'expression du travail utile massique totale $w'_{u,t}$ échangé au niveau du compresseur et de la turbine.
b) Quel est le nouveau débit massique $\mathcal{D}'_m$ à imposer pour que l'hélice dispose d'une puissance de 50 kW ?
- Q10.** Calculer la nouvelle valeur du rendement r' de ce dispositif.

4 Rénovation énergétique des bâtiments

Dans cette partie, on s'intéresse aux économies d'énergie et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone essentiellement) qu'on peut réaliser sur Terre en améliorant la thermique des bâtiments : isolation, entretien, mode de chauffage. On prend l'exemple d'une copropriété dont voici une description succincte :

- la résidence est constituée de 10 bâtiments équivalents (3 bâtiments doubles + 4 bâtiments simples, figure 9) ;
- les murs et les toitures des bâtiments ne disposent d'aucun revêtement isolant spécifique ;
- le chauffage est assuré par une chaudière centrale à gaz de puissance nominale égale à 998 kW située au sous-sol du bâtiment 3 (figure 10) ;
- chaque logement est équipé de 6 radiateurs en fonte (figure 10) alimentés par l'eau chaude sortant de la chaudière centrale via un réseau de tuyaux.



Figure 9 Plan de la résidence



(a) Chaudière



(b) Radiateur

Figure 10 Le chauffage est assuré par une chaudière centrale à gaz. L'énergie thermique est transférée aux logements par de l'eau chauffée à environ 70 °C circulant dans des radiateurs en fonte

Cette partie s'intéresse à quelques actions à court et à moyen terme qui peuvent être envisagées dans cette copropriété dans le but de réduire sa consommation énergétique et ses émissions de gaz à effet de serre.

II.A – L'existant**II.A.1) Puissance de chauffage nécessaire à la résidence**

La puissance de chauffage nécessaire à un bâtiment est évaluée en estimant les déperditions thermiques de ce bâtiment (tableau 1) et en supposant une température extérieure $T_{e,\text{ref}} = -7^\circ\text{C}$. Le confort thermique des habitants est assuré si la température intérieure des logements vaut $T_{i,\text{ref}} = 19^\circ\text{C}$.

Type	U ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	Surface S (m^2)	ψ ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	Longueur L (m)
Murs extérieurs	3,16	5650	—	—
Toiture	0,67	3514	—	—
Ouvrants (fenêtres et portes)	2,32	2496	—	—
Plancher	1,17	3514	—	—
Ponts thermiques	—	—	0,47	8249

Tableau 1 Sources de déperdition thermique de la résidence — Le coefficient de déperdition thermique U est égal à la puissance thermique perdue par unité de surface et par unité d'écart de température entre un intérieur chauffé à 19°C et l'extérieur ; pour les ponts thermiques, le coefficient de déperdition thermique est noté ψ et s'exprime par unité de longueur

Q 25. En régime stationnaire, calculer la puissance thermique P_c nécessaire au chauffage de la résidence.

II.A.2) Chauffage au gaz naturel

La chaudière fonctionne au gaz naturel qui est composé en très large majorité de méthane CH_4 .

Q 26. En 2021, le chauffage de la résidence a nécessité 1900 MW·h. Estimer la masse m_{CO_2} de dioxyde de carbone rejetée dans l'atmosphère.

II.B – Action à court terme : équilibrage du réseau de chauffage

Des gains énergétiques peuvent être réalisés immédiatement en équilibrant le réseau de chauffage, c'est-à-dire en faisant en sorte que la température dans les appartements soit la même (environ 19°C) quels que soient leurs positionnements sur le réseau de chauffage. On modélise ce réseau par un unique échangeur thermique cylindrique de longueur totale L , de rayon a constant, de conductance thermique linéique $g = 1/r$ (figure 11).

(il s'agit d'une conductance thermique par unité de longueur ; son inverse $r = 1/g$ correspond à la résistance thermique par unité de longueur).

On notera qu'on pourra écrire que la puissance thermique δP_{th} (en Watt) qui traverse une longueur élémentaire dx de paroi de l'échangeur s'écrit en valeur absolue (cf. figure 11) :

$$|\delta P_{th}| = g \, dx \, |T(x) - T_e|$$

5/2 seulement

L'eau chaude de chauffage y circule avec un débit de masse Q_m .

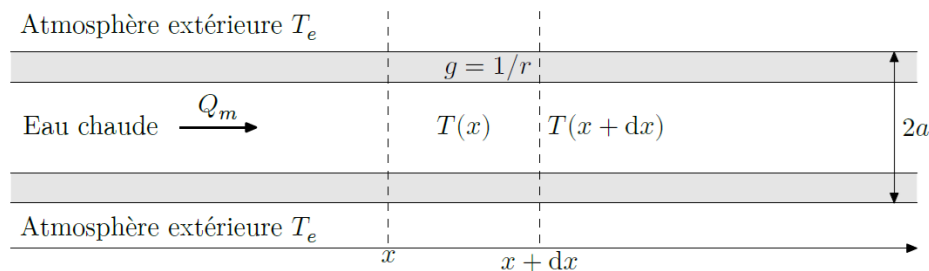


Figure 11 Modélisation du réseau de chauffage

Q 27. En régime stationnaire, montrer que, en négligeant la diffusion thermique interne à l'eau, le champ de température $T(x)$ dans l'eau vérifie :

$$\frac{dT}{dx} + \frac{T}{\xi} = \frac{T_e}{\xi} \quad (\text{II.1})$$

avec $\xi = Q_m c r$ où c est la capacité thermique massique de l'eau liquide.

Q 28. En déduire l'expression de $T(x)$ en fonction de x . On notera T_0 la température en $x = 0$.

Plus précisément, les canalisations du réseau de chauffage sont en contact avec l'air des appartements, à température $T_i(x)$, eux-mêmes séparés de l'atmosphère extérieure (température T_e) par des parois de conductance thermique linéique moyenne $g_2 = 1/r_2$ (figure 12).

Q 29. En négligeant les échanges thermiques entre les logements, déterminer l'expression du champ de température $T_i(x)$ en fonction de $T(x)$, T_e , r_1 et r_2 .

Pour la suite, on prend les valeurs numériques suivantes :

- $r_1 = 1,05 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}$,
- $r_2 = 0,32 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}$,
- $Q_m = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,
- $T_e = 7^\circ \text{C}$,
- $L = 2,0 \text{ km}$.

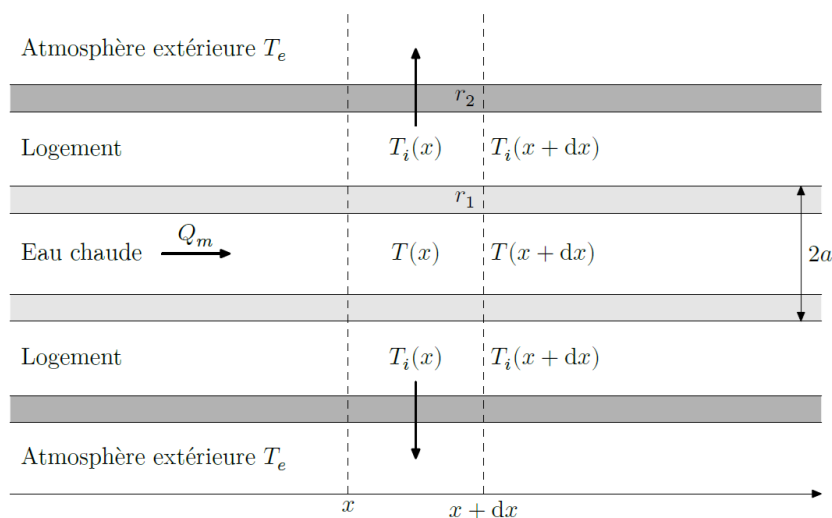


Figure 12 Détail de la modélisation du réseau de chauffage

Q 30. À quelle température T_0 doit-on chauffer l'eau en entrée du réseau de chauffage pour que la température de chaque logement soit au moins égale à $T_{\min} = 19^\circ\text{C}$?

Q 31. Quel surcoût énergétique relatif ce modèle prédit-il par rapport à un mode de chauffage qui conduirait à une situation parfaitement équilibrée où tous les appartements sont à la température $T_{\min}$?

On propose un schéma de principe d'équilibrage du réseau. Au lieu d'utiliser un circuit hydraulique à une seule maille, on opère une dérivation d'une partie de l'eau sortant de la chaudière par une canalisation calorifugée pour la réinjecter plus loin dans le circuit (figure 13). Une vanne d'équilibrage permet d'ajuster le débit $Q_{m,2}$ d'eau chaude prélevée au circuit principal.

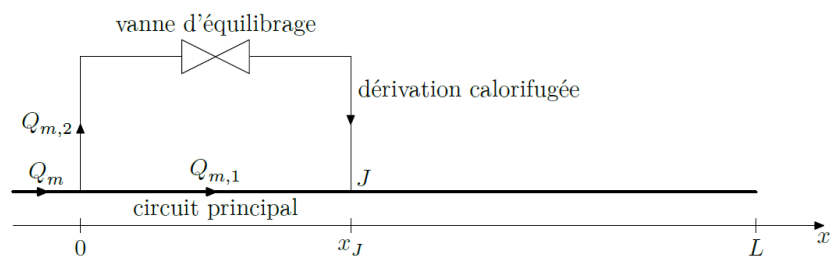


Figure 13 Principe d'équilibrage d'un réseau de chauffage

Q 32. Exprimer la température de l'eau juste après le point de jonction J en fonction de Q_m , $Q_{m,2}$, x_J notamment.

La température des logements en fonction de leur position dans le circuit de chauffage est représentée figure 14 pour différents débits de masse $Q_{m,2}$ avec Q_m fixé à $1\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ et $x_J = L/2$.

Q 33. Parmi les valeurs de $Q_{m,2}$ testées, laquelle semble la plus intéressante ? Justifier brièvement.

Q 34. Estimer l'économie relative d'énergie réalisée par rapport au réseau non équilibré.

II.C – Actions à moyen terme

II.C.1) Isolation thermique par l'extérieur

L'isolation par l'extérieur consiste à recouvrir les murs des bâtiments d'une couche d'isolant thermique. Un des isolants les plus utilisés est la laine de roche dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2.

Q 35. Exprimer l'épaisseur d'isolant à appliquer sur les murs pour réduire d'une fraction μ les déperditions énergétiques de l'ensemble de la résidence, toutes choses égales par ailleurs. En déduire le nombre de couches de plaques de laine de roche qu'il faut appliquer sur les murs de la résidence pour réduire ses déperditions énergétiques de $\mu = 45\%$. Est-il intéressant d'ajouter une couche supplémentaire de laine de roche à l'isolation précédente ?

II.C.2) Remplacement de la chaudière par une pompe à chaleur

Cette section étudie l'opportunité de remplacer la chaudière à gaz par une pompe à chaleur. Le principe d'une pompe à chaleur est rappelé sur la figure 15 et les caractéristiques de la pompe à chaleur dont l'installation est envisagée sont données dans la figure D du document réponse.

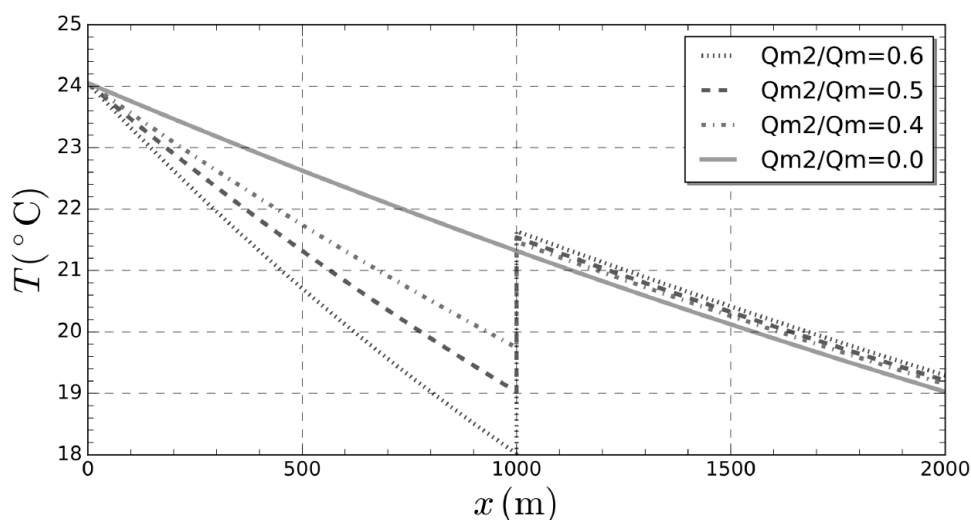


Figure 14 Champ de température au sein des logements

Épaisseur	12 cm
Conductivité thermique	$0,037 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Prix unitaire	$250 \text{ €} \cdot \text{m}^{-2}$

Tableau 2 Caractéristiques d'un panneau de laine de roche

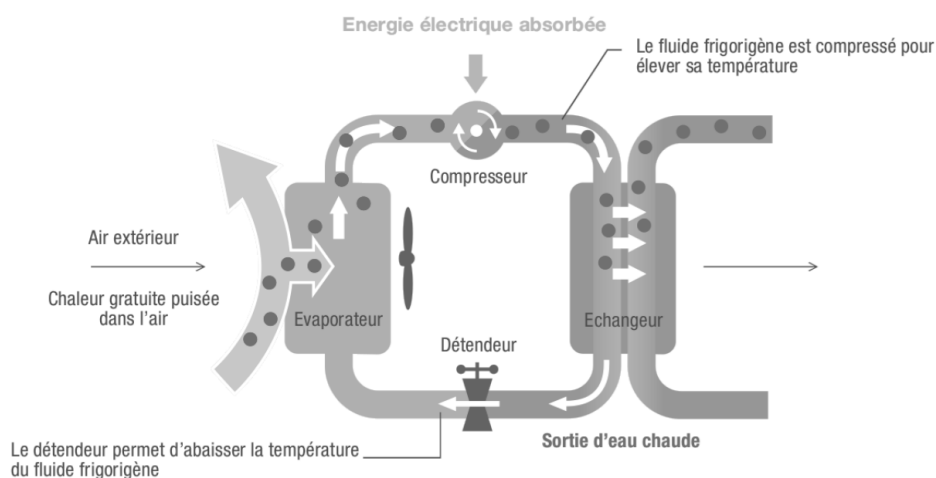


Figure 15 Schéma de principe d'une pompe à chaleur

Q 36. Évaluer le coefficient de performance COP_{rev} de la pompe à chaleur en supposant qu'elle fonctionne de façon réversible, au sens de la thermodynamique, pour les conditions de température représentatives de la copropriété étudiée (source chaude à 70°C , source froide à 7°C). Comparer la valeur obtenue aux valeurs du COP fournies dans la documentation de la pompe à chaleur considérée.

Le R407C, fluide frigorigène utilisé par la pompe à chaleur, est un mélange des fluides frigorigènes R32, R125 et R134a, miscibles en toutes proportions. Il décrit le cycle thermodynamique suivant

- 1-2 : compression isentropique de vapeur surchauffée à 10°C sous une pression de 6 bar jusqu'à une température de 90°C ;
- 2-3 : refroidissement isobare et liquéfaction isobare totale au contact de la source chaude ;
On obtient alors un liquide saturant à la fin du refroidissement.
- 3-4 : détente isenthalpique jusqu'à atteindre la pression 6 bar ;
- 4-1 : vaporisation isobare et surchauffage isobare au contact de la source froide.

Q 37. Tracer le cycle thermodynamique sur le diagramme (p, h) du fluide R407C (figure C du document réponse).

Q 38. Évaluer le COP. Comparer à la documentation technique et expliquer d'éventuelles différences.

Q 39. Évaluer le débit de masse D_m du fluide frigorigène lorsque la pompe à chaleur fonctionne en mode « priorité puissance ». Commenter.

Q 40. Toujours en mode priorité puissance, combien de pompes à chaleur faut-il associer pour satisfaire le besoin en chauffage de la résidence dans son état actuel ?

Q 41. L'utilisation de radiateurs en fonte nécessite une injection d'eau à environ 70 °C. Est-il intéressant, du point de vue financier et du point de vue de l'émission de gaz à effet de serre, de remplacer la chaudière de la copropriété par un ensemble de pompes à chaleur produisant de l'eau à cette température ? On prendra 200 €/MWh pour le coût de l'électricité et 90 €/MWh pour le coût du gaz. Discuter.

Données

Le watt-heure

$$1 \text{ W} \cdot \text{h} = 3,6 \times 10^3 \text{ J}$$

Enthalpie molaire de vaporisation de l'eau

$$\Delta_v H(\text{H}_2\text{O}) = 40,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Capacité thermique massique de l'eau à 298 K

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

Masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

O	Ti	CO ₂	CH ₄
16,0	47,9	44,0	16,0

Enthalpies molaires standard de formation à 298 K
($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)

CO _{2(g)}	CH _{4(g)}	H ₂ O _(l)
-393	-75	-285

• • • FIN • • •

Question 37

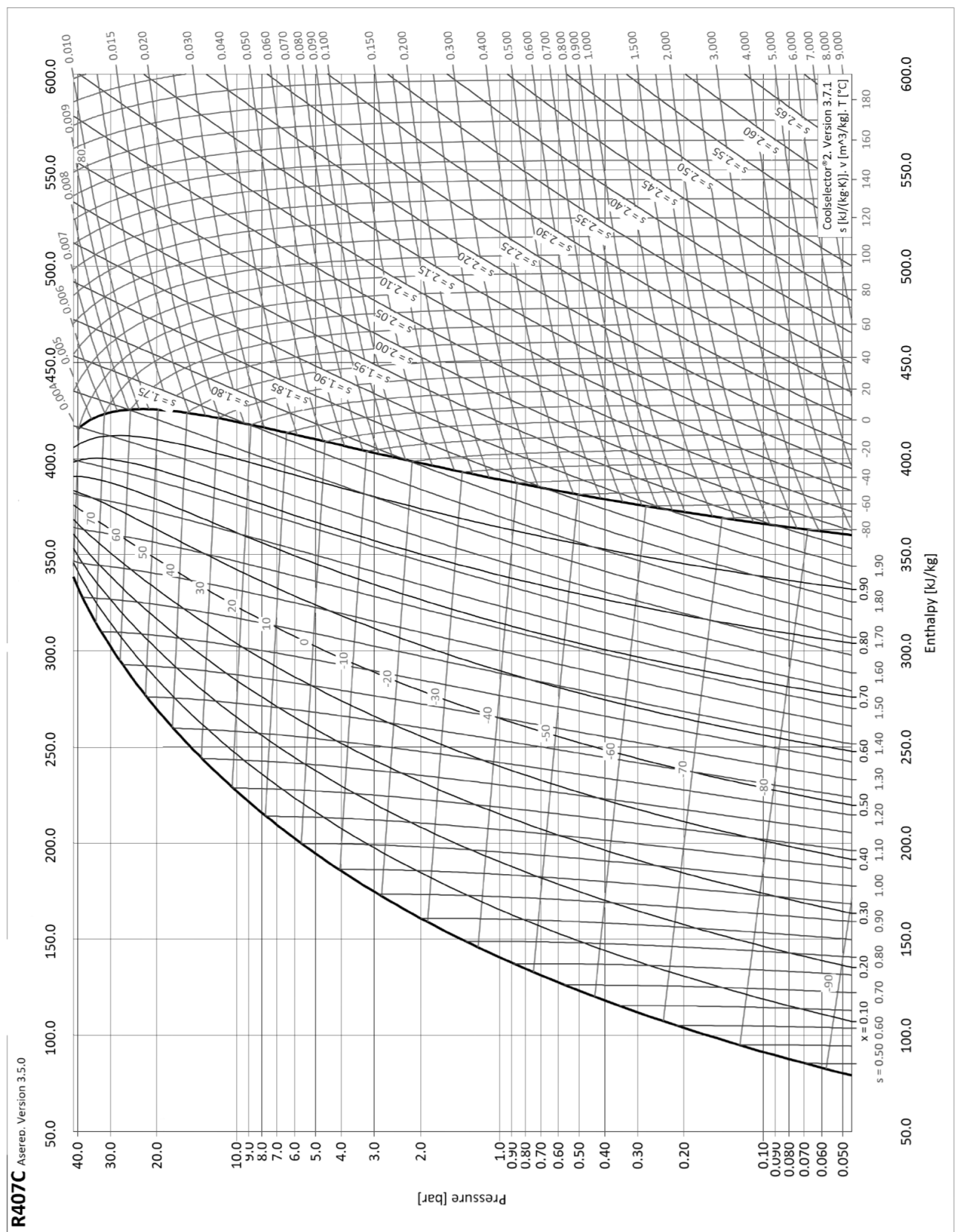


Figure C Diagramme enthalpique du fluide R407c

	Priorité COP	Priorité puissance
Température de l'eau : entrée 30 °C, sortie 35 °C (température extérieure +7 °C)		
Puissance nominale (kW)	45,00	63,40
Puissance absorbée nominale (kW)	10,90	17,70
COP à puissance nominale	4,13	3,58
Température de l'eau : entrée 40 °C, sortie 45 °C (température extérieure +7 °C)		
Puissance nominale (kW)	45,00	63,20
Puissance absorbée nominale (kW)	12,90	20,90
COP à puissance nominale	3,49	3,02
Température de l'eau : sortie 70 °C (température extérieure +7 °C)		
Puissance nominale (kW)	45,00	58,70
Puissance absorbée nominale (kW)	25,60	32,60
COP à puissance nominale	1,76	1,80
Température de l'eau : entrée 30 °C, sortie 35 °C (température extérieure +20 °C)		
Puissance nominale (kW)	45,00	73,90
Puissance absorbée nominale (kW)	7,40	15,30
COP à puissance nominale	6,08	4,83
Poids net à vide (kg)	526	526
Débit minimum / nominal (kg·h ⁻¹)	3950 / 7900	3950 / 7900
Diamètre entrée / sortie du circuit de chauffage (mm)	38,1 / 38,1	38,1 / 38,1
Plage de fonctionnement température extérieure garantie (°C)	-20 / +40	-20 / +40
Fluide / charge	R407C / 5,5 kg × 2	R407C / 5,5 kg × 2
PRG / équivalent CO ₂ (- / kg)	1774 / 19 514	1774 / 19 514
Alimentation électrique unité extérieure ~ 50 Hz	400 V – 3P + N + T	400 V – 3P + N + T

Figure D Caractéristiques de la pompe à chaleur