Banque PT, France

# Session 2019, filière PT

## Physique B, thermodynamique

Durée : 2 heures

### Ce que traite le sujet

- A. Modélisation d'une machine réfrigérante ditherme
- B. Étude d'un cycle réfrigérant à compression de vapeur
- C. Association réfrigérateur-congélateur
- D. Utilisation d'un réfrigérateur
- E. Comparaison de fluides frigorigènes

**Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.**

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/banque-pt/pt/2019/physique-b-thermo

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

# Epreuve de Physique B - Thermodynamique

Durée 2 h

**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.**

---

## L'usage de calculatrices est interdit.

## AVERTISSEMENT

**À rendre en fin d'épreuve avec la copie 3 annexes impression recto/verso.**

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.

**Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance.**

**Tournez la page S.V.P.**

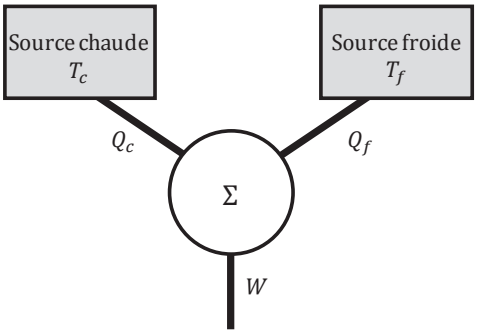
# Réfrigérateur domestique

**Les applications numériques seront réalisées avec deux chiffres significatifs**

## A. Modélisation d'une machine réfrigérante ditherme

**Poids approximatif dans le barème 8%**

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.

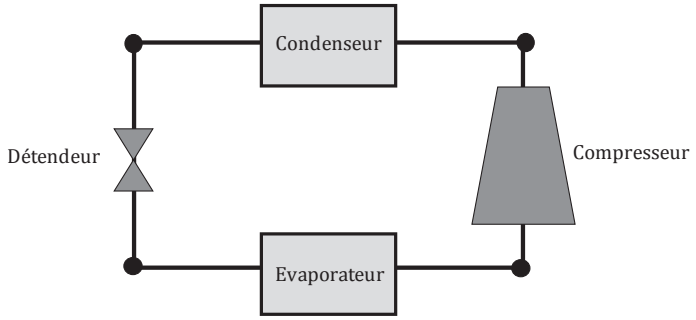
1. Indiquer le signe de $Q_c$, $Q_f$ et $W$ lorsque la machine fonctionne en réfrigérateur. Justifier.
2. Définir l'efficacité $e_f$(aussi appelé coefficient de performance) d'une telle machine et montrer qu'elle est majorée par une efficacité maximale $e_f^{max}$ dont on établira l'expression en fonction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

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

**Poids approximatif dans le barème 40%**

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 $T_{evap} = 0°C$ 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 $T_{cond} = 40°C$<br>puis sous-refroidissement du liquide jusqu'à 30°C |
| De l'état 3 à l'état 4 : | détente isenthalpique du fluide. |

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.

**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. Placer les points correspondant aux états 1, 2s, 3 et 4 dans les diagrammes $P(h)$ et $T(s)$ du fluide R134a en annexe (***figures 2a et 2b***).
   *(Remarque : le point 2' déjà placé sur le diagramme sert à la partie **C**, ne pas s'en préoccuper ici)*
5. Remplir les colonnes représentant les états 1, 2s, 3 et 4 du tableau 3 du document annexe à rendre.
6. Justifier que l'on ait choisi $T_{evap} \leq T_f$ et $T_{cond} \geq T_c$.
7. Quelle hypothèse concernant le fluide sous-tend la modélisation des transformations 4 →1 et 2s → 3 comme des isobares ?
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→2→3→4→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***. Tracer le cycle 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***). Tracer le cycle sur la ***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.**

13. Rappeler l'expression du premier principe de la thermodynamique lorsqu'il est appliqué à un système ouvert en régime stationnaire.
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).

On cherche à évaluer l'ordre de grandeur de l'énergie cinétique massique maximale au cours du cycle

15. En supposant que le champ de vitesse est uniforme sur une section droite $\mathcal{S}$ d'une canalisation dans laquelle le fluide circule, exprimer le débit massique du fluide $D$ en fonction de $\mathcal{S}$, de la vitesse $V$ et du volume massique $v$ du fluide.
16. En quel point du cycle le volume massique est-il maximal ? Justifier. On notera $v^{max}$ sa valeur et on prendra $v^{max} \approx 7.10^{-2} m^3.kg^{-1}$.
17. En supposant que $\mathcal{S}$ garde la même valeur approximativement égale à $1cm^2$ sur toute l'installation, déterminer la vitesse maximale du fluide au cours de l'écoulement. On prendra $D = 1.10^{-2} kg.s^{-1}$.
18. Justifier alors qu'on puisse négliger les variations d'énergie cinétique massique du fluide au cours du cycle devant ses variations d'enthalpie massique.

19. Montrer que l'on peut exprimer l'efficacité du réfrigérateur en fonction des enthalpies massiques de différents points du cycle 1→2→3→4→1.
20. Déterminer, à l'aide de données évaluées sur le graphique, l'efficacité du cycle réfrigérateur décrit par le fluide.
21. Déterminer la puissance thermique $\mathcal{P}_{th}^{f}$ extraite de la source froide et la puissance $\mathcal{P}$ du compresseur.
22. Pour quelle raison la vapeur est-elle surchauffée après son évaporation ?
23. Quel est l'intérêt de sous refroidir le liquide après la liquéfaction ? Pourquoi ce sous-refroidissement n'est-il pas réalisé jusqu'à une température plus basse (20°C par exemple ?).



**Tournez la page S.V.P.**

## C. Association réfrigérateur–congélateur.

**Poids approximatif dans le barème 10%**

La plupart des réfrigérateurs domestiques sont associés à un congélateur. Pour réaliser ce dispositif on peut modifier le cycle à compression précédent (décrit dans la partie **B**) en faisant passer le fluide dans deux évaporateurs successifs.

Le cycle modifié est décrit ci-dessous. L'état 4 est celui décrit dans la partie **B.**

| | |
|---|---|
| De l'état 4 à l'état 4' : | vaporisation isobare partielle dans le premier évaporateur (étape 4→4') au contact de l'intérieur du réfrigérateur |
| De l'état 4' à l'état 4'' : | détente isenthalpique jusqu'à –20°C |
| De l'état 4'' à l'état 1' : | évaporation à –20°C dans le second évaporateur puis surchauffe isobare jusqu'à 0°C. Ces étapes se font au contact de l'intérieur du congélateur. |
| De l'état 1' à l'état 2' : | compression |
| De l'état 2' à l'état 3 : | refroidissement, liquéfaction et sous-refroidissement isobares. |
| De l'état 3 à l'état 4 : | détente isenthalpique |

On souhaite que la puissance thermique extraite au cours de l'étape 4→4' soit la même que celle extraite au cours de l'étape 4''→1'.

24. Sur le diagramme $P(h)$ du fluide R134a (***figure 2a***), placer le point correspondant à l'état 1' puis les points correspondant aux états 4' et 4'' en justifiant le positionnement de ces deux derniers.
25. Le point caractéristique de l'état 2' est déjà placé sur le diagramme. Représenter le cycle 3→4→4'→4''→1'→2'→3) avec une couleur différente de celles utilisées pour les cycles précédemment tracés).

26. Comment évolue la proportion de vapeur dans le fluide au cours de l'étape 4'→4'' ? Préciser en justifiant. Le calcul des proportions de vapeur n'est pas demandé, seule l'évolution doit être justifiée.
27. Que vaut l'efficacité globale de l'ensemble réfrigérateur-congélateur ?

## D. Utilisation d'un réfrigérateur

**Poids approximatif dans le barème 26%**

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 $C = 3.10^5\ J.K^{-1}$.

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.

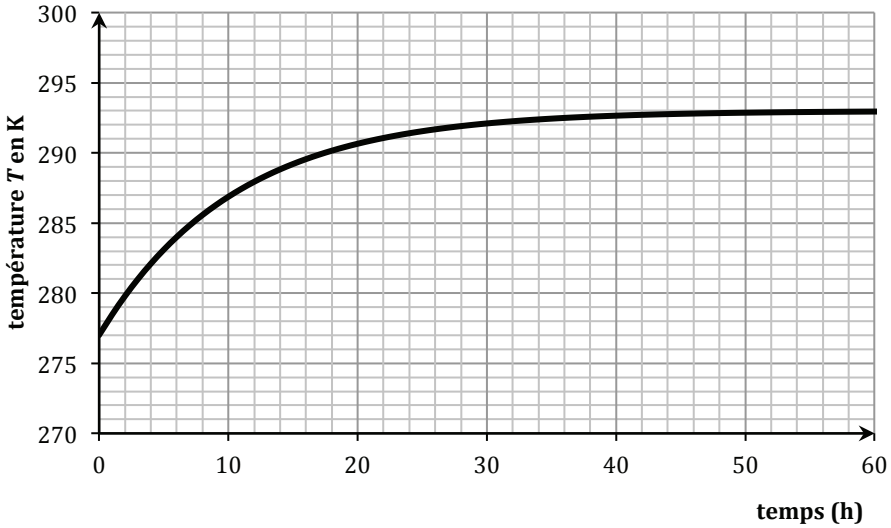
En revanche, l'efficacité maximale dépend du temps : son expression est celle obtenue à la question A.2 en remplaçant $T_f$ par $T(t)$.

**Évaluation des fuites thermiques**

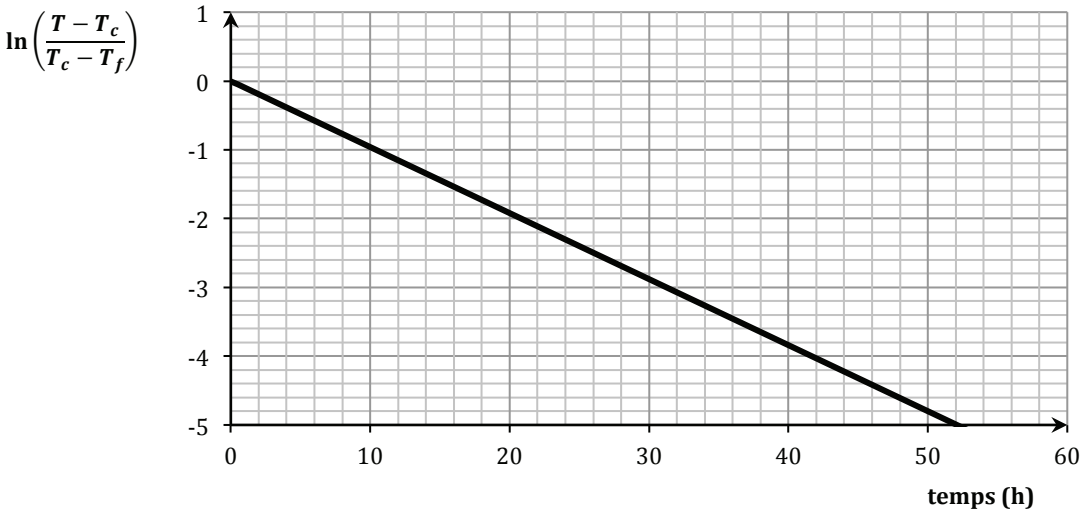
Pour évaluer les fuites thermiques du réfrigérateur, on le débranche à l'instant $t = 0$ alors que l'intérieur du réfrigérateur est à une température initiale $T_f$.

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 $\lambda$ est une constante.

28. Quel est le signe de $\lambda$ ? Justifier.
29. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température $T$.
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 $\lambda$. Préciser l'unité retenue pour $\lambda$.




**Fonctionnement en régime stationnaire**

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

33. Calculer l'efficacité du réfrigérateur.
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.

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

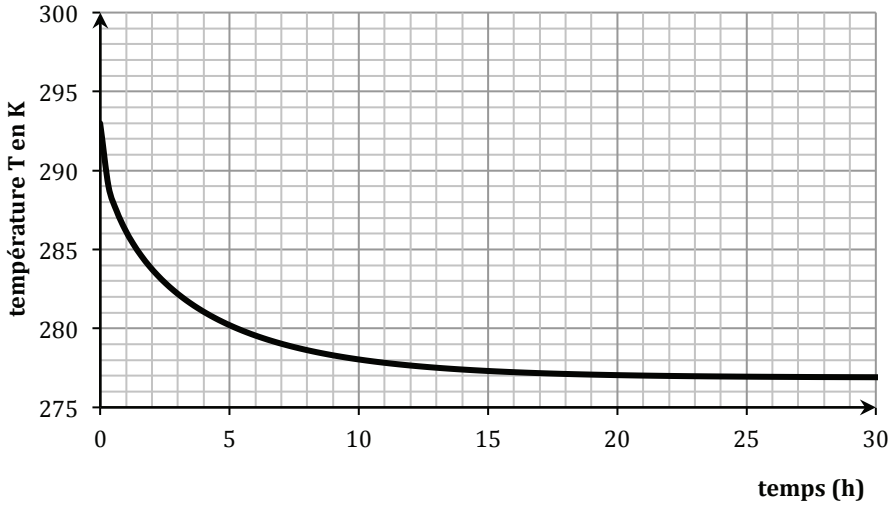
$$\frac{dT}{dt} = -\frac{AT}{T_c - T} + B\,(T_c - T)$$

Déterminer littéralement l'expression des constantes $A$ et $B$.

37. Résoudre **littéralement** l'équation **en absence de fuites** pour en déduire, en fonction de $A$, $B$, $T_c$ 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.

**Tournez la page S.V.P.**




## E. Comparaison de fluides frigorigènes

**Poids approximatif dans le barème 16%**

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 (tétrafluoroétane) 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 :

$T_{cond} = 40°C$, $T_{evap} = -20°C$, 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 ($°C$) | 70 | 80 | 210 |
| Volume massique à l'entrée du compresseur ($m^3.kg^{-1}$) | 0,52 | 0,16 | 0,68 |
| Volume massique à la sortie du compresseur ($m^3.kg^{-1}$) | 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 ($kJ.m^{-3}$) | 557 | $1,0.10^3$ | $1,7.10^3$ |

39. Expliquer pourquoi choisir $T_{evap} > T_{eb}$ garantit une surpression du fluide dans la machine par rapport à l'air extérieur.
40. Exprimer littéralement la relation entre la production frigorifique volumique, l'enthalpie massique de certains points du cycle et une donnée figurant dans le tableau.

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.

# Fin de l'énoncé.

# 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 biendéfini 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 parle 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

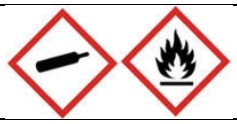
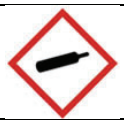
   Les gaz à effet de serre sont indispensables à notre planète qui, en leur absence, aurait une température beaucoup trop basse pour être habitable (– 18°C). Cependant, l'excès de ces gaz, en gênant la sortie (vers le cosmos) du rayonnement terrestre de grande longueur d'onde, peut, à la longue, provoquer 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.



**Tournez la page S.V.P.**

**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 °C) | –11,7 | –26,1 | –33,4 |
| Température d'auto-inflammation (en °C) | 460 | Non combustible | 630 |
| Pictogrammes de sécurité |  |  |  |
| ODP | 0 | 0 | 0 |
| GWP | 3 | 1300 | 0 |

DANS CE CADRE

Académie : Session : Modèle EN.

Examen ou Concours : Série* :

Spécialité/option : Repère de l'épreuve :

Épreuve/sous-épreuve :

NOM :

*(en majuscules, suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)*

Prénoms :

Né(e) le

N° du candidat

*(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)*

NE RIEN ÉCRIRE

101

# ANNEXES à RENDRE avec la COPIE

**Figure 1**

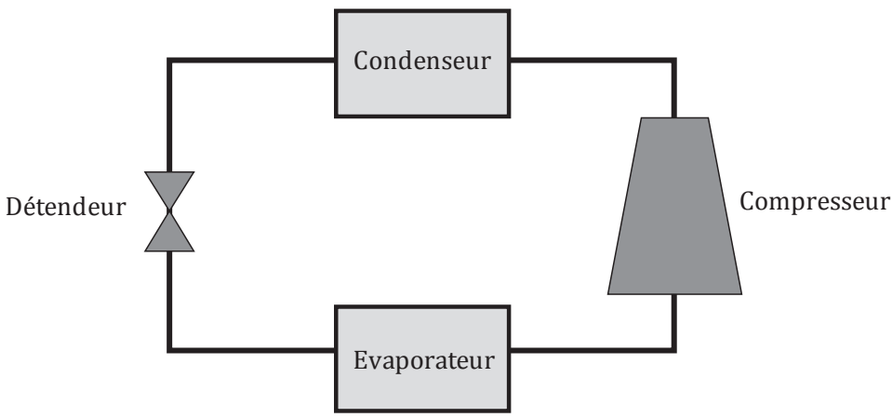



**Tableau 3**

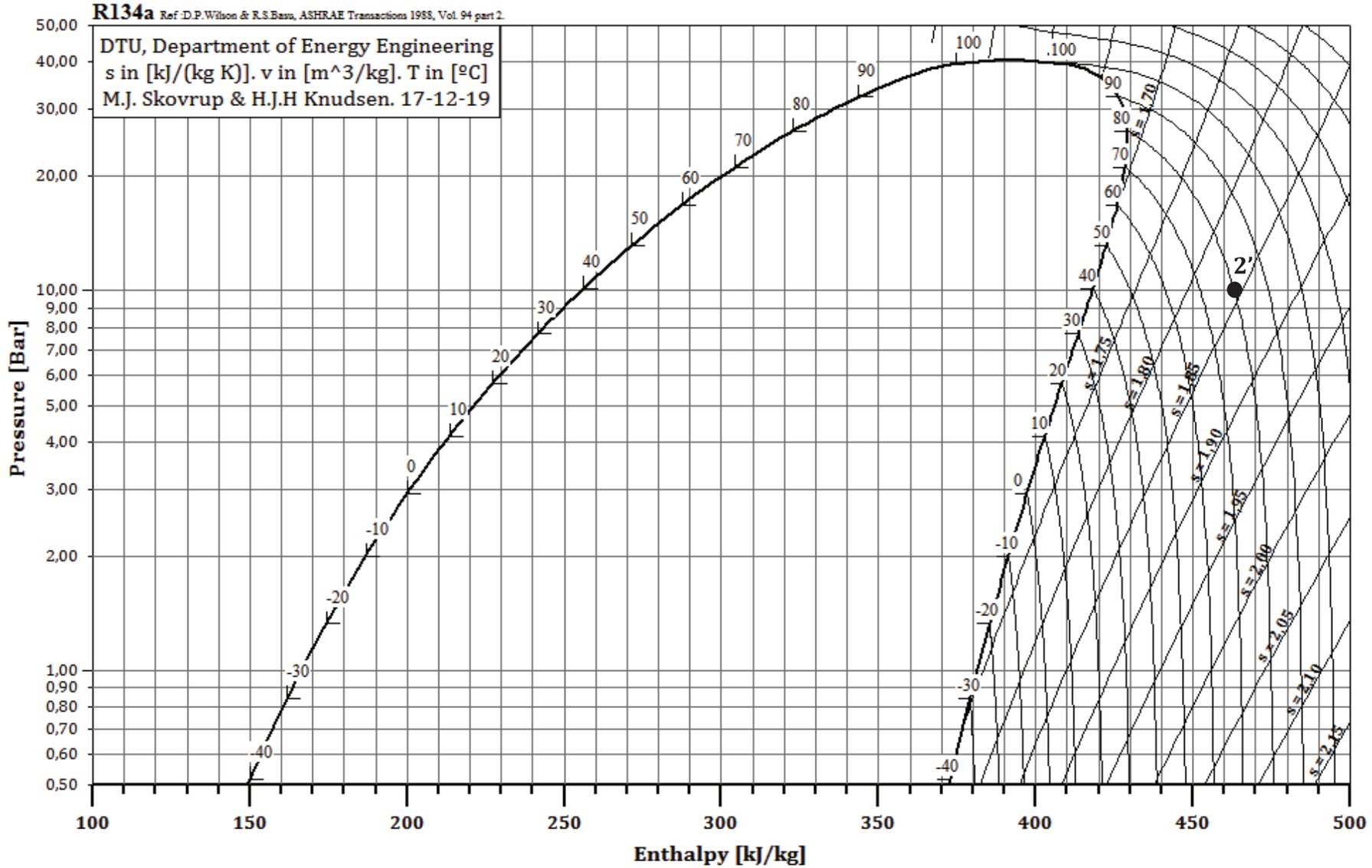
| point | 1 | 2s | 2 | 3 | 4 | 1' | 2' |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P(bar)$ | | | | | | | 10 |
| $T(°C)$ | | | | | | | 80 |
| État du fluide | | | | | | | Vapeur sèche |
| $h(kJ.kg^{-1})$ | | | | | | | 465 |



Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance.

**Figure 2a :**

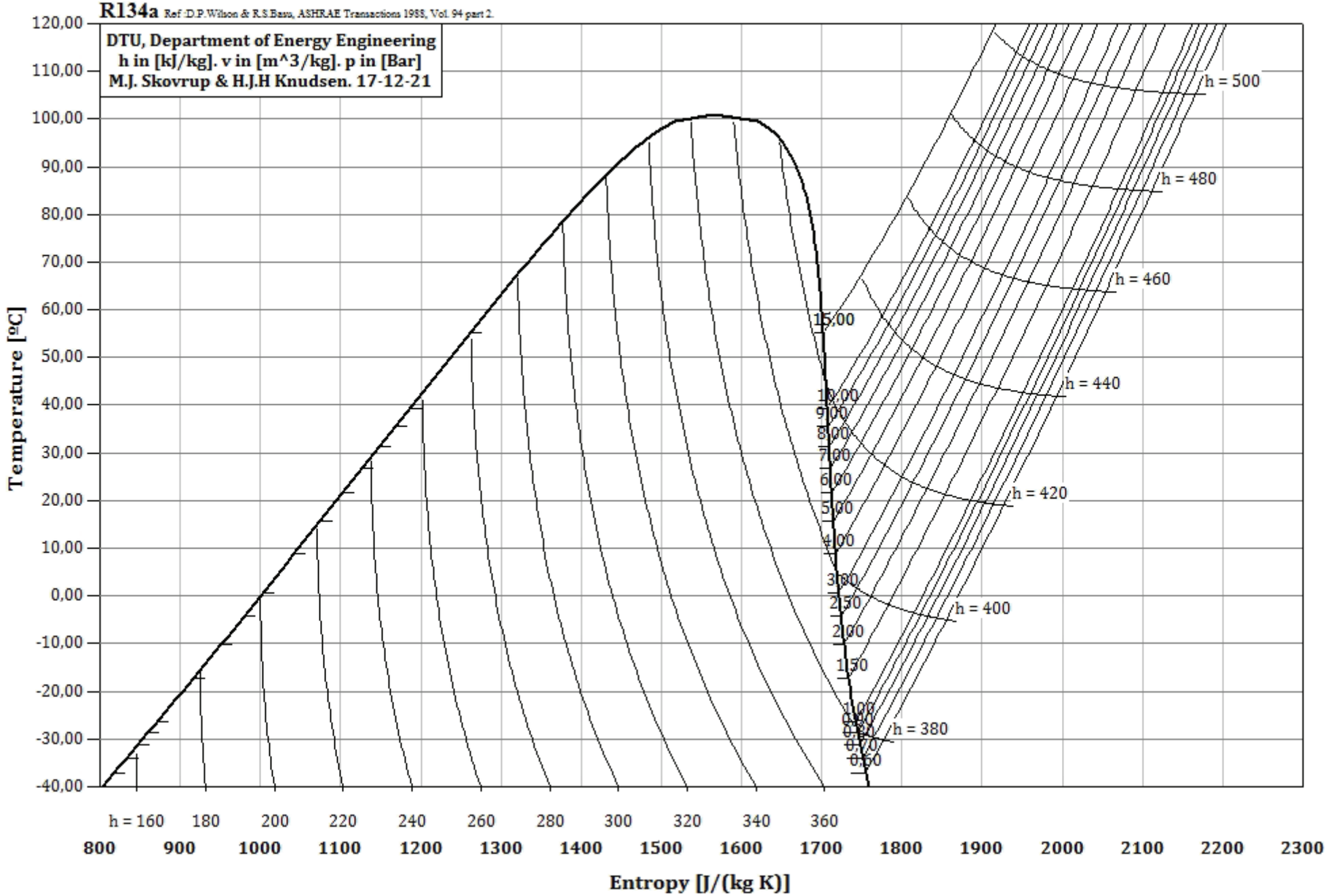
**La figure complète doit montrer 3 couleurs : une pour le cycle 1, 2s, 3, 4 ; une pour la portion 1, 2 ; une pour le cycle 3, 4, 4', 4'', 1', 2'**






NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

**Figure 2b**






NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

# Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PT chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

## Chapitres liés à ce sujet

- Bilans macroscopiques et relation de Bernoulli
- Grandeurs, unités, analyse dimensionnelle et ordres de grandeur
- Équations différentielles linéaires du premier ordre

## Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

**prepahelp.com/#essai**

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/banque-pt/pt