

DEVOIR SURVEILLE n° 1 DE PHYSIQUE

- Monsieur GIGON -  
(avec documents)

Il sera tenu compte de la présentation, de l'expression et des fautes d'orthographe. Détailler le raisonnement des calculs : bien mettre en évidence les applications numériques de manière à comprendre d'où viennent les bons résultats ou les erreurs. Encadrer uniquement les résultats demandés, sans oublier les unités. Tout résultat non encadré ne sera pas pris en compte. Ne pas oublier d'inscrire votre nom sur l'annexe 1, les caractéristiques des pompes et de la rendre avec la copie d'examen.

**EXERCICE : circulation de la sève (4-5 points)**

La croissance des arbres exige un transport rapide de l'eau, des sels minéraux et des composés organiques entre les diverses régions de l'arbre. Le but de cet exercice est d'étudier la circulation de la sève dans les arbres et de comparer cette circulation à partir de mesures faites pour deux types d'arbres : les arbres à zones poreuses (Chêne) et les arbres à pores diffus (Erable).

Tableau I. — Comparaison des caractères des éléments conducteurs dans les principaux groupes de végétaux vasculaires. D'après Esau, 1969 ; Zimmermann et Brown, 1971 ; Kramer et Koslowski, 1979 ; Walsh et Melaragno, 1981 ; Zimmermann, 1983 ; Evert, 1984 ; Liberman-Maxé, 1984. Dans certains cas exceptionnels, on peut obtenir des valeurs supérieures ou inférieures à celles indiquées sur ce tableau.

		(1)		Dicotylédones arborescentes bois à zones poreuses	Gymnospermes bois à pores diffus	Ptérédophytes
XYLEME	diamètre des éléments conducteurs ( $\mu\text{m}$ )	60	800	16 - 160	55	6 - 20
	longueur de libre parcours maximale ( $\mu\text{m}$ )	$10^5$	$10^7$	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^4$	—
	vitesse de circulation m.h <sup>-1</sup>	5	60	1,5 - 15	0,1 - 1,2	—
PHLOEME	diamètre des éléments criblés ( $\mu\text{m}$ )	50		20 - 60	15 - 50	2 - 20
	diamètre des pores ( $\mu\text{m}$ )			0,5 - 2,5	0,8 - 2	0,3 - 2
	distance entre plages criblées ( $\mu\text{m}$ )	95 - 600		120 - 1300	1400 - 5000	500 - 800
	vitesse de circulation m.h <sup>-1</sup>			0,1 - 6		

1. La sève brute circule dans les xylèmes sous pression négative, alors que la sève élaborée circule dans les phloèmes sous pression positive.

**Que signifie sous pression négative et sous pression positive ?**

**Quel est le risque majeur** du point de vue hydraulique dans les xylèmes sous pression négative ?

**Montrer** que la circulation de la sève brute obéit à la loi de Poiseuille en prenant le cas le plus défavorable du tableau I (chiffres entourés). On sait que la viscosité de la sève brute est de l'ordre de 3 centipoise et que sa densité est de 1,03. **Calculer** dans ce cas les pertes de charge linéaire en Pa/m ainsi que les pertes de charge aux extrémités des vaisseaux (de longueur de libre parcours moyen).

2. On donne le tableau suivant :

Tableau II. — Comparaison de la répartition des vaisseaux dans un cerne annuel de bois de Chêne et de bois d'Erable. Dans les deux cas, les mesures ont porté sur une surface transversale de bois de 0,5 mm<sup>2</sup>.

	Nombre de vaisseaux par section	Nombre de vaisseaux de diamètre > 100 μm
Chêne	37	6
Erable	55	0

A partir de ce tableau II, **calculer** le pourcentage de la circulation de la sève brute du Chêne assurée par gros vaisseaux de diamètre supérieur à 100 μm. Pour simplifier le calcul, on supposera que les 6 gros vaisseaux du Chêne ont un diamètre moyen de 200 μm et que les 31 autres ont un diamètre moyen de 80 μm, et que les pertes de charge linéaires sont identiques quelque soit le diamètre.

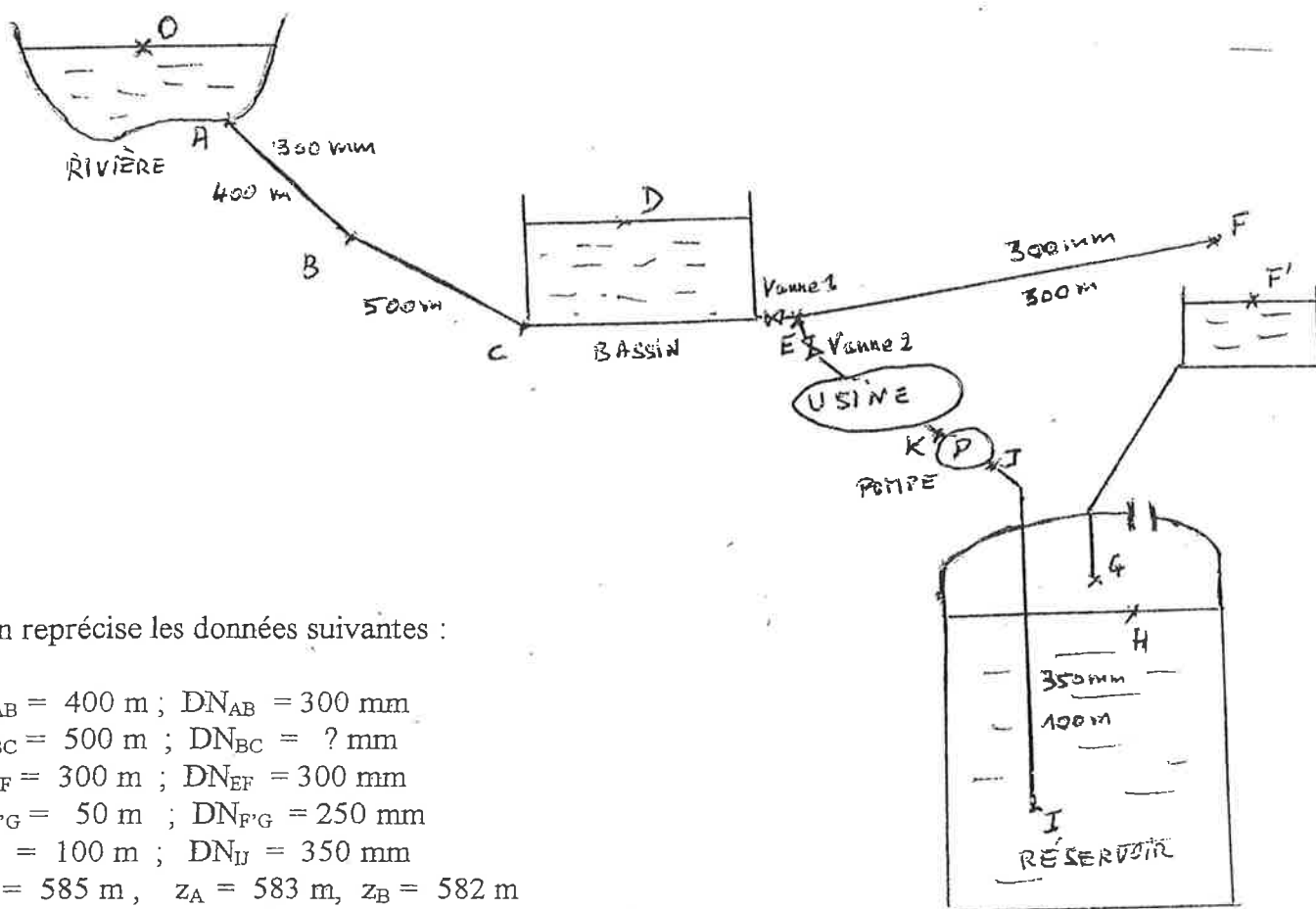
**Calculer** le nombre de vaisseaux de diamètre inférieur à 100 μm pour assurer environ le même pourcentage de la circulation de la sève brute dans l'Erable. Pour simplifier les calculs, on supposera que tous les vaisseaux de l'Erable ont un diamètre moyen de 80 μm et donc qu'ils ont les mêmes pertes de charge linéaire.

**Remarques** : avantages ou/et inconvénients.

### PROBLEME : alimentation en eau d'une usine de traitement (25-26 points)

Les deux parties de ce problème sont complètement indépendantes.

Le site industriel de Sainte Marie aux Mines a un procédé industriel nécessitant un système hydraulique spécifique comprenant un réservoir et une pompe. Ce réservoir est alimenté par un cours d'eau, la Liepvrette, via le circuit ABCEFG. Le système complet est représenté schématiquement par la figure ci-après.



On précise les données suivantes :

$$L_{AB} = 400 \text{ m} ; DN_{AB} = 300 \text{ mm}$$

$$L_{BC} = 500 \text{ m} ; DN_{BC} = ? \text{ mm}$$

$$L_{EF} = 300 \text{ m} ; DN_{EF} = 300 \text{ mm}$$

$$L_{F'G} = 50 \text{ m} ; DN_{F'G} = 250 \text{ mm}$$

$$L_{IJ} = 100 \text{ m} ; DN_{IJ} = 350 \text{ mm}$$

$$z_O = 585 \text{ m}, z_A = 583 \text{ m}, z_B = 582 \text{ m}$$

$$z_C = 579 \text{ m}, z_D = 581 \text{ m}, z_E = 579 \text{ m}, z_F = 580 \text{ m}$$

$$z_{F'} = 578 \text{ m}, z_G = 569,5 \text{ m}, z_H = 569 \text{ m}, z_I = 564 \text{ m}, z_J = 571 \text{ m}$$

Les tuyaux sont en fonte ductile de rugosité absolue  $k = 0,1 \text{ mm}$ . Les pertes de charge linéaires sont indiquées sur les tables de Pont-à-Mousson (planche 11). La pression atmosphérique est de 635 mmHg. La température de l'eau est de 10 °C.

## 1. Etude de l'adduction gravitaire (circuit OABCEF).

La vanne 2 est fermée.

11. La vanne 1 est fermée. On souhaite un écoulement de l'eau venant de la rivière vers le bassin avec un débit de l'ordre de 100 L/s lorsque les niveaux en O et D sont respectivement à 585 m et 581 m. On néglige les pertes de charge singulières.

**Calculer** les pertes de charge régulières dans le tronçon AB en mCE. **En déduire** la valeur de  $\lambda$  de la formule générale des pertes de charge régulières.

**Calculer** le nombre de Reynolds dans ce tronçon et **retrouver** la valeur de  $\lambda$  en utilisant l'abaque Colebrook (planche 22). On détaillera le raisonnement sur la copie d'examen. **Retrouver** cette valeur utilisant la formule générale de Colebrook (planche 10) ; on comparera les deux termes du logarithme.

**Remarques** : nature de l'écoulement.

**Calculer** les pertes de charge régulières dans le tronçon AC en mCE. **En déduire** le diamètre nominal DN de la conduite BC : on choisira le diamètre le plus adapté parmi ceux proposés dans les tables de Pont-à-Mousses (planche 11). **Déterminer** alors le débit exact dans la conduite AC à la précision près des tables. Ne recopier que les détails du débit exact.

12. La vanne 1 est ouverte. On considère que le régime d'écoulement est permanent entre les points O et F, que le bassin a donc un niveau constant. On néglige les pertes de charge dans le bassin ainsi que toutes les pertes de charge singulières.

**Calculer** le débit dans la conduite OF. On exprimera toutes les pertes de charge régulières en fonction de celui calculé précédemment. **En déduire** alors la hauteur d'eau dans le bassin et la cote  $z_D$ .

**Tracer** les lignes géométrique, piézométrique et de charge du circuit OF. On prendra 2 carreaux de la copie d'examen pour 1 mCE. **Retrouver** graphiquement la cote  $z_D$  et la hauteur d'eau dans le bassin.

## 2. Etude du circuit de traitement (circuit EFGHIJE).

La vanne 1 est fermée et la vanne 2 est ouverte.

21. **Tracer** la caractéristique du réseau (en bleu ou vert) sur l'annexe 1 en prenant 4 points entre 500 m<sup>3</sup>/h et 800 m<sup>3</sup>/h. Ne pas oublier de rendre cette annexe en y indiquant votre nom. Les pertes de charge régulières entre K et E ainsi que toutes les pertes de charge singulières seront négligées devant la perte de charge singulière dans l'usine de traitement estimée à  $200 \frac{u^2}{2g}$ ,  $u$  étant la vitesse dans la canalisation IJ. On consignera tous les résultats des calculs dans un tableau synthétique. On suppose que le réservoir garde un niveau constant  $z_H$ .

**En déduire** le choix du diamètre de la pompe NE 250-500 si l'on veut un débit de l'ordre de 195 L/s ainsi que les coordonnées du point de fonctionnement réel. **Justifier** rapidement.

**Y a-t-il cavitation** dans la pompe ? **Justifier** en détaillant les calculs.

22. **Tracer** la courbe représentative de la puissance à l'arbre de la pompe choisie sur l'annexe 1 en prenant 4 points entre 500 m<sup>3</sup>/h et 800 m<sup>3</sup>/h. On fera un tableau récapitulatif détaillé des valeurs calculées. **En déduire** la puissance à l'arbre de cette pompe pour le point de fonctionnement réel.

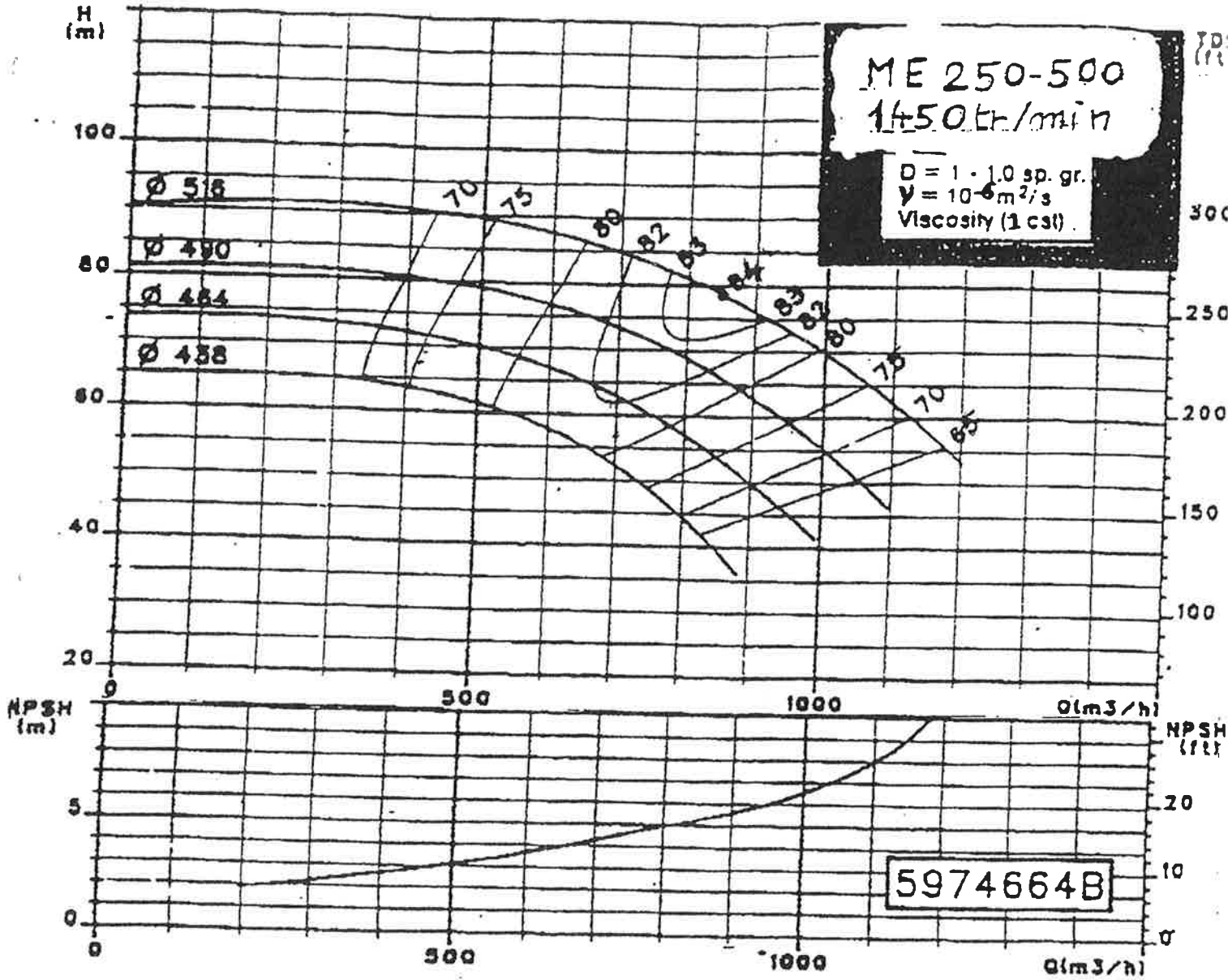
23. On souhaite pour des raisons techniques un débit exact de 195 L/s. Pour cela, on envisage deux solutions : changer la vitesse de la pompe ou rogner la roue de cette pompe. **Calculer** la vitesse ainsi que le diamètre de la roue rognée que devrait avoir la pompe (sans tracer les nouvelles caractéristiques).

24. On suppose que le niveau du réservoir descend de 5 m au cours du pompage. **Déterminer** le nouveau point de fonctionnement : on détaillera le raisonnement.

**Y a-t-il cavitation** dans la pompe ? **Justifier** en détaillant les calculs.

# DOCUMENT 1

NOM :



$\gamma$   
 (kW)

**Q(m³/h)**



Il sera tenu compte de la présentation, de l'expression et des fautes d'orthographe. Détailler le raisonnement et les calculs : bien mettre en évidence les applications numériques de manière à comprendre d'où viennent les bons résultats ou les erreurs. Encadrer uniquement les résultats demandés, sans oublier les unités. Tout résultat non encadré ne sera pas pris en compte.

### 1. Problème : drainage (12 points)

Un agriculteur souhaite drainer les parcelles de son exploitation. L'ingénieur Isarien chargé de l'étude veut connaître la conductivité hydraulique des parcelles à traiter de manière à déterminer le diamètre et la pente des drains à installer sur ces parcelles. Il fait procéder, sur une parcelle représentative, à la mesure de la perméabilité par le bureau d'études BRGM SGR Rhône-Alpes.

11. Pour limiter les frais, il ne demande pas de faire une mesure "in situ" (sur le terrain), mais d'utiliser le banc d'expérimentation du bureau d'études décrite en cours (planche 19). Le tube a un diamètre de 500 mm, une longueur de 1 m. En 2 heures, on recueille 3,2 L d'eau, sachant que la différence de pression  $h$  entre l'entrée et la sortie du tube rempli d'un échantillon de la parcelle représentative est de 45 cm.

Que représente cette différence de pression  $h$  ? Calculer le coefficient de Darcy, appelé coefficient de perméabilité. Quelle modification rapide, sans déplacer le tube et sans le transformer, faudrait-il apporter au banc d'expérimentation pour augmenter le débit (bien observer le schéma) ? Expliquer.

12. On modifie la disposition de l'expérience en mettant le tube qui était horizontal à la verticale comme l'indique le schéma de la planche 19 en haut à gauche (voir schéma au verso). Retrouver la valeur du coefficient de Darcy à partir de la mesure du temps de vidange du réservoir d'eau situé au-dessus du tube, sachant qu'avec une hauteur d'eau du réservoir de 30 cm, on trouve un temps de vidange de 14,5 heures. On écrira l'équation différentielle adéquate que l'on intégrera. Un tel appareil est appelé perméamètre à charge variable.

13. Que désignent  $d_{10}$  (mm),  $n$  (%) et  $n_e$  (%) ? Interpréter le tableau 15 de la planche 20 : expliquer l'évolution de  $n$  et de  $n_e$  en fonction de  $K$  (trouver l'erreur dans le tableau !).

Pour une valeur de  $K = 5 \cdot 10^{-6}$  m/s,  $n = 35\%$  et  $n_e = 15\%$

A partir de la porosité  $n$  et de la loi de Poiseuille pour un écoulement laminaire dans un tube cylindrique, calculer le diamètre moyen des "tubes capillaires" à travers lesquels s'écoule l'eau dans cet échantillon. Démontrer que la vitesse apparente d'écoulement est constamment égale au coefficient de Darcy lorsque l'eau s'écoule dans le tube saturé en eau, quelque soit le niveau d'eau dans le tube (voir schéma du perméamètre à charge variable avec le réservoir vide).

Exprimer cette vitesse en m/heure. Que représente-t-elle ?

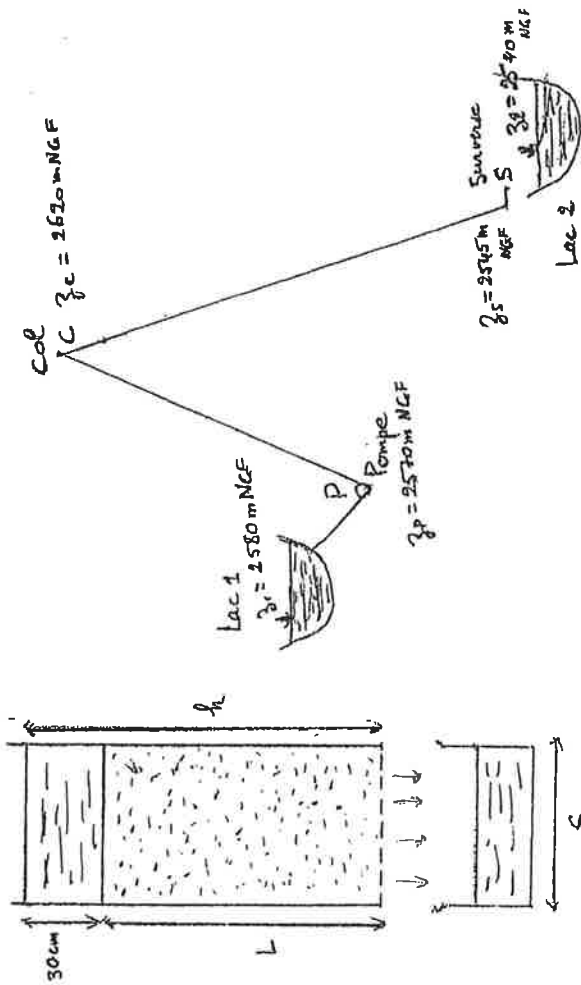
14. Calculer le volume d'eau contenue dans une parcelle d'un hectare sur une profondeur de 1,2 m, en supposant que le sol est homogène à l'échantillon étudié au laboratoire et qu'il est saturé en eau.

En supposant que toute l'eau s'écoule à travers ce sol de profondeur 1,2 m, calculer le temps théorique nécessaire pour que le sol soit entièrement sec. En déduire le débit théorique de drainage par ha.

En réalité, le débit est de l'ordre de 2 L/s/ha. Expliquer pourquoi il y a une telle différence.

15. Pour évacuer les eaux de drainage d'une parcelle de 8 ha, on doit poser un collecteur PVC armé pour rejoindre la rivière avec une pente maximale de 8 mm/m. Calculer le diamètre approximatif du collecteur, à partir de l'abaque de la planche 16 en supposant que le collecteur est plein et que le débit est de 2 L/s/ha. On vérifiera approximativement ce résultat en appliquant la formule de calcul indiquée sur cette planche.

En déduire le débit dans ce collecteur, s'il n'est rempli qu'à moitié, en considérant que les pertes de charge linéaires sont proportionnelles au périmètre mouillé et au carré de la vitesse. Remarque.



### 2. Problème (18 points)

On souhaite alimenter un lac de montagne (cote NGF 2540 m) à partir d'un autre lac (cote NGF 2580 m) qui se trouve dans une vallée supérieure ; un col (cote NGF 2620 m) sépare ses deux vallées (voir schéma ci-dessus). La conduite en fonte ductile Pont-à-Mousson, de diamètre 250 mm et de rugosité 0,1 mm, a une longueur de 1000 m avant le col et une longueur de 2500 m après le col. On négligera toutes les pertes de charge singulières. On rappelle que la pression atmosphérique varie en fonction de l'altitude selon la formule suivante :  $P(z) = 1,013 e^{-\frac{\rho g z}{P_0}}$  où  $P(z)$  est exprimé en bar et  $z$  en Km.

#### 21. Etude hydraulique de la canalisation en amont du col (lac supérieur-col)

21.1. Expliquer pourquoi un siphonnage n'est pas possible.

On place alors une pompe au point P (cote NGF 2570 m) à 100 m du lac, près du transformateur EDF pour éviter des pertes par effet Joule dues à une ligne électrique supplémentaire.

Ecrire l'équation de Bernoulli entre le lac 1 et la sortie S de la canalisation qui est en surverse (cote NGF 2545 m). En déduire la HMT que doit avoir la pompe pour que le débit soit de 60 L/s. Remarque ! Expliquer.

21.2. Ecrire alors l'équation de Bernoulli entre le lac 1 et le col C. En déduire la HMT que devra avoir la pompe pour le même débit de 60 L/s en imposant une pression dans la canalisation au col au moins égale à 0,5 bar en dessous de la pression atmosphérique. En déduire la puissance à l'arbre de la pompe sachant qu'elle a un rendement de 70 %.



213. Calculer la pression absolue d'aspiration à la pompe. Remarque !

Calculer la distance limite et l'altitude limite du lieu où il faudrait mettre la pompe pour éviter la cavitation avant la pompe (on ne tiendra pas compte des risques de cavitation dans la pompe pour simplifier). On montrera que la pente moyenne de la canalisation après la pompe est de 5,55 %. On supposera que l'eau est à 5 °C. On fera tous les calculs pour un débit de 60 L/s.

## 22. Etude hydraulique de la canalisation en aval du col (col-lac 2).

Dans cette partie, on fera tous les calculs pour un débit de 60 L/s et on considère que la pression dans la canalisation en C est toujours égale à 0,5 bar en dessous de la pression atmosphérique.

### 221. Ecrire l'équation de Bernoulli entre le col C et la sortie S.

En déduire le débit dans cette canalisation en imposant la pression atmosphérique (ce qui est vrai !) à la sortie S de la canalisation. Remarque !

En déduire la pression à la sortie de la canalisation en S (surverse) en supposant qu'il y ait le même débit que dans la pompe (60 L/s). Remarque !

Explication. Que se passe-t-il alors dans la canalisation en aval du col ?

Pour que tout se passe normalement dans la canalisation en aval du col, c'est-à-dire que la canalisation soit pleine en continu (écoulement sous pression) et que la pression à la sortie S de la canalisation soit égale à la pression atmosphérique, il faut augmenter les pertes de charge dans cette canalisation, entre le col C et la sortie S. On peut envisager 3 solutions :

222. On peut choisir un diamètre plus faible. Calculer le diamètre que devrait avoir la canalisation pour réaliser cette condition, à partir de la formule de Calmon-Lechapt (planche 10). Tracer alors la ligne géométrique, la ligne de charge et la ligne piézométrique de l'ensemble de l'installation hydraulique avec la pompe (en conservant la même canalisation en amont du col (250 mm) et la même HMT).

223. On peut ajouter un robinet-vanne à la sortie S. Déduire l'angle approximatif d'ouverture (ou de fermeture) de ce robinet pour compenser les pertes de charge nécessaires au bon fonctionnement de l'installation (à partir de la planche 8). Tracer alors la ligne géométrique, la ligne de charge et la ligne piézométrique de l'ensemble de l'installation hydraulique avec la pompe (en conservant la même canalisation en amont du col (250 mm) et la même HMT).

224. On peut ajouter à la sortie S de la canalisation une turbine de manière à récupérer le surplus d'énergie et à transformer les pertes de charge en énergie utile pour fabriquer de l'électricité.

Déduire de la charge de la turbine récupérée sur le circuit la puissance électrique fournie par l'alternateur branchée sur la turbine en supposant que le rendement de l'ensemble (alternateur-turbine) est de 85 %.

Comparer cette puissance électrique à celle du moteur électrique faisant fonctionner la pompe en admettant que le rendement du moteur électrique est de 95 %. Remarque ! Expliquer.

On peut encore augmenter la puissance de la turbine en ajoutant un diffuseur à la sortie (voir planche 3). Pour simplifier, on suppose qu'il n'y a pas de perte de charge dans le diffuseur et que la vitesse à la sortie du diffuseur est nulle puisqu'il s'agit d'un lac. Calculer la nouvelle puissance électrique de l'alternateur (avec le même rendement alternateur-turbine de 85 %) réalisée par l'ajout d'un tel diffuseur. Remarque !

DEVOIR SURVEILLE N° 2 DE PHYSIQUE

Monsieur GIGON

Tous documents autorisés avec calculatrice (tout type autorisé)

Il sera tenu compte de la présentation, de l'expression et des fautes d'orthographe. Détailler tous les raisonnements et tous les calculs : bien mettre en évidence les applications numériques de manière à comprendre d'où viennent les bons résultats ou les erreurs. Encadrer uniquement les résultats demandés, sans oublier les unités. Tout résultat non encadré ne sera pas pris en compte.

**On indiquera très lisiblement et très précisément** toutes les valeurs utilisées dans l'exercice et le problème sur le diagramme de Mollier et de l'air humide donnés en annexe. On ne tiendra pas compte des courbes de correction d'enthalpie.

**EXERCICE 1.** (5-6 points)

Un réfrigérateur fonctionne avec du fréon 502 dont le diagramme de Mollier est en annexe 1.

**Tracer le diagramme** de Mollier en supposant qu'il n'y a pas de surchauffe ni de sous-refroidissement, qu'il y a une désurchauffe de 20 °C, qu'il y a un écart de 5 °C entre la température de condensation du fréon et celle de l'air ambiant à 25 °C, et qu'il y a le même écart de 5 °C entre la température de vaporisation du fréon et la température de l'air refroidi à 2 °C. **Expliquer** l'intérêt de ces écarts de température.

**En déduire** le coefficient de polytropicité  $\alpha$  et le rendement indiqué  $\eta_i$  de cette compression.

**Calculer** le débit massique en Kg/h que doit avoir le fréon 502 pour que ce réfrigérateur puisse fournir la puissance frigorifique de 700 W en considérant que les échanges de chaleur sont parfaits.

**PROBLEME 2.** (24-25 points)

Le but de ce problème est d'étudier les différents échanges de chaleur du corps humain avec son environnement. Pour cette étude, on prendra comme modèle simpliste un cylindre homogène vertical de hauteur 1,80 m, de périmètre 60 cm, de masse 75 Kg, de température uniforme 37 °C et de capacité thermique massique moyenne 3,5 KJ Kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. La peau (constituée de l'épiderme, de la couche de Malpighi et du derme) sera modélisée par une couche isolante homogène d'épaisseur uniforme de 4 mm et de coefficient de conductivité  $\lambda$  à déterminer. Par ailleurs, on modélisera les phénomènes de vasodilatation de la circulation sanguine par un transfert par convection interne de coefficient  $h_{\text{interne}}$  égal à 25 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>. On ne prendra pas en compte les échanges de chaleur par la respiration.

On donne le coefficient de viscosité dynamique de l'air  $\mu = 0,0185$  centiPoise.

21. Si l'on considère qu'un être humain produit une quantité de chaleur d'environ 10<sup>7</sup> J par jour (24 h) du fait de son activité métabolique, **calculer** son augmentation de température provoquée par le métabolisme en une heure s'il était un système isolé (pas d'échange de chaleur avec l'extérieur).

**Calculer** la masse d'eau que devrait être vaporisée chaque jour pour maintenir la température du corps constante, en supposant qu'il n'y a aucun autre échange de chaleur.

**Calculer** le flux thermique en W pour évacuer toute cette chaleur du corps humain pour maintenir sa température constante.

22. On suppose dans ce paragraphe que le flux thermique (calculé précédemment) se fait uniquement par transfert de chaleur par convection interne entre le corps et la peau, par conduction à travers la peau, puis simultanément par convection externe entre la peau et l'air ambiant et par rayonnement entre la peau et l'espace (sans vaporisation). **Calculer** la valeur du coefficient de conductivité  $\lambda$  de la peau en supposant que la température interne du corps est uniformément égale à 37 °C, que la température externe du corps est de 32 °C et qu'il y a une convection forcée interne avec un coefficient  $h_{\text{interne}}$  égal à 25 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>.



**Calculer** le coefficient de transfert de chaleur  $h_{\text{cexterne}}$  par convection naturelle entre le corps humain dont la température externe est supposée de 32 °C et l'air ambiant à 20 °C. **En déduire** le flux thermique dû à cette convection entre la surface du corps humain et l'air ambiant.

**Déduire** le flux thermique dû au rayonnement de la surface du corps humain en considérant que le flux thermique à l'extérieur du corps humain se fait à la fois par la convection de l'air et le rayonnement. **En déduire** la valeur du coefficient d'émissivité  $\varepsilon$  de la peau.

23. On suppose que l'air ambiant de 20 °C est balayé avec un vent de 50 Km/h. **Calculer** le coefficient de convection forcée externe  $h'_{\text{cexterne}}$  en considérant que l'écoulement est parallèle au cylindre que l'on assimilera à une plaque parallèle de longueur  $L = 1,80$  m. **Remarque.**

**En déduire** alors la température extérieure du corps humain en négligeant le transfert par rayonnement et en supposant que le flux thermique est le même qu'en 21.

Pour maintenir la température extérieure de la peau à 32 °C, on ajoute une couche isolante en laine de conductivité thermique égale à  $0,04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . **Calculer** l'épaisseur que devrait avoir cette couche de laine.

24. On suppose que le corps humain a une activité de l'eau égale à 0,9 et qu'il est en contact avec de l'air ambiant (20 °C, 60 %). **Représenter** sur le diagramme de l'air humide (annexe 2) le point A représentant l'air ambiant, ainsi que le point B représentant l'air en équilibre avec le corps humain à la température extérieure de 32 °C.

**Retrouver** l'expression exacte de la pression partielle de la vapeur d'eau en fonction de son humidité absolue  $H_A$ . **En déduire** la pression partielle en hPa (hectoPascal) de la vapeur d'eau de l'air ambiant et de l'air au voisinage du corps humain. **Donner** l'intérêt de connaître la différence de ces deux pressions partielles.

**Déduire** du diagramme la nouvelle quantité d'eau que peut enlever au corps cet air ambiant en  $g_{\text{ve}}/\text{Kg}_{\text{as}}$ . **Calculer** le débit d'air ambiant en  $\text{m}^3/\text{h}$  qu'il faudrait ventiler pour évaporer la quantité d'eau calculée en 21 pour maintenir la température du corps constante sans aucune autre forme d'échange de chaleur.

Supposons que des habitants vivent à 3000 m d'altitude. **Représenter** sur le diagramme de l'air humide fait à 0 m l'air ambiant (20 °C, 60 %) à 3000 m par le point A'. **On déduira** le coefficient de correction de la formule permettant de calculer la pression atmosphérique en fonction de l'altitude :  $P(z) = P(0) \exp(-z/7850)$ ,  $z$  en m.

**Déduire** du diagramme la nouvelle quantité d'eau que peut enlever au corps cet air ambiant en  $g_{\text{ve}}/\text{Kg}_{\text{as}}$  ainsi que la nouvelle différence de pression partielle de la vapeur d'eau en hPa de cet air ambiant et de l'air au voisinage du corps. **Calculer** le nouveau débit d'air ambiant en  $\text{m}^3/\text{h}$  qu'il faudrait ventiler pour évaporer la quantité d'eau calculée en 21 pour maintenir la température du corps constante sans aucune autre forme d'échange de chaleur. **Remarques.**

25. Tout le monde sait par expérience que l'on ressent une sensation différente si l'on pose la main sur une plaque d'acier ou sur du bois. L'explication physique réside dans la valeur de la température de contact due à la différence entre les effusivités thermiques  $e_{\text{th}}$  des deux corps en contact. On définit l'effusivité thermique  $e_{\text{th}}$  par la relation :  $e_{\text{th}} = (\lambda \rho c_p)^{0,5}$ . **Donner** l'unité SI de  $e_{\text{th}}$ . Par ailleurs on montre qu'en régime dynamique la température de contact est donnée par la formule :  $T = (T_1 e_{\text{th}1} + T_2 e_{\text{th}2}) / (e_{\text{th}1} + e_{\text{th}2})$ , les températures sont exprimées en K ou en °C. **On montrera** que le calcul de la température est indépendante de l'unité choisie (°C ou K).

**Calculer** la température extérieure du corps humain quand il est en contact avec de l'air à - 30 °C et quand il est en contact avec de l'eau à 2 °C. **Remarque !**

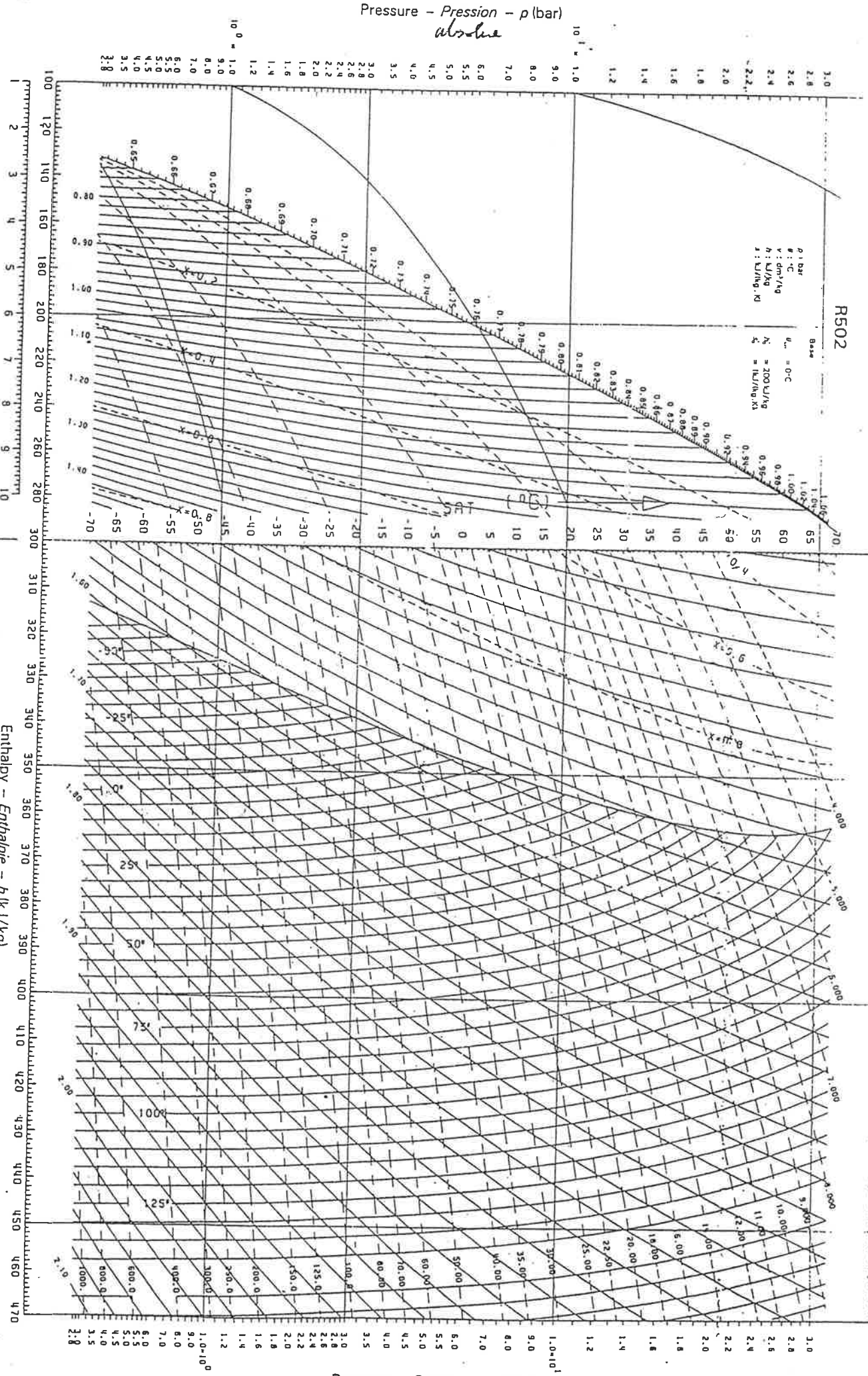
**On calculera** les effusivités thermiques de l'air à - 30 °C et de l'eau à 2 °C. On donne l'effusivité thermique de la peau égale à 1800 uSI et on considère que la température interne de la peau est de 32 °C.

NOTES

R502

$P$ : bar  
 $t$ : °C  
 $v$ : dm<sup>3</sup>/kg  
 $h$ : kJ/kg  
 $s$ : kJ/kg·K

$t_c$ : 0°C  
 $h_c$ : 200 kJ/kg  
 $s_c$ : 1 kJ/kg·K



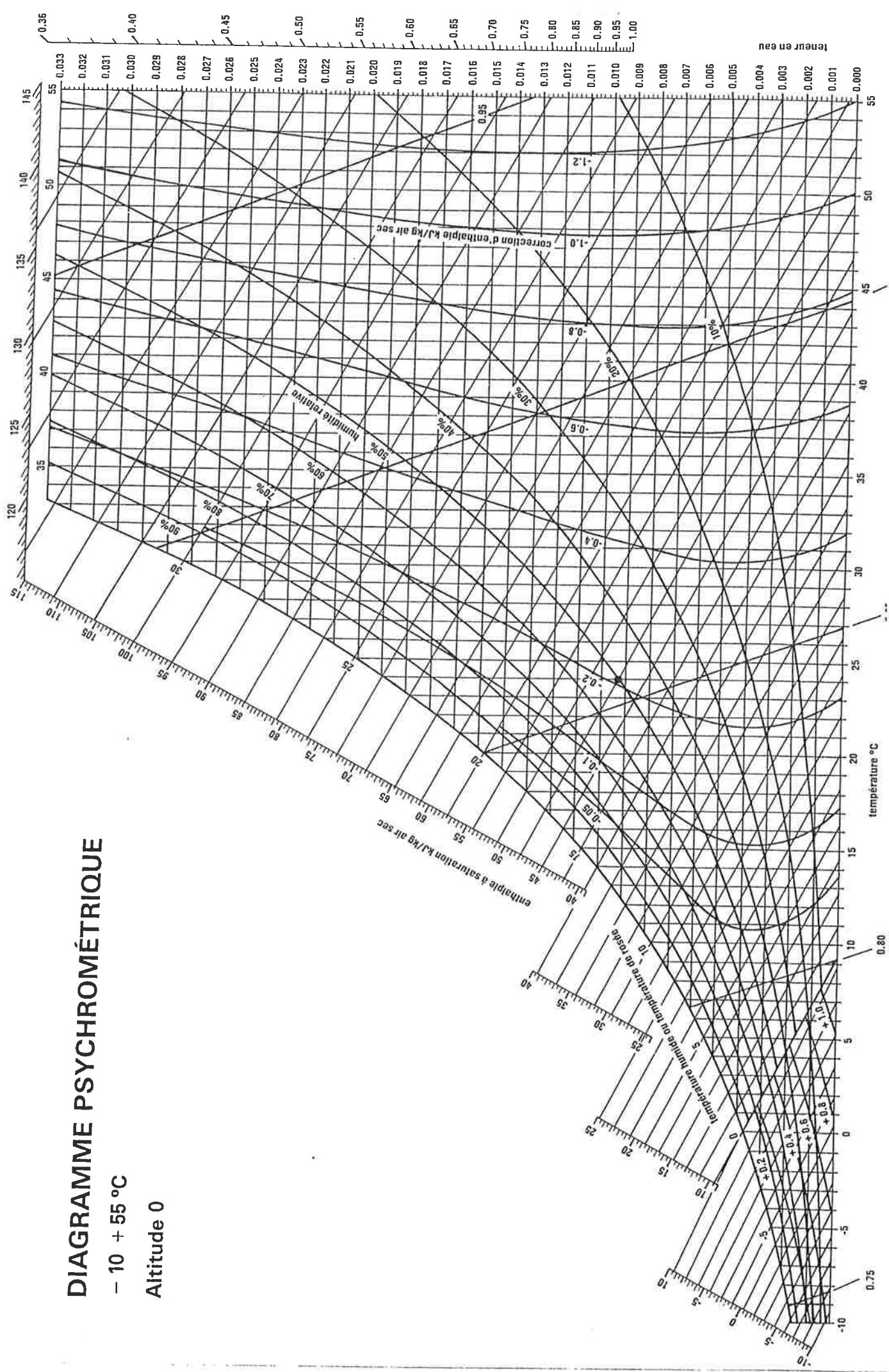
Pressure - Pression -  $p$  (bar)  
 SCALÉ CHANGEMENT  
 0 ECHILLE

Enthalpy - Enthalpie -  $h$  (kJ/kg)  
 azéotrope R22/R115 - (CHClF<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>ClF<sub>5</sub>) - R502

# DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE

- 10 + 55 °C

Altitude 0



DEVOIR SURVEILLE N° 2 DE PHYSIQUE

Monsieur GIGON

Tous documents autorisés avec calculatrice (tout type autorisé)

Il sera tenu compte de la présentation, de l'expression et des fautes d'orthographe. Détailler tous les raisonnements et tous les calculs : bien mettre en évidence les applications numériques de manière à comprendre d'où viennent les bons résultats ou les erreurs. Encadrer uniquement les résultats demandés, sans oublier les unités. Tout résultat non encadré ne sera pas pris en compte.

**PROBLEME 1.** (14-15 points)

Actuellement, il est obligatoire en vertu du protocole de Montréal de remplacer le R12 de toutes les installations frigorifiques par de nouveaux fluides frigorigènes. Le but de cet exercice est de comparer les caractéristiques de deux nouveaux fluides frigorigènes : le R502 et le HFA 134a (ou HFC 134a) dont les diagrammes de Mollier sont donnés en annexe. **On y indiquera très lisiblement et très précisément** toutes les valeurs utilisées dans cet exercice.

Pour simplifier la comparaison, on suppose que l'on veut une température de condensation de  $+ 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une température de vaporisation de  $- 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une surchauffe de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une compression isentrope et un sous-refroidissement de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

11. Pourquoi le R12 est-il néfaste pour l'environnement ? **Déduire** de la formule chimique de chacun de ces deux fluides proposés le meilleur pour l'environnement **Justifier**.

12. Tracer exactement le diagramme de Mollier de ces deux fluides.

**En déduire** la chaleur latente massique de vaporisation à  $- 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ainsi que le titre massique de la vapeur à l'entrée de l'évaporateur de chacun de ces fluides. **En déduire** la production frigorifique massique nette de chacun de ces fluides.

**Remarques.**

Calculer la capacité thermique massique moyenne au cours de la désurchauffe de chacun de ces fluides. **Remarque.**

Calculer l'efficacité frigorifique de Mollier de chacun de ces fluides. **Remarque.**

13. Calculer le taux de compression, le rendement volumétrique et le volume massique balayé du compresseur correspondant à chacun de ces fluides. **Remarque.**

14. On désire fabriquer une machine frigorifique qui puisse refroidir de l'eau en 2 heures de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec un débit de  $100\text{ L/h}$ . Calculer la quantité de chaleur qu'il faut enlever à l'eau pendant ces 2 heures en J et en KWh. **En déduire** la puissance frigorifique  $\Phi_0$  que devrait avoir cette machine (on suppose les échanges parfaits).

**En déduire** le débit massique horaire en Kg/h de chacun de ces fluides ainsi que le débit volumique balayé horaire du compresseur de cette machine frigorifique correspondant à chacun de ces fluides. **Remarques.**

**En déduire** la puissance à l'arbre du compresseur correspondant à chacun de ces fluides (on considérera que le rendement est le même et égal à 0,9).

**En déduire** l'efficacité frigorifique réelle de la machine frigorifique correspondant à chacun de ces fluides. **Conclusion !**

## **PROBLEME 2.** (15-16 points)

Le but de ce problème est de calculer l'épaisseur de l'isolant de la porte verticale d'un four à chaleur tournante pour que la température externe de la porte soit de 32 °C.

La porte verticale ayant 50 cm de hauteur et 70 cm de largeur est constituée de briques réfractaires de 80 mm d'épaisseur et d'un isolant de  $0,01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  de coefficient de conductivité thermique.

On détaillera tous les raisonnements et tous les calculs de ce problème.

21. Calculer tous les coefficients de conductivité thermique en uSI nécessaires pour le problème à partir de la planche 1 (air à 18 °C, air à 300 °C, briques réfractaires (de Missouri) à 300 °C).

On donne l'expression de  $\mu$  de l'air en fonction de la température :  $\mu(T) = 0,00118 T - 0,325$  où  $\mu$  est exprimé en cPo (centipoise) et  $T$  en K. **Expliquer** rapidement pourquoi la viscosité de l'air augmente avec la température.

22. Calculer le transfert de chaleur en W par rayonnement entre la porte du four et le mur vertical situé en face de la porte. **Faire le calcul** de trois manières différentes : soit en appliquant la formule exacte, soit en appliquant la formule simplifiée (soit par le calcul, soit avec l'abaque). **Comparer** les résultats. **Remarque.** (Un seul calcul suffira pour la suite du problème).

On déduira de la planche 7 les valeurs des coefficients d'émissivité du mur recouvert d'une peinture vert clair et de la porte recouverte d'une peinture blanche. On suppose que la température de la surface du mur est à la température ambiante de 18 °C.

23. Calculer le transfert de chaleur en W par convection externe entre la porte du four et l'air ambiant de température de 18 °C.

24. Calculer le coefficient de transfert par convection interne  $h_{ei}$  entre la porte et l'intérieur du four à chaleur tournante sachant que  $Re = 10^4$  et que la température moyenne de l'air du four est de 300 °C.

On fera le calcul de deux manières différentes : soit en considérant que le four est analogue à un cylindre horizontal de diamètre moyen de 60 cm, soit qu'on a à faire à une plaque parallèle. **Remarque.**

25. Déduire des calculs précédents l'épaisseur que doit avoir l'isolant pour avoir une température externe de la porte de 32 °C. En déduire également la température interne de la porte.

26. La chaleur tournante du four est réalisée avec un ventilateur hélicoïdal de 18 cm de diamètre.

Calculer la vitesse de rotation en trs/mn de ce ventilateur en considérant que  $Re = 10^4$ .

En déduire la puissance d'agitation de ce ventilateur en utilisant l'abaque de la planche 14. On prendra pour  $N_p$  la valeur moyenne du  $N_p$  des deux hélices à 3 pales (modèle le plus proche du ventilateur)

On montrera que  $N_p$  ne dépend que de  $Re$  quand il n'y a pas de vortex à partir de l'équation aux dimensions.

Si l'on voulait fabriquer un four 2 fois plus grand ayant les mêmes conditions thermiques (mêmes températures, mêmes pertes thermiques en  $\text{W/m}^2, \dots$ ), **quel invariant** (ou quelle similitude) faudrait-il choisir ? **Justifier.**

En déduire la vitesse et la puissance d'agitation que devrait avoir le ventilateur de ce nouveau four.

**BON COURAGE POUR LA FIN DE L'ANNEE A GERLAND !**



DEVOIR SURVEILLE N°2 DE PHYSIQUE

Monsieur GIGON

Tous documents autorisés avec calculatrice (tout type autorisé)

Il sera tenu compte de la présentation, de l'expression et des fautes d'orthographe. Détailler le raisonnement et les calculs : bien mettre en évidence les applications numériques de manière à comprendre d'où viennent les bons résultats ou les erreurs. Encadrer uniquement les résultats demandés, sans oublier les unités. Tout résultat non encadré ne sera pas pris en compte. Ne pas oublier d'inscrire votre nom sur les annexes 1 et 2. Attention : contrairement à l'habitude, la première et la troisième parties du problème sont au choix. L'exercice et la deuxième partie du problème doivent être traités obligatoirement.

**EXERCICE** : étude d'un tube cylindrique chauffant (14/15 points)

On souhaite chauffer 120 L/h de lait de 4 °C à 54 °C en le faisant passer dans un tube cylindrique  $C_2$  (10/12 en cuivre terni de longueur totale de 10 m. Il est disposé en zig-zag dans un plan horizontal (voir schéma annexes 1 et 2 verso). Ce tube  $C_2$  est chauffé extérieurement par rayonnement infra-rouge grâce à un tube  $C_1$  (50/54) en verre, coaxial à  $C_2$  et de même longueur ; on néglige les effets dus aux coudes.

On utilisera les valeurs caractéristiques moyennes du lait à 29 °C :

densité = 1,02 ;  $c_p = 4 \text{ KJ Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ;  $\mu = 2$  centipoise ;  $\lambda = 0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

1. Calculer la quantité de chaleur en J et en KWh qu'il faut fournir à 120 L de lait pour le chauffer en une heure. En déduire la puissance thermique (flux thermique) transférée au lait.

2. Calculer la température  $T_1$  que doit avoir la surface interne du tube  $C_1$  pour que la puissance thermique échangée uniquement par rayonnement assure le chauffage du lait dans les mêmes conditions (en négligeant la convection de l'air emprisonné entre les deux tubes). On suppose que la température de la surface externe du tube  $C_2$  est égale à 100 °C tout au long du tube.

On utilisera la formule générale suivante :  $\Phi = \sigma F_{12} S_1 (T_1^4 - T_2^4)$ . On prendra  $F_{12} = 0,1$ .

3. En réalité, on constate que la température de la surface interne du tube  $C_1$  est égale à 600 °C qu'on notera  $T'_1$ . On en déduit donc qu'il existe simultanément un flux thermique par convection libre de l'air emprisonné entre ces deux tubes.

Calculer alors le flux thermique échangé entre les deux cylindres par rayonnement. En déduire le flux thermique par convection libre entre les deux cylindres.

4. Si l'on fait l'hypothèse que la convection libre se fait entre les deux cylindres de températures respectives  $T'_1$  et  $T_2$ , calculer le coefficient  $hc$  de transfert thermique par convection libre. On prendra pour  $L$  la distance entre les deux cylindres (on rappelle qu'ils sont horizontaux). On admettra que la pression de l'air est de 1 bar. On calculera en  $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  le coefficient moyen de conductivité thermique de l'air compris entre les deux cylindres à la température moyenne de 350 °C à partir de la planche 1.

On prendra comme coefficient de viscosité dynamique de l'air la valeur moyenne de  $32 \cdot 10^{-3}$  centipoise.

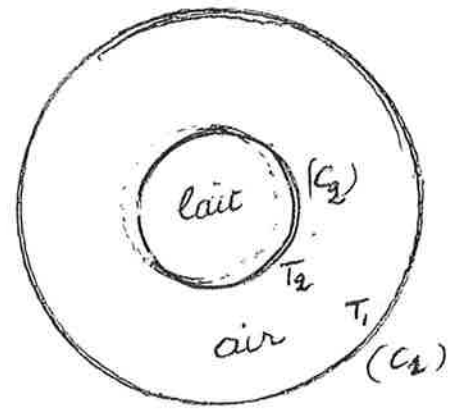
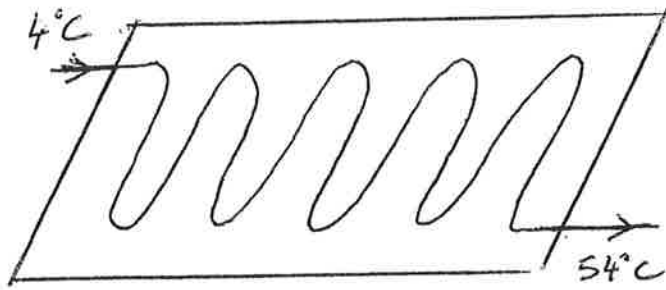
En déduire le flux thermique par convection libre. On utilisera la formule :  $\Phi = hc S_{\text{ml}} \Delta T$ .

Comparer cette valeur au résultat précédent de la question précédente 3. Remarque. Auriez-vous une autre hypothèse à proposer ? On se contentera de formuler cette hypothèse sans faire de calculs.

5. Calculer le flux thermique entre le lait circulant dans le tube  $C_2$  et la surface externe de ce tube de température  $T_2 = 100$  °C. On utilisera l'analogie des résistances électriques, en détaillant les calculs. Le coefficient de conductivité thermique du cuivre est donné sur la planche 1.

Remarque sur le résultat.





### **PROBLEME : étude de la préréfrigération sous vide (vacuum cooling) (16 points)**

Le but de ce problème est d'étudier le principe de la préréfrigération sous vide et de calculer concrètement la réalisation d'un tel procédé pour le refroidissement des salades.

En effet, ce procédé s'applique au refroidissement très rapide, avant expédition, des légumes feuillus tels que les salades ; ce qui demande plusieurs heures avec les procédés habituels de refroidissement à l'air, car le refroidissement des coeurs de salades telles que les laitues, logées dans leur emballage de vente, est lent et difficile à obtenir.

On considérera dans tout ce problème que la pression atmosphérique est normale.

#### **Première partie. (10 points)**

11. **Que se passe-t-il** si les salades fraîchement ramassées ( $a_w = 1$ ) restent dans de l'air de température 25 °C et de degré hygrométrique 40% ? (deux lignes)  
**Positionner** le point représentatif de cet air (noté A) ainsi que celui de l'air en équilibre au voisinage des salades (noté S) sur le diagramme de l'air humide (annexe 1). **Ne pas oublier** de le rendre avec la copie.
12. **Calculer** la pression partielle exacte de la vapeur d'eau contenue dans cet air en cmHg. **En déduire** la température de rosée à partir du tableau des constantes thermodynamiques de l'eau. **Retrouver** le résultat sur le diagramme enthalpique de l'air humide (point B).
13. **Que devient** le degré hygrométrique de cet air s'il est refroidi à 5 °C (on raisonnera à partir du diagramme) (point C) ?  
**Que se passe-t-il** alors si ces mêmes salades restent dans cet air ainsi refroidi ? (deux lignes)  
**Déduire** du diagramme la variation d'enthalpie correspondant à ce refroidissement. **Retrouver** ce résultat par le calcul.
14. **Positionner** le point représentatif de cet air (noté D) si l'installation était à 3000 m d'altitude ? On rappelle que la pression atmosphérique varie en fonction de l'altitude de la manière suivante :  
 $P(z) = P_0 e^{-z/7,8}$  où  $z$  est l'altitude en Km et  $P_0$  est la pression atmosphérique normale au niveau de la mer.  
**Calculer** à nouveau la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans cet air à 3000 m. **Remarque.**

## Deuxième partie. (6 points)

Les salades emballées en plateaux sont disposées sur des palettes qui sont introduites dans un caisson étanche. Ce caisson est relié à un système permettant d'y faire le vide afin de refroidir ces salades par le procédé du Vacuum Cooling.

21. **Expliquer** le principe de ce procédé (quatre lignes)
22. L'évaporation des salades devient effective dès que la pression d'air dans le caisson tombe à 24 mmHg environ, à 25 °C. **Pourquoi ?** (deux lignes). C'est ce que l'on appelle le "flash point".  
**Calculer** la masse d'eau qu'il faut évaporer, si l'on veut abaisser la température d'une tonne de salades de 25 °C à 5 °C, sachant que la capacité thermique massique de la salade est de  $0,9 \text{ cal g}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ . **En déduire** alors le pourcentage de perte de poids. **Remarque.**  
**On prendra** la valeur moyenne de la chaleur latente de vaporisation entre 25 °C et 5 °C.  
L'évaporation se poursuit au fur et à mesure que la pression diminue jusqu'à 4,5 mmHg environ, limite à ne pas dépasser. **Pourquoi ?** (deux lignes)  
Pour répondre à toutes ces questions on utilisera le tableau des constantes thermodynamiques de l'eau.
23. **Calculer** le volume de toute la vapeur produite pour une tonne de salades dans les conditions finales de préréfrigération (pression de vapeur saturante à la température de 5°C), à partir de la table des constantes thermodynamiques et de la loi des gaz parfaits. **Remarque.**

## Troisième partie. (10 points)

Cet équipement de vide est complété par un évaporateur d'une machine frigorifique dont la température de vaporisation est de - 10°C.

31. **Expliquer** l'intérêt de cet évaporateur de température négative.
32. Pour fabriquer ce froid, on utilise une machine frigorifique fonctionnant avec du R 502 (azéotrope R22/R115) dont le diagramme de Mollier est en annexe 2. **Tracer** en gras l'isotitrique complète 0,6, l'isentrope complète 1,4 et l'isochore 4,000 en précisant les unités, ainsi que l'isotherme - 10 °C dans les trois domaines (liquide, liquide-vapeur, vapeur). **Ne pas oublier** de rendre l'annexe avec la copie.
33. **Déduire** de ce diagramme la chaleur latente massique du R 502 à - 10°C ainsi que la capacité thermique massique à pression constante du R 502 gazeux entre - 10 °C et 25 °C à la pression de 2 bar. **On détaillera** le raisonnement et les calculs en faisant apparaître les différentes valeurs utilisées pour le calcul sur le diagramme.
34. **Tracer** le cycle de Mollier de cette machine frigorifique en supposant qu'il n'y a pas de surchauffe ni de sous-refroidissement, que le rendement indiqué est de 0,7 et qu'il y a 10 °C de différence entre la température de condensation du R 502 et celle de l'air ambiant (25 °C). **On détaillera** le raisonnement et les calculs en faisant apparaître les différentes valeurs utilisées pour le calcul sur le diagramme.
35. **Calculer** l'efficacité frigorifique de ce cycle.  
**Calculer** la puissance frigorifique de cette machine frigorifique dont la puissance électrique est de 300 W, sachant que le rendement du compresseur est de 0,8.  
**En déduire** le débit massique horaire du fréon 502.  
**En déduire** le débit volumique horaire du fréon 502 à la sortie du compresseur.

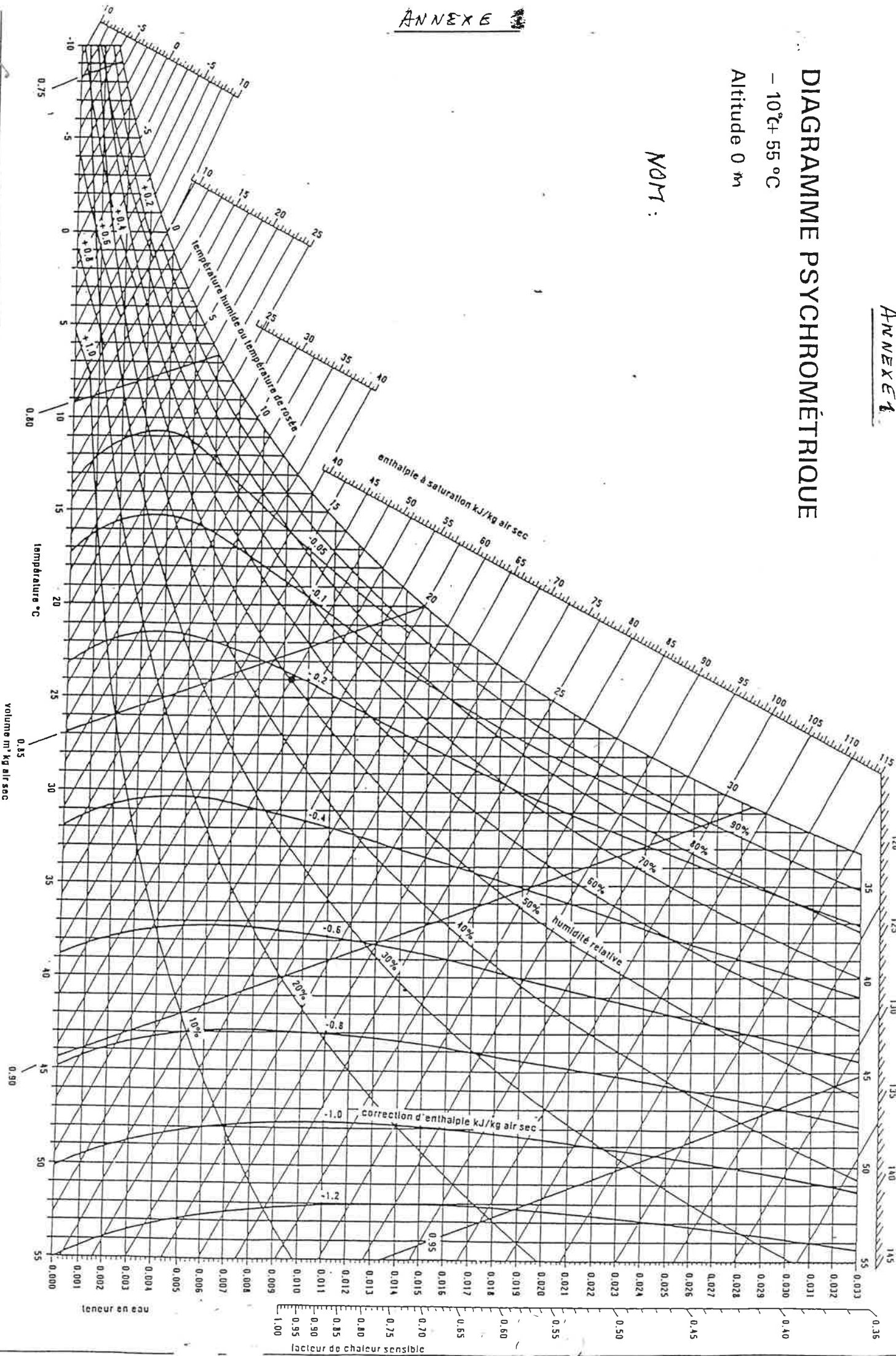
- Pour des renseignements complémentaires relatifs à cette technique, consulter le livre de Daniel COLLIN - Applications frigorifiques- tome 1. Industries agricoles et alimentaires. PYC Edition 1975.

# DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE

- 10°C à 55 °C

Altitude 0 m

NOT :



NOM:



DEVOIR SURVEILLE N°2 DE PHYSIQUE

- Monsieur GIGON -  
(avec documents)

*Les documents sont autorisés ainsi que tout type de calculatrice.*

Il sera tenu compte de la présentation, de l'expression et des fautes d'orthographe. Détailler le raisonnement et les calculs : bien mettre en évidence les applications numériques de manière à comprendre d'où viennent les bons résultats ou les erreurs. Encadrer les résultats, sans oublier les unités. Tout résultat non encadré ne sera pas pris en compte. Le sujet a 3 exercices indépendants et 5 pages dont 2 annexes.

Attention : contrairement à l'habitude, il n'y a que **2 exercices à faire sur 3** : à vous de faire le bon choix !

**1. EXERCICE : étude d'une machine frigorifique (15 points)**

Un groupe frigorifique a une puissance frigorifique de 800 W et fonctionne avec du R502 (voir diagramme de Mollier ci-joint en annexe 1) dans les conditions suivantes : la température d'évaporation est de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la pression relative de condensation est de 12 bar, la surchauffe est de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , le sous-refroidissement de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et le rendement indiqué  $\eta_i$  est de 0,72 (on rappelle que  $\eta_i = W_{\text{rév}}/W_{\text{irrév}}$ ).

**11. Questions préliminaires :**

**Surligner** en noir sur le diagramme de Mollier l'isentrope 1,00 KJ/(Kg.K), l'isenthalpe 200 KJ/kg et l'isotherme  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . **Remarque. Ne pas oublier** de le rendre avec la copie et d'y indiquer votre nom.

**Retrouver** la valeur de ce rendement indiqué  $\eta_i$  (on rappelle que  $\eta_i = 1 - 0,05\tau$ ).

**Pourquoi** est-il relativement faible ? (une ligne)

**Expliquer** pourquoi ce groupe frigorifique correspond à un congélateur. (une ligne)

**12. Tracer** en bleu ou vert le cycle du R502 sur ce diagramme de Mollier en détaillant le raisonnement et en y faisant bien apparaître les éléments de construction (notamment pour placer le point représentatif du fréon à la sortie du compresseur).

**Déduire** du diagramme la température et le volume massique en fin de compression ainsi que la masse volumique du fréon liquide à l'entrée du détendeur.

**Calculer** l'efficacité frigorifique de ce cycle. **Pourquoi** est-il relativement faible ?

**Calculer** le coefficient de polytropicité  $\alpha$  de la compression polytropique du compresseur.

**13. Calculer** le débit massique horaire du fluide frigorigène R 502 (en Kg/h).

**En déduire** le volume horaire réellement aspiré ainsi que le volume horaire balayé en  $\text{m}^3/\text{h}$ . On suppose que le rendement volumétrique est égal au rendement indiqué. **En déduire** la cylindrée du compresseur en  $\text{cm}^3$  sachant qu'il tourne à 1450 trs/mn.

En admettant que le rendement du moteur-compresseur est de 0,8, **calculer** la consommation électrique réellement dépensée en KWh pendant 8 heures d'utilisation du groupe frigorifique.

## 2. EXERCICE : atomisation du lait (15 points)

En 3<sup>ème</sup> année, vous ferez un TP sur le séchage du lait par atomisation. Cela consiste à pulvériser du lait dans un courant d'air chaud de manière à obtenir de la poudre de lait. L'installation pilote d'atomisation comprend : un circuit du lait liquide (1-2), un circuit d'air (3-6) chauffé par des résistances électriques (5), une chambre de séchage (7) et un séparateur air-poudre 8-10) (voir schéma).

21. Questions préliminaires :

**Surigner** sur le diagramme de l'air humide fait à la pression normale (annexe 2), l'isenthalpe  $0 \text{ KJ/Kg}$ , l'isotherme  $20^\circ\text{C}$ , "l'iso humidité relative"  $i/p_r = 20\%$  et "l'isotitrique humidité absolue"  $HA = 0,002$ .

**Ne pas oublier** de le rendre avec la copie et d'y indiquer votre nom.

**Déduire** sur ce diagramme la variation d'enthalpie quand on passe de l'air sec à  $20^\circ\text{C}$  à de l'air humide saturé à  $50^\circ\text{C}$ . **Retrouver** ce résultat par le calcul.

22. Le circuit d'air comprend un ventilateur qui aspire l'air ambiant ( $1,013 \text{ bar}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $60\%$ ), une batterie de chauffage qui le chauffe jusqu'à  $250^\circ\text{C}$ , la chambre de séchage proprement dite et une conduite de sortie (cheminée) où l'air sort à la température de  $83^\circ\text{C}$ .

**Indiquer** sur le diagramme les 3 points représentatifs de l'air : A (entrée du ventilateur), B (après le chauffage) et C (sortie de la conduite) ainsi que les "trajets" AB et BC en le justifiant.

**En déduire** l'humidité relative de l'air en B (**remarque !**) ainsi que celle de l'air en C à la sortie. **Remarque** on la comparera à celle de l'air en A à l'entrée.

**En déduire** la capacité évaporatoire de cette tour en  $\text{g/Kg}$  (g d'eau évaporée par Kg d'air sec). **Justifier** sur le diagramme. **Remarque.**

23. **Calculer** le volume massique de l'air en A à l'entrée du ventilateur ainsi que celui de l'air en C à la sortie en  $\text{m}^3(\text{air humide})/\text{Kg}(\text{air sec})$ . **On pourra vérifier** le résultat de l'air en A sur le diagramme de l'air humide de la planche 18.

**Calculer** le débit volumique de l'air à la sortie en C (en  $\text{m}^3(\text{air humide})/\text{h}$ ) sachant que la conduite a un diamètre de  $48 \text{ mm}$  et que la vitesse de l'air est de  $16 \text{ m/s}$ .

**En déduire** le débit massique de l'air sec (en  $\text{Kg}(\text{air sec})/\text{h}$ ) ainsi que la capacité évaporatoire de cette tour en  $\text{Kg/h}$  (quantité d'eau évaporée par heure). **Remarque.**

**Calculer** la puissance de chauffe minimale en  $\text{W}$  correspondant à cette capacité évaporatoire, à partir de la variation d'enthalpie correspondant au chauffage et du débit massique.

