

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction**, la **clarté** et la **précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans l'**appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

L'usage de calculatrices est autorisé.

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 chef de salle, 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 : Rayonnement, réaction de rayonnement

Cet exercice est extrait d'un sujet de concours.

La numérotation et la rédaction des questions sont volontairement inchangées.

Des indications et des questions en italique ont été ajoutées/modifiées.

Des questions hors du programme de première année de classes préparatoires ont été supprimées.

L'atome d'hydrogène est un des systèmes physiques les mieux connus en tenant compte des corrections relativistes et des corrections liées à la théorie quantique des champs. Le décryptage des propriétés d'émission ou d'absorption de l'atome d'hydrogène a constitué un examen de passage pour la théorie quantique.

Le sujet s'intéresse au rayonnement d'un électron et à la force dite réaction de rayonnement qui traduit l'interaction de la particule avec l'onde électromagnétique qu'il crée.

Les deux parties sont indépendantes.

La **partie I** sur le rayonnement du dipôle oscillant fait essentiellement appel à l'électromagnétisme.

La **partie II** sur la résonance de la puissance rayonnée fait essentiellement appel à la mécanique.

Partie I - Rayonnement par un dipôle oscillant

On rappelle qu'un dipôle oscillant, constitué d'une charge fixe $+e$ au point O et d'un électron mobile au point P animé d'un mouvement forcé sur Oz , tel que $\overline{OP} = d \cos(\omega t) \overline{e}_z$, est caractérisé par son vecteur moment dipolaire $\overline{p}(t) = -e \overline{OP}(t)$.

Le champ électrique "lointain" créé par ce dipôle, en un point M "très éloigné" repéré en coordonnées sphériques ($r = OM, \theta, \phi$) (**figure 1**), est donné par :

$$\vec{E} = \frac{ed\omega^2}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{\sin(\theta)}{r} \cos\left(\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) \overline{e}_\theta. \quad (1)$$

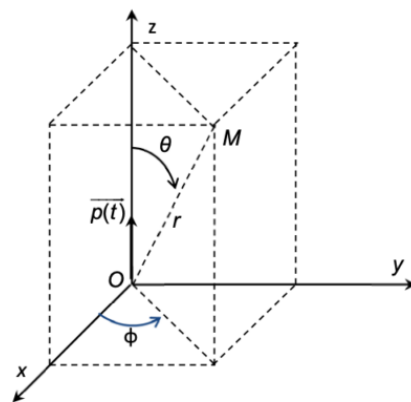


Figure 1 - Coordonnées sphériques d'un point M

- Q0.** Montrer que la valeur moyenne temporelle d'un cosinus carré sur sa période est $1/2$.
Rappeler le vecteur déplacement élémentaire $d\vec{\ell}$, le volume élémentaire d^3V (ou dV) et le vecteur surface élémentaire d^2S (ou $d\vec{S}$) porté par \vec{e}_r en coordonnées sphériques.

Q1. Préciser ce que signifie " très éloigné ".

Q2. Reproduire la figure 1 sur votre copie en ajoutant les vecteurs unitaires de la base sphérique.

Justifier par des considérations de symétrie la direction du champ magnétique .

Justifier par des considérations d'invariances les dépendances du champ magnétique.

Nommer le Principe appliqué.

Q3. On donne l'expression du champ magnétique $\vec{B} = \frac{\mu_0 e d \omega^2}{4\pi c} \frac{\sin(\theta)}{r} \cos\left(\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) \vec{e}_\phi$.

En vous appuyant sur un schéma, rappeler l'expression du champ magnétique créé par un solénoïde infini \vec{B}_∞ .

Vérifier alors l'homogénéité de \vec{B} de cet exercice.

Rappeler les deux unités usuelles d'un champ magnétique en précisant la conversion.

Le vecteur de Poynting est défini par : $\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$

Q4. Écrire le vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ associé à l'onde.

Dans la question suivante, on peut utiliser directement que $\int_0^\pi (\sin \theta)^3 d\theta = \frac{4}{3}$.

Q5. Montrer que le flux de celui-ci à travers une sphère de centre O et de rayon R est :

$$\psi = \frac{e^2 d^2 \omega^4}{6\pi \epsilon_0 c^3} \left(\cos\left(\omega\left(t - \frac{R}{c}\right)\right) \right)^2$$

La puissance moyenne temporelle rayonnée par l'électron est la moyenne temporelle du flux.

Q6. En déduire quelle est la puissance moyenne temporelle rayonnée par l'électron.

Q7. a) Déterminer l'expression de $\vec{\gamma}$ l'accélération de l'électron mobile au point P à partir de son vecteur position $\vec{OP} = d \cos(\omega t) \vec{e}_z$.

b) Montrer que la puissance moyenne, appelée puissance de Larmor P_L , rayonnée par cet électron oscillant, peut s'écrire $P_L = K_e \langle \vec{\gamma} \cdot \vec{\gamma} \rangle$.

c) Donner l'expression de la constante K_e en fonction de c, e et de ϵ_0 et indiquer sa dimension, puis son unité.

Partie II - Mise en évidence d'une résonance de puissance

L'interaction de l'électron, d'accélération $\vec{\gamma}$, avec le champ électromagnétique qu'il crée, peut être décrite par une force appliquée à la particule appelée réaction de rayonnement égale à $\vec{f}_{ray} = K_e \frac{d\vec{\gamma}}{dt}$.

Q8. a) Donner la définition de la puissance instantanée P_{ray} associée à cette force.

b) Calculer la valeur moyenne sur une période de cette puissance, pour le mouvement forcé d'un électron mobile placé au point P tel que $\vec{OP} = d \cos(\omega t) \vec{e}_z$.

Commenter son signe.

Dans un premier temps, on considère que l'électron de masse m_e est soumis à un ensemble de 2 forces : la force de réaction de rayonnement $\overrightarrow{f_{ray}} = K_e \frac{d\vec{\gamma}}{dt}$ et une force de rappel de type élastique $\overrightarrow{f_{rappel}} = -m_e \omega_0^2 \overrightarrow{OP}$. Le mouvement de l'électron se fait uniquement le long de Oz ($OP(t) = z(t)$).

Q9. Écrire l'équation différentielle du mouvement $z(t)$ de l'électron.

Quel est l'ordre de cette équation différentielle ? On ne cherchera pas à la résoudre.

Pour évaluer la " pulsation " ω_0 , on peut supposer que cette force " élastique " modélise l'interaction entre le proton et l'électron : on considère la charge du proton $+e$ uniformément répartie dans une boule sphérique de rayon égal au rayon de Bohr a_0 .

Q10. Sachant que le rayon de Bohr est la distance caractéristique séparant l'électron du proton dans l'atome d'hydrogène, donner un ordre de grandeur de a_0 dans deux unités usuelles.

Q11. À partir d'un schéma, rappeler la définition de l'interaction électrostatique, appelée aussi interaction coulombienne, $\overrightarrow{F_{e0}}$ entre un proton et un électron.

Q12. On admet que le champ électrostatique auquel est soumis l'électron en P (pour $OP < a_0$) est : $\overrightarrow{E} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overrightarrow{OP}}{a_0^3}$. Quelle est la force de Lorentz électrique à laquelle est soumis l'électron ? Commenter cette expression.

Q13. a) En déduire ce que vaut la pulsation ω_0 définie par $\overrightarrow{f_{rappel}} = -m_e \omega_0^2 \overrightarrow{OP}$. On l'exprimera en fonction de e, m_e et de a_0 .

b) Rappeler les valeurs de e et m_e ainsi que le lien entre ω_0 et la longueur d'onde associée λ .

c) On donne $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ SI. Donner l'unité de ϵ_0 .

d) Évaluer numériquement la longueur d'onde associée. Commenter.

Dans un second temps, on considère que l'électron de masse m_e est soumis à un ensemble de 3 forces : la force de réaction de rayonnement $\overrightarrow{f_{ray}} = K_e \frac{d\vec{\gamma}}{dt}$, la force de rappel de type élastique

$\overrightarrow{f_{rappel}} = -m_e \omega_0^2 \overrightarrow{OP}$ et une force électrostatique supplémentaire créée par un champ extérieur oscillant uniforme $\overrightarrow{E_{ext}} = E_0 \cos(\omega t) \overrightarrow{e_z}$.

Le mouvement de l'électron se fait toujours uniquement sur Oz ($OP = z(t)$).

Q14. Écrire l'équation du mouvement.

Q15. La puissance rayonnée par l'électron est $P(\omega) = \frac{\frac{\tau}{2m_e} (\omega^2 e E_0)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\tau \omega^3)^2}$ avec $\tau = \frac{K_e}{m_e}$.

Que vaut la puissance notée P_0 pour $\omega = \omega_0$? Comment s'exprime la puissance $P(\omega)$ pour $\omega \ll \omega_0$ et pour $\omega \gg \omega_0$? Que vaut-elle pour $\omega = 0$ et pour ω tendant vers l'infini ?

On observe donc un phénomène de résonance de la puissance P en fonction de la fréquence.

L'expression de la puissance P peut se mettre sous la forme $P \approx P_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\tau \omega^3} \right)^2}$ et $\omega_0 \tau \ll 1$.

Q16. a) En admettant que la largeur à mi-hauteur $\Delta\omega = \tau \omega_0^2$, en déduire la pulsation de résonance et le facteur de qualité Q .

b) L'application numérique de la formule obtenue en **Q7b** donne $K_e = 5,75 \cdot 10^{-54}$ (SI) : que valent la largeur de bande passante et le facteur de qualité dans le domaine optique ?

Exercice 2 : Réfrigérateur domestique

Cet exercice est extrait d'un sujet de concours.

La numérotation et la rédaction des questions sont volontairement inchangées.

Des indications et des questions en italique ont été ajoutées/modifiées.

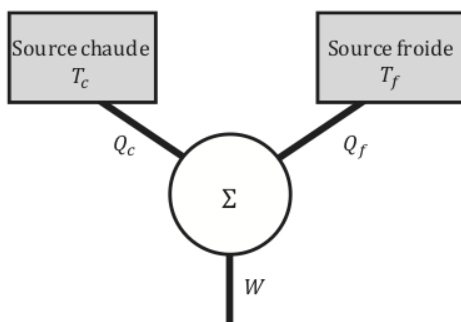
Des questions hors du programme de première année de classes préparatoires ont été supprimées.

Réfrigérateur domestique

Les applications numériques seront réalisées avec deux chiffres significatifs

A. Modélisation d'une machine réfrigérante ditherme

On représente schématiquement une machine ditherme comme ci-après.



On note :

Σ : le fluide thermodynamique « caloporteur » ou « frigorigène »

Q_c : le transfert thermique échangé par Σ avec la source chaude (température T_c) au cours d'un cycle

Q_f : le transfert thermique échangé par Σ avec la source froide (température T_f) au cours d'un cycle

W : le travail échangé par Σ avec l'extérieur au cours d'un cycle

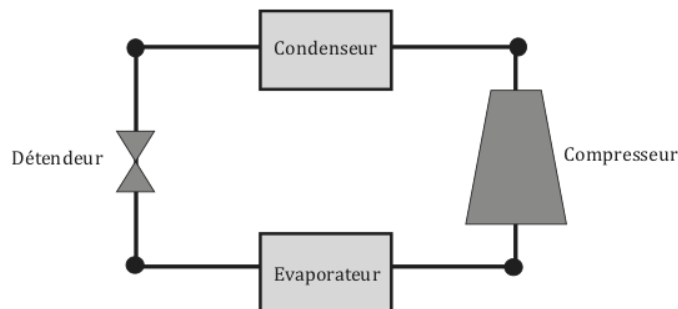
Ces grandeurs sont algébriques et leur signe est positif lorsque le système thermodynamique Σ les reçoit effectivement.

1. Indiquer le signe de Q_c , Q_f et W lorsque la machine fonctionne en réfrigérateur. Justifier.
2. Définir l'efficacité e_f (aussi appelé coefficient de performance) d'une telle machine et montrer qu'elle est majorée par une efficacité maximale e_f^{max} dont on établira l'expression en fonction de T_c et T_f .

B. Étude d'un cycle réfrigérant à compression de vapeur

Nous nous proposons d'étudier un cycle à compression de vapeur utilisé dans un réfrigérateur. La source chaude est la cuisine, de température T_c , la source froide est l'armoire du réfrigérateur et son contenu de température homogène T_f .

Un fluide frigorigène décrit le cycle schématisé ci-dessous.



Il y subit les transformations suivantes :

De l'état 4 à l'état 1 : évaporation à $T_{evap} = 0^\circ\text{C}$ puis surchauffe isobare jusqu'à 10°C .

De l'état 1 à l'état 2 : compression adiabatique dans le compresseur.

De l'état 2 à l'état 3 : refroidissement isobare, liquéfaction isobare à $T_{cond} = 40^\circ\text{C}$ puis sous-refroidissement du liquide jusqu'à 30°C

De l'état 3 à l'état 4 : détente isenthalpique du fluide.

On précise que le fluide est sous forme de vapeur sèche dans l'état 1 et de liquide saturant dans l'état 3.

On note h_i, s_i et v_i respectivement l'enthalpie, l'entropie et le volume massiques du fluide dans l'état i .

On note P_i et T_i respectivement la pression et la température du fluide dans l'état i .

Entre les états i et j , on note :

- $\Delta_{ij}h$ la variation d'enthalpie massique du fluide, (les notations utilisées pour d'autres variations de grandeurs d'état s'en déduisent)
- q_{ij} le transfert thermique massique reçu par le fluide
- w_{ij} le travail massique utile (ou indiqué) reçu par le fluide.

3. Annoter la **figure 1** du document annexe à rendre en plaçant les différents points correspondant aux états 1 à 4. Positionner la source chaude et la source froide. Indiquer par une flèche le sens du transfert thermique entre les sources et le fluide dans l'évaporateur et dans le condenseur *en justifiant physiquement*.

Cycle avec compression réversible

Dans un premier temps on suppose que la **compression est adiabatique et réversible**. Elle conduit alors le fluide de l'état 1 à un état noté 2s.

4. Tracer le cycle dans le diagramme $P(h)$ du fluide R134a en annexe (**figure 2a**) en utilisant un stylo de couleur. Ne pas se préoccuper du point 2' déjà placé sur le diagramme.
5. Remplir les colonnes représentant les états 1, 2s, 3 et 4 du tableau 3 du document annexe à rendre.
6. Placer les points correspondants aux états 1, 2s, 3 et 4, orienter le cycle et justifier les allures des transformations thermodynamiques dans le diagramme $T(s)$ du fluide R134a en annexe (**figure 2b**)
8. En analysant les abaques de la **figure 2a** ou de la **figure 2b**, indiquer si la vapeur sèche de R134a peut être assimilée à un gaz parfait entre les états 1 et 2s. Justifier.

Cycle avec compression non réversible

La compression n'est en réalité pas réversible. Le compresseur est caractérisé par son rendement isentropique défini par :

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Le rendement isentropique du compresseur est de 75%.

Le cycle étudié est désormais $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$

9. Déduire des valeurs de h_1 et h_{2s} , celle de $h_2 - h_1$ et placer le point correspondant à l'état 2 sur la **figure 2a** en utilisant un stylo de couleur.
10. Compléter la colonne 2 du tableau 3 du document annexe.
11. Placer le point correspondant à l'état 2 sur le diagramme $T(s)$ (**figure 2b**) en utilisant un stylo de couleur.
12. On observe graphiquement que $s_2 > s_{2s}$. Justifier physiquement.

Détermination de l'efficacité de la machine.

Premier principe industriel :

On rappelle que l'expression du premier principe pour un fluide en écoulement stationnaire à travers une machine thermique est :

$$\Delta(h + e_p + e_c) = q + w^*$$

avec :

- Δh , variation de l'enthalpie massique du fluide,
- Δe_p , variation de l'énergie potentielle massique du fluide,
- Δe_c , variation de l'énergie cinétique massique du fluide,
- q , transfert thermique massique reçu par le fluide,
- w^* , travail massique fourni par la machine au fluide dit travail massique utile reçu par le fluide.

14. Justifier que l'on puisse négliger les variations d'énergie potentielle de pesanteur devant les variations d'enthalpie dans un réfrigérateur domestique. (Un calcul d'ordre de grandeur est attendu).
15. Indiquer dans quel élément le fluide reçoit du travail.

On admet qu'on peut négliger les variations de l'énergie cinétique massique du fluide.

19. Montrer que l'on peut exprimer l'efficacité du réfrigérateur en fonction des enthalpies massiques de différents points du cycle $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$.
20. Déterminer, à l'aide de données évaluées sur le graphique, l'efficacité du cycle réfrigérateur décrit par le fluide. Commenter sa valeur. La comparer à celle d'un cycle de Carnot.

D. Utilisation d'un réfrigérateur

On s'intéresse dans cette partie à l'évolution de la température à l'intérieur d'un réfrigérateur. Cette température est supposée uniforme à l'intérieur du réfrigérateur. Elle est susceptible de varier dans le temps et sera notée T .

La source chaude est la cuisine dans laquelle est installé le réfrigérateur. Sa température T_c est constante.

La capacité thermique isobare de l'intérieur du réfrigérateur est $C = 3.10^5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Le rapport K entre l'efficacité réelle du réfrigérateur et son efficacité maximale sera supposé constant au cours du temps et pris égal à 0,25.

En revanche, l'efficacité maximale dépend du temps : son expression est celle obtenue à la question A.2 en remplaçant T_f par $T(t)$.

Évaluation des fuites thermiques

Pour évaluer les fuites thermiques du réfrigérateur, on le débranche à l'instant $t = 0$ alors que l'intérieur du réfrigérateur est à une température initiale T_f .

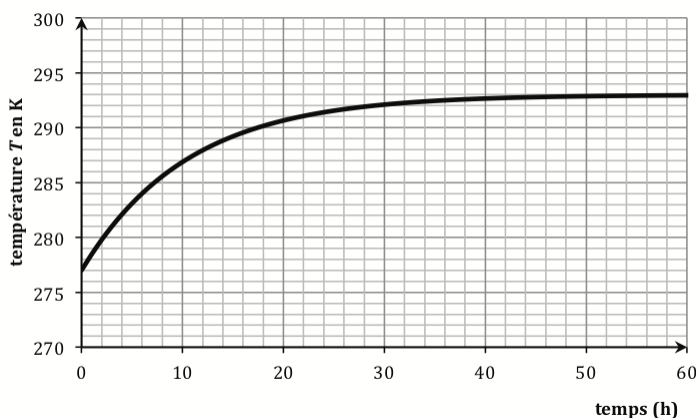
La puissance thermique reçue par l'intérieur du réfrigérateur à travers les parois du réfrigérateur est modélisée par : $P_{th} = \lambda \cdot (T_c - T)$ où λ est une constante.

28. Quelle est l'unité usuelle et l'unité SI de λ ?

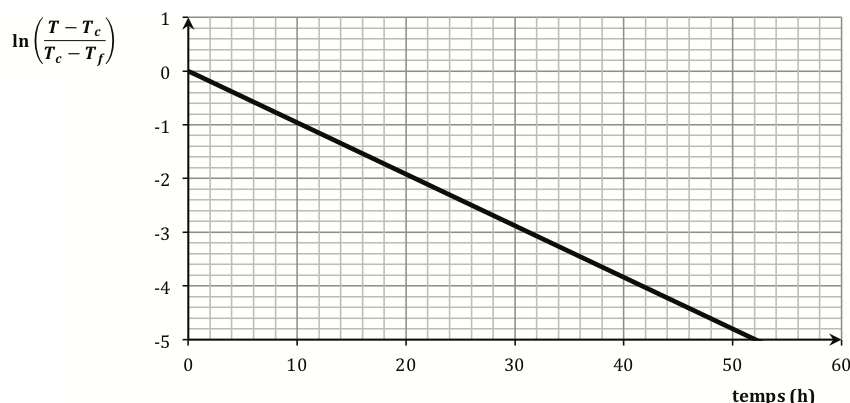
L'équation différentielle vérifiée par la température T est : $\frac{dT}{dt} + \frac{\lambda}{C}T = \frac{\lambda}{C}T_c$

30. En déduire l'expression de T en fonction du temps.

31. Ci-dessous figure le graphe représentatif de T en fonction du temps. En déduire la valeurs numériques de T_f et T_c en expliquant la démarche.



32. Ci-dessous figure le graphe représentatif de la grandeur $\ln\left(\frac{T-T_c}{T_f-T_c}\right)$ en fonction du temps t . Exploiter le graphique pour déterminer numériquement λ . Convertir sa valeur dans l'unité retenue à la question 28.



Fonctionnement en régime stationnaire

Lorsque le réfrigérateur est branché depuis longtemps, la température à l'intérieur du réfrigérateur est réglée à T_f .

33. Calculer l'efficacité du réfrigérateur.

Commenter.

34. Calculer la puissance P_{th} des fuites.
 35. Calculer la puissance P_c nécessaire du compresseur pour compenser les fuites.

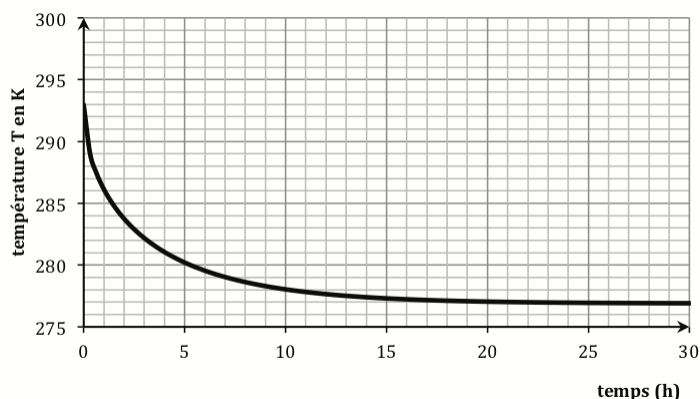
Mise en route du réfrigérateur

A $t = 0$, la température à l'intérieur du réfrigérateur est T_c . La puissance \mathcal{P}_c du compresseur est supposée constante.

La température T de l'intérieur du réfrigérateur vérifie l'équation différentielle :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{AT}{T_c - T} + B(T_c - T)$$

37. Résoudre littéralement l'équation dans le cas sans fuite $B = 0$ pour en déduire, en fonction de A , T_c et T_f , la durée nécessaire t_f pour que l'intérieur du réfrigérateur atteigne la température T_f .
 38. Avec la valeur de P_c calculée précédemment on trouve, en absence de fuite $t_f = 5h$.
 Le graphe ci-dessous donne l'évolution de la température en fonction du temps en tenant compte des fuites. Commenter.



E. Comparaison de fluides frigorigènes

Pour aborder cette partie il est nécessaire d'avoir pris connaissance des documents 1 et 2 en annexe.

On souhaite comparer 3 fluides frigorigènes : R717 (ammoniac), R134a (tétrafluoroéthane) et R600a (isobutane).

Pour ce faire on envisage de leur faire subir un cycle analogue à celui décrit par R134a dans la partie C que l'on simplifie avec un seul évaporateur à -20°C .

Les caractéristiques du cycle sont donc, pour les 3 fluides :

$T_{cond} = 40^\circ\text{C}$, $T_{evap} = -20^\circ\text{C}$, sous refroidissement de 10°C et surchauffe de 20°C , rendement isentropique du compresseur de 75%.

Le tableau ci-dessous rassemble plusieurs des données calculées pour chaque fluide au cours du cycle :

	R600a	R134a	R717 ammoniac
Efficacité (ou COP)	2,7	2,6	2,4
Température maximale au cours du cycle ($^\circ\text{C}$)	70	80	210
Volume massique à l'entrée du compresseur ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	0,52	0,16	0,68
Volume massique à la sortie du compresseur ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	0,083	0,025	0,148
Pression à l'entrée du compresseur (bar)	0,728	1,33	1,90
Pression en sortie du compresseur (bar)	5,36	10,2	15,5
Taux de compression	7,3	7,6	8,2
Production frigorifique volumique ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	557	$1,0 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$

Les fluides frigorigènes les plus répandus dans les réfrigérateurs domestiques sont le R600a et le R134a.

41. Pourquoi les préfère-t-on à l'ammoniac R717 ? (Donner 3 arguments).
 42. En Europe le R600a est très majoritairement utilisé alors qu'aux États-Unis le R134a est préféré. Proposer une explication à cette différence.

Résolution de problèmes : On dirait le Sud

Ancien programme de Physique PCSI :

"Dans l'acquisition de l'autonomie, la résolution de problèmes est une activité intermédiaire entre l'exercice cadré qui permet de s'exercer à de nouvelles méthodes, et la démarche par projet, pour laquelle le but à atteindre n'est pas explicite. Il s'agit pour l'étudiant de mobiliser ses connaissances, capacités et compétences afin d'aborder une situation dans laquelle il doit atteindre un but bien précis, mais pour laquelle le chemin à suivre n'est pas indiqué. [...]"

La résolution de problèmes mobilise les compétences qui figurent dans le tableau ci-dessous."

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier le problème.	Faire un schéma modèle. Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole. Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. Relier le problème à une situation modèle connue.
Établir une stratégie de résolution (analyser).	Décomposer le problème en des problèmes plus simples. Commencer par une version simplifiée. Expliciter la modélisation choisie (définition du système, ...). Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.
Mettre en œuvre la stratégie (réaliser).	Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique. Utiliser l'analyse dimensionnelle ...
Avoir un regard critique sur les résultats obtenus (valider).	S'assurer que l'on a répondu à la question posée. Vérifier la pertinence du résultat trouvé, notamment en comparant avec des estimations ou ordres de grandeurs connus. Comparer le résultat obtenu avec le résultat d'une autre approche (mesure expérimentale donnée ou déduite d'un document joint, simulation numérique, ...). Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue.
Communiquer.	Présenter la solution, ou la rédiger, en expliquant le raisonnement et les résultats.

Une boussole est une aiguille aimantée en mouvement libre autour d'un axe de rotation et qui s'oriente pour indiquer le Nord magnétique.

On place d'abord l'axe de rotation de la boussole vertical pour que l'aiguille puisse tourner dans le plan horizontal. À partir de sa position d'équilibre stable, on incline alors l'axe de rotation de la boussole pour que l'aiguille puisse tourner verticalement autour d'un axe horizontal orienté Est-Ouest : on observe que l'aiguille s'incline d'un angle $\alpha = 64^\circ$ tel que le pôle Nord de l'aiguille pointe vers le bas.

On replace ensuite l'axe de rotation de la boussole vertical pour que l'aiguille puisse tourner dans le plan horizontal et on introduit la boussole dans le volume intérieur d'un solénoïde de longueur $L = 20$ cm comportant un nombre total de spires $N = 80$ dont on oriente l'axe de révolution dans la direction horizontale Est-Ouest : on observe alors que l'aiguille tourne d'un angle $\beta = 58^\circ$ par rapport au Nord magnétique lorsque l'intensité du courant dans le solénoïde présente une intensité $I = 25$ mA.

Quelle est l'intensité B_T du champ magnétique terrestre local ?

Donnée : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H.m⁻¹ Perméabilité magnétique du vide

DANS CE CADRE	Académie :	Session :	Modèle EN.	
	Examen ou Concours :	Série* :		
	Spécialité/option :	Repère de l'épreuve :		
	Épreuve/sous-épreuve :			
	NOM : <small>(en majuscules, suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)</small>			
	Prénoms :		N° du candidat	
Né(e) le				
NE RIEN ÉCRIRE	101			

ANNEXES à RENDRE avec la COPIE

Figure 1

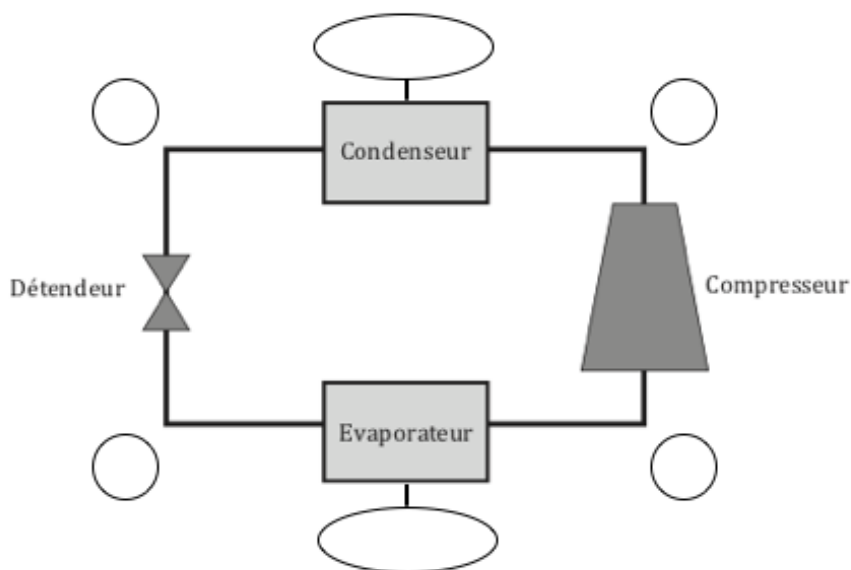


Tableau 3

point	1	2s	2	3	4
$P(\text{bar})$					
$T(^{\circ}\text{C})$					
État du fluide					
$h(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$					

Figure 2a :

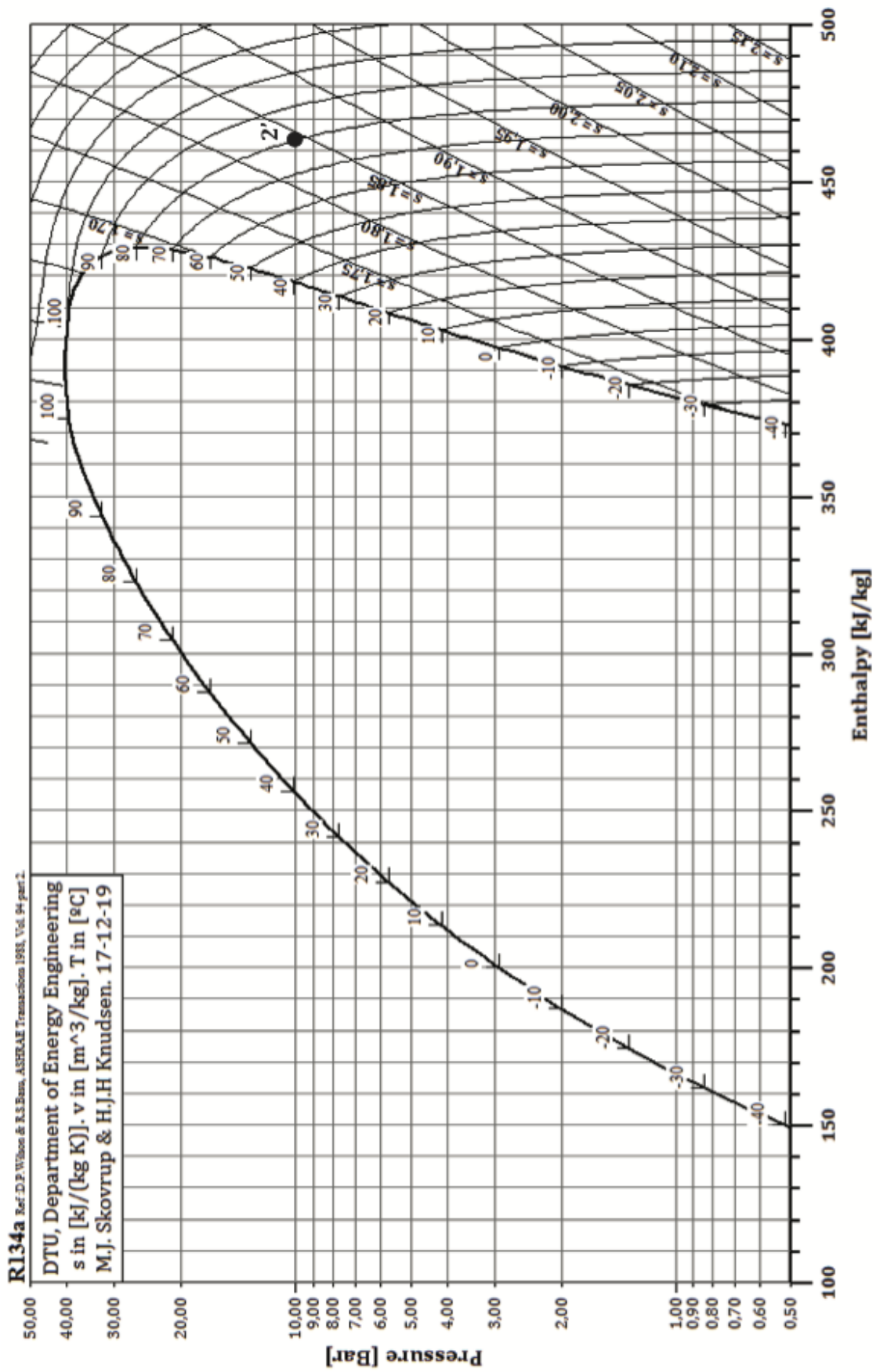
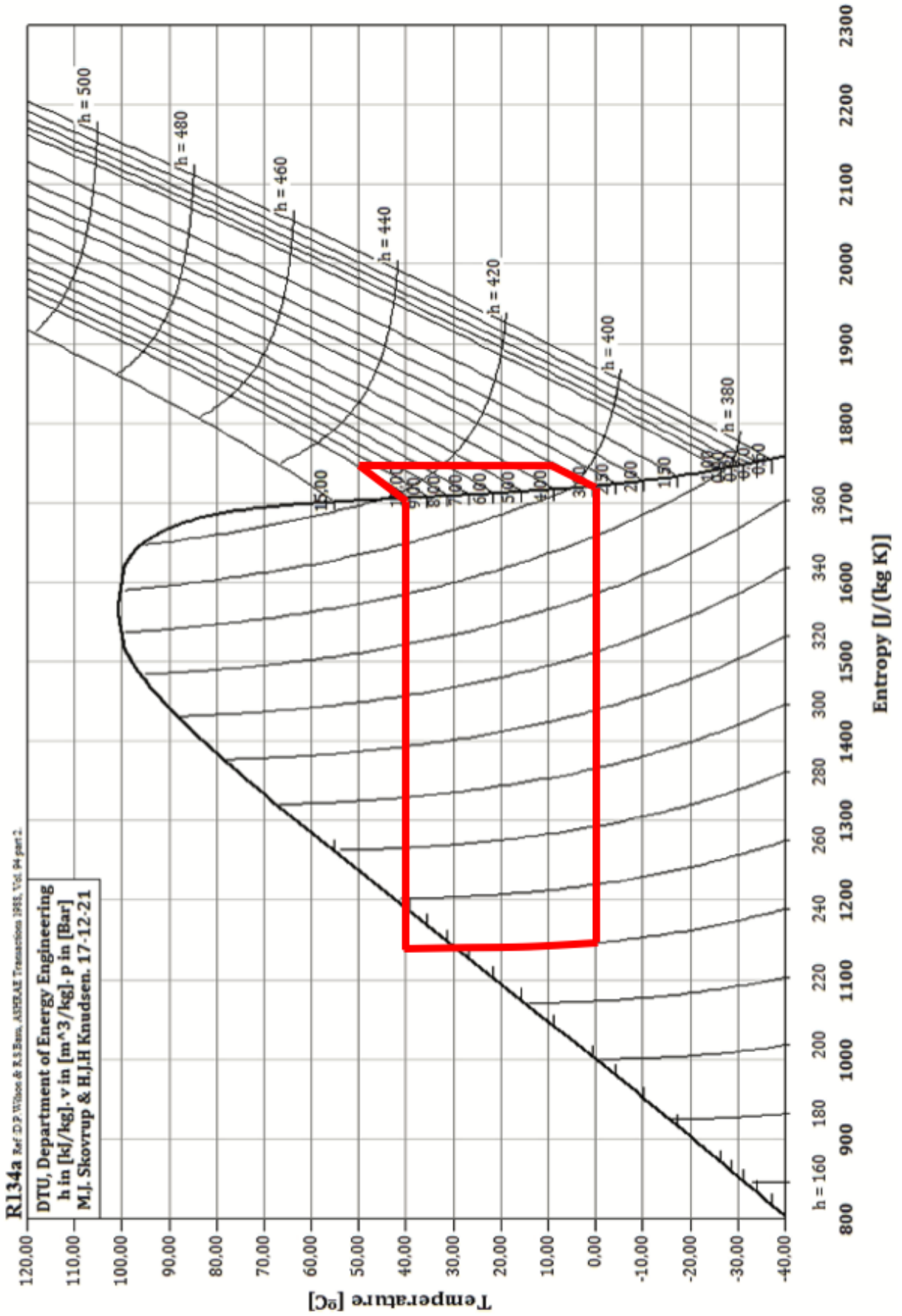


Figure 2b



DOCUMENTS ANNEXES

Document 1 : Les qualités d'un fluide frigorigène

D'après *Techniques de l'Ingénieur* TI-b9730

Théorie des machines frigorifiques, machine à compression mécanique

Maxime Duminil

Pour bien choisir un frigorigène en vue d'une application déterminée, on doit considérer :

- Ses **critères thermodynamiques**: puisque les systèmes frigorifiques relèvent précisément des lois de la thermodynamique ;
- Ses **critères de sécurité**: sécurité des personnes et des biens en cas de dégagement intempestif du frigorigène dans l'atmosphère;
- Ses **critères d'action sur l'environnement**: actuellement très importants puisqu'ils ont imposé l'abandon de certains frigorigènes ;
- Ses **critères techniques**: ils influent sur la faisabilité et la fiabilité du système frigorifique et sur les interactions entre le frigorigène et les composants de ce système ;
- Ses **critères économiques**: toujours présents au cœur des problèmes techniques.

(Ne sont conservés ci-après que quelques-uns des critères décrits dans l'article)

➤ Critères thermodynamiques

- 1) On s'arrangera pour que, dans la mesure du possible, la **température d'évaporation T_{evap} soit supérieure à la température d'ébullition du fluide à la pression atmosphérique T_{eb}** . De cette façon, la totalité des circuits de la machine est en surpression vis-à-vis de l'extérieur et l'on ne risque pas l'introduction d'air atmosphérique et d'eau.
- 2) Dans l'état actuel de la technique des composants du système, la pression de condensation P_{cond} ne doit pas dépasser 20 à 25 bar. Inversement, la pression d'évaporation P_{evap} ne doit pas être trop basse. Le domaine d'emploi du compresseur frigorifique est ainsi bien défini par le constructeur et on **doit impérativement rester dans ces limites**. Pour garder une bonne efficacité au compresseur, le taux de compression $\tau = \frac{P_{cond}}{P_{evap}}$ doit aussi rester limité. Les taux de compression importants, outre qu'ils sont généralement la cause d'échauffements excessifs du fluide, entraînent la diminution des rendements volumétriques et une augmentation de la consommation énergétique du compresseur.
- 3) **La production frigorifique volumique est une** grandeur importante définie par la **quantité de froid produite par unité de volume de fluide aspiré par le compresseur**. Plus cette quantité est élevée, plus petit est le débit-volume aspiré par le compresseur pour produire une puissance frigorifique donnée. Plus réduite, et moins chère, est alors la machine de compression.

➤ Sécurité

L'inflammabilité est évidemment un point d'une extrême importance. Des substances susceptibles de faire d'excellents frigorigènes, comme certains hydrocarbures, ont été rejetés en raison de leur caractère combustible.

➤ Action sur l'environnement

- 1) Ozone stratosphérique




On sait que l'ozone stratosphérique est détruit par le **chlore** transporté à ces altitudes par les composés halogénés des hydrocarbures qui ont une **longue durée de vie dans l'atmosphère**, essentiellement par les CFC mais aussi, dans une bien moindre mesure, par les HCFC. On sait aussi que c'est ce critère qui a décidé la communauté internationale à bannir ces composés chlorés. L'action de chaque composé sur l'ozone stratosphérique est caractérisée par ce que les Anglo-saxons dénomment l'**ODP (ozone depletion potential)**, **seuls les frigorigènes ayant un ODP nul devraient perdurer**.

- 2) Effet de serre

Les gaz à effet de serre sont indispensables à notre planète qui, en leur absence, aurait une température beaucoup trop basse pour être habitable (-18°C). Cependant, l'excès de ces gaz, en gênant la sortie (vers le cosmos) du rayonnement terrestre de grande longueur d'onde, peut, à la longue, provoquer un lent réchauffement de notre monde. À côté des gaz à effet de serre bien connus (vapeur d'eau, CO_2 , méthane, oxydes d'azote, etc.), les frigorigènes halocarbonés ont une action non négligeable. Bien qu'encore peu répandus dans l'atmosphère, leur influence est beaucoup plus grande que, par exemple, celle du CO_2 dont l'effet de serre est le plus connu.

On caractérise l'action d'effet de serre d'un composé par le terme anglais **GWP (global warming potential)**, les valeurs sont rapportées au CO_2 ; dont le GWP est égal à 1.

Document 2 : Quelques données relatives à 3 réfrigérants usuels

	R600a	R134a	R717
Pression de vapeur saturante à -20°C (bar)	0,728	1,33	1,90
Température d'ébullition sous 1 bar (en $^{\circ}\text{C}$)	-11,7	-26,1	-33,4
Température d'auto-inflammation (en $^{\circ}\text{C}$)	460	Non combustible	630
Pictogrammes de sécurité			
ODP	0	0	0
GWP	3	1300	0