



SERVICES CULTURE ÉDITIONS
RESSOURCES POUR
L'ÉDUCATION NATIONALE

Ce document a été numérisé par le CRDP de Bordeaux pour la
Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel.

Campagne 2012

BREVET de TECHNICIEN SUPÉRIEUR

**CONTRÔLE INDUSTRIEL et
REGULATION AUTOMATIQUE**

E-3 SCIENCES PHYSIQUES

U-31 CHIMIE-PHYSIQUE INDUSTRIELLES*Durée : 2 heures**coefficient : 2,5*

	Durée conseillée
Chimie industrielle	45 minutes
Physique industrielle	1 h 15

Matériel autorisé :

- Toutes les calculatrices de poche y compris les calculatrices programmables, alphanumériques ou à écran graphique à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante (Circulaire n°99-186, 16/11/1999).

Tout autre matériel est interdit.**Aucun document autorisé.****Documents à rendre avec la copie :**

L'ANNEXE 1 (pages 9/12, 10/12) et l'ANNEXE 2 (pages 11/12, 12/12) sont fournies en double exemplaire, un exemplaire étant à remettre avec la copie ; l'autre servant de brouillon éventuel



*Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Le sujet se compose de 12 pages, numérotées de 1/12 à 12/12.*

- **Chimie industrielle** : page 2 à page 5
- **Physique industrielle** : page 6 à page 12

Étude d'une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM)

La production d'ordures ménagères a doublé en quarante ans et continue de croître de 1 % par an. Chaque personne produit aujourd'hui en moyenne 360 kg de déchets par an.

Fin 2009, 130 usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) sont recensées en France, dont la plupart avec récupération de l'énergie : production d'électricité et/ou chauffage urbain.

74 % de nos déchets sont incinérables mais cette étape doit être le dernier maillon d'une chaîne après le recyclage et la méthanisation (production de biogaz), ce qui réduit la quantité de déchets à incinérer. En effet, la valorisation des déchets ne doit pas occulter les problèmes environnementaux causés par l'incinération : les gaz issus de la combustion des déchets contiennent différents polluants comme les dioxines, les métaux, le chlorure d'hydrogène, les oxydes de soufre et d'azote...

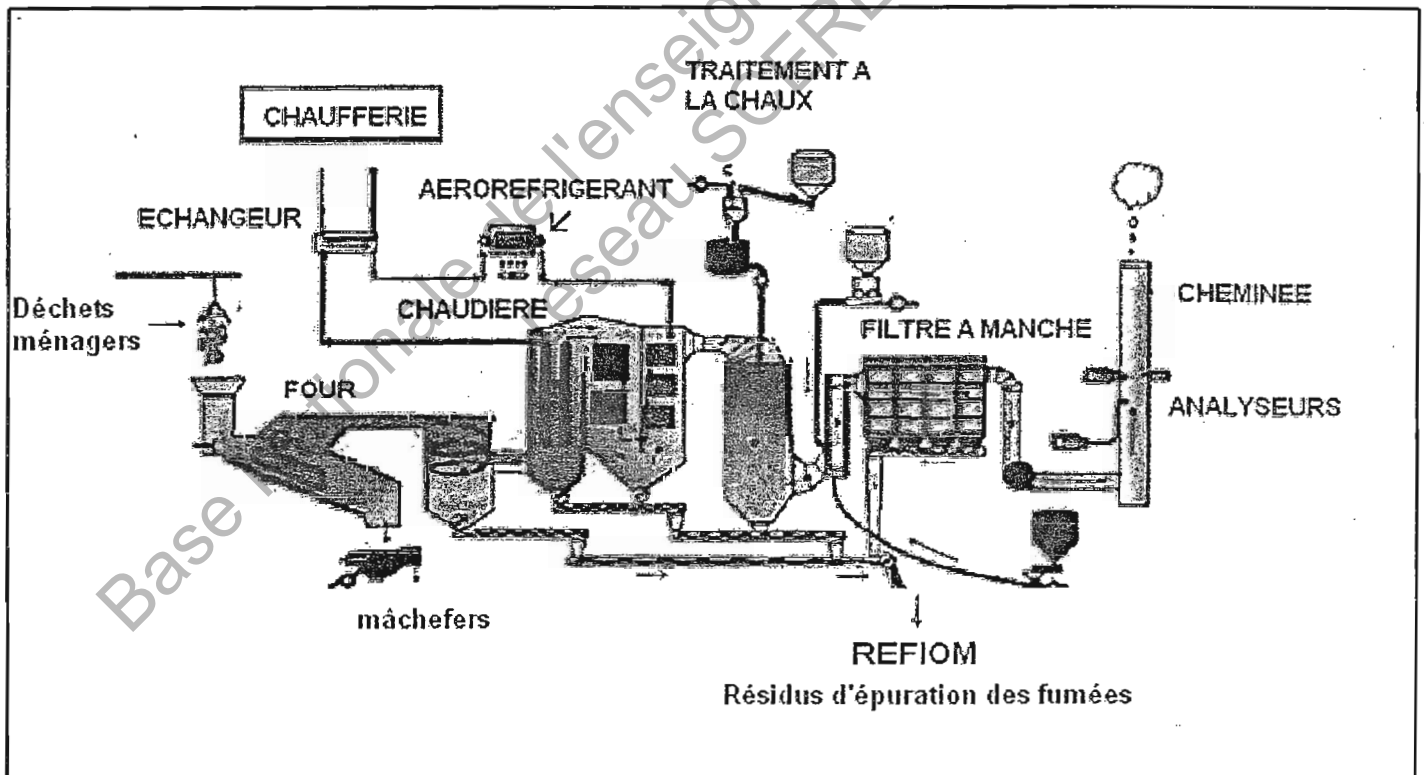


Schéma 1 : Schéma de principe d'une UIOM avec valorisation énergétique

Premier exercice : Combustion des matières plastiques : exemple du PVC**Données :**

- Enthalpies standards de formation d'espèces gazeuses à 298 K :

$$\Delta H_f^0 (\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}) = -242 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^0 (\text{CO}_2 \text{ vap}) = -393 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^0 (\text{HCl}_{\text{vap}}) = -92,0 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^0 (\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_{\text{vap}}) = +37,0 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

- Équivalence calorie / joule : 1 calorie = 4,18 joules.
- Ordre de grandeur du pouvoir calorifique inférieur (PCI) de quelques matières plastiques :

Matières plastiques	PCI Produit pur (MJ.kg ⁻¹)
<i>Polychlorure de vinyle (PVC)</i>	20
<i>Polyéthylène (PET)</i>	45
<i>Polypropylène (PP)</i>	44
<i>Polystyrène (PS)</i>	46
<i>Polyéthylène (PE)</i>	46

Les matières plastiques occupent une place prépondérante dans la vie quotidienne et sont désormais présentes partout. Aussi est-il primordial de savoir quel est leur comportement lorsqu'elles sont portées à haute température ou brûlées.

Par exemple, le **polychlorure de vinyle (PVC)** est un polymère qu'on retrouve dans de nombreux objets de la vie courante : les cartes bancaires, les jouets gonflables, les articles de bureau, de sport et de loisir...

1. L'éthylène C_2H_4 réagit avec le dichlore Cl_2 pour donner un composé chloré (réaction 1). Puis ce dérivé chloré, par élimination d'une molécule de chlorure d'hydrogène HCl , produit le chlorure de vinyle $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ (réaction 2). La réaction 3 conduit au polychlorure de vinyle (PVC).

1.1. Écrire la formule semi-développée de l'éthylène C_2H_4 .

1.2. Écrire l'équation de la réaction 1, réaction d'addition du dichlore Cl_2 sur l'éthylène.

1.3. Comment nomme-t-on la réaction 3 qui permet d'obtenir le PVC à partir du monomère $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$?

2. Dans le four, un apport d'air permet d'assurer la combustion complète des déchets. L'équation de la combustion du chlorure de vinyle est :



- 2.1. L'enthalpie de combustion est supposée indépendante de la température. Calculer la variation d'enthalpie de cette combustion, tous les corps étant pris à l'état gazeux. En déduire le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du chlorure de vinyle, en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.
- 2.2. Sachant que dans le PVC, le monomère est répété environ 1 500 fois, évaluer le PCI du PVC en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ puis en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
On donne la masse molaire du PVC : $M(\text{PVC}) = 94,0 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$.
3. Pour utiliser sans dommage et de façon optimale le four, on dispose d'un « diagramme de four » présentant l'énergie dégagée lors de l'incinération en fonction du PCI des déchets et de la quantité brûlée en 1 heure. (**Voir diagramme de l'annexe 1**)
- 3.1. La capacité d'incinération du four est de 3,3 tonnes de déchets par heure. Le PCI moyen des déchets ménagers est de $8\,400 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- 3.1.1. Calculer le PCI des déchets ménagers en $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- 3.1.2. En utilisant le diagramme de four donné en **annexe 1**, déterminer l'énergie correspondante fournie en 1 heure, en Gigacalories par heure. (On notera ce point 1)
- 3.2. En déduire la puissance du four en kW dans ces conditions de fonctionnement.
- 3.3. Dans l'hypothèse d'un tri sélectif défaillant, la quantité de matières plastiques incinérée augmente par rapport à la moyenne habituelle. Le PCI des déchets ménagers peut alors augmenter de 25 %.
- 3.3.1. Calculer la nouvelle valeur du PCI des déchets ménagers.
- 3.3.2. Placer sur le diagramme de l'**annexe 1**, le point 2 correspondant à cette nouvelle valeur, la masse de déchets incinérée restant égale à 3,3 t/h.
- 3.3.3. Le four peut-il fonctionner en permanence sans dommage dans ce cas ? On s'aidera de l'**annexe 1** pour y répondre.

Deuxième exercice : Traitement des fumées

Données :

- Produit de solubilité de l'hydroxyde de calcium : $K_s = 5,5 \cdot 10^{-6}$.
- Masses molaires : $M(\text{Ca}) = 40,1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
 $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(\text{Cl}) = 35,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Produit ionique de l'eau à 25 °C : $K_e = 1,0 \cdot 10^{-14}$
- Volume molaire dans les conditions normales de température et de pression (CNTP) (0°C et 1 bar) : $V_m = 22,4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Le lait de chaux est utilisé en traitement d'effluents industriels comme réactif de neutralisation des acides. Il permet également de précipiter les métaux lourds présents dans l'effluent.

1. Le lait de chaux est une solution saturée d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui contient les ions $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$ et $\text{HO}^{-}(\text{aq})$ ainsi que le solide $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ en suspension. L'équilibre de dissociation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le lait de chaux est :



- 1.1. La solubilité s d'un composé solide est la quantité maximale que l'on peut dissoudre dans un litre d'eau.
 - 1.1.1. En étudiant l'équilibre de dissociation de $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$, exprimer les concentrations molaires des ions, $[\text{Ca}^{2+}(\text{aq})]$ et $[\text{HO}^-(\text{aq})]$ en fonction de la solubilité s .
 - 1.1.2. Exprimer le produit de solubilité K_s en fonction de la solubilité s .
 - 1.1.3. Calculer la solubilité s de l'hydroxyde de calcium en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.
 - 1.2. En déduire les concentrations molaires des ions $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$ et $\text{HO}^-(\text{aq})$ dans la solution saturée de lait de chaux.
2. On considèrera dans la suite de l'exercice que la concentration en ion $\text{HO}^-(\text{aq})$ de la solution saturée de lait de chaux est de $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.
- 2.1. Qu'appelle-t-on solution basique ?
 - 2.2. Vérifier que l'hydroxyde de calcium est bien une solution basique en calculant son pH.
 - 2.3. Le chlorure d'hydrogène est un des composés responsables des pluies acides. Ecrire l'équation de dissolution de ce gaz dans l'eau.
3. Le lait de chaux sert à neutraliser les acides apportés par les fumées selon la réaction :
- $$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{HO}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$$
- 3.1. Calculer la quantité de matière en H_3O^+ apportée par 1 Nm^3 (Normal m^3) de gaz HCl pris à 0°C et 1 bar).
 - 3.2.
 - 3.2.1. Quelle quantité de matière d'ions hydroxyde HO^- sera nécessaire pour neutraliser 1 Nm^3 de gaz HCl ?
 - 3.2.2. En déduire la quantité de matière de $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ puis la masse nécessaire.
 - 3.3. Le débit des gaz de combustion arrivant dans le réacteur est de $6\,800 \text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$. La teneur en acide de ces gaz est en moyenne de $1\,400 \text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$. Calculer la masse de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nécessaire pour neutraliser l'acide produit par l'incinération des déchets en une journée, pour un fonctionnement permanent.

Premier exercice : Étude de l'alimentation en lait de chaux

À la sortie du four, les gaz de combustion sont aspirés vers un réacteur pour une première épuration.

On fait le choix ici du procédé dit « semi-humide ». C'est un mode de traitement chimique qui consiste à mélanger les gaz avec un réactif liquide (du lait de chaux par exemple) pour neutraliser les polluants acides contenus dans les gaz.

Le réacteur est une tour de forme cylindrique avec en partie haute l'arrivée centrale des gaz pollués. Le lait de chaux est injecté en haut de la tour, sous l'arrivée des gaz, par un atomiseur rotatif dans lequel le lait de chaux est pulvérisé en fines gouttelettes.

Le mélange gaz-chaux est ensuite évacué vers un dépoussiéreur (filtre à manche). Voir le schéma de principe ci-dessous.

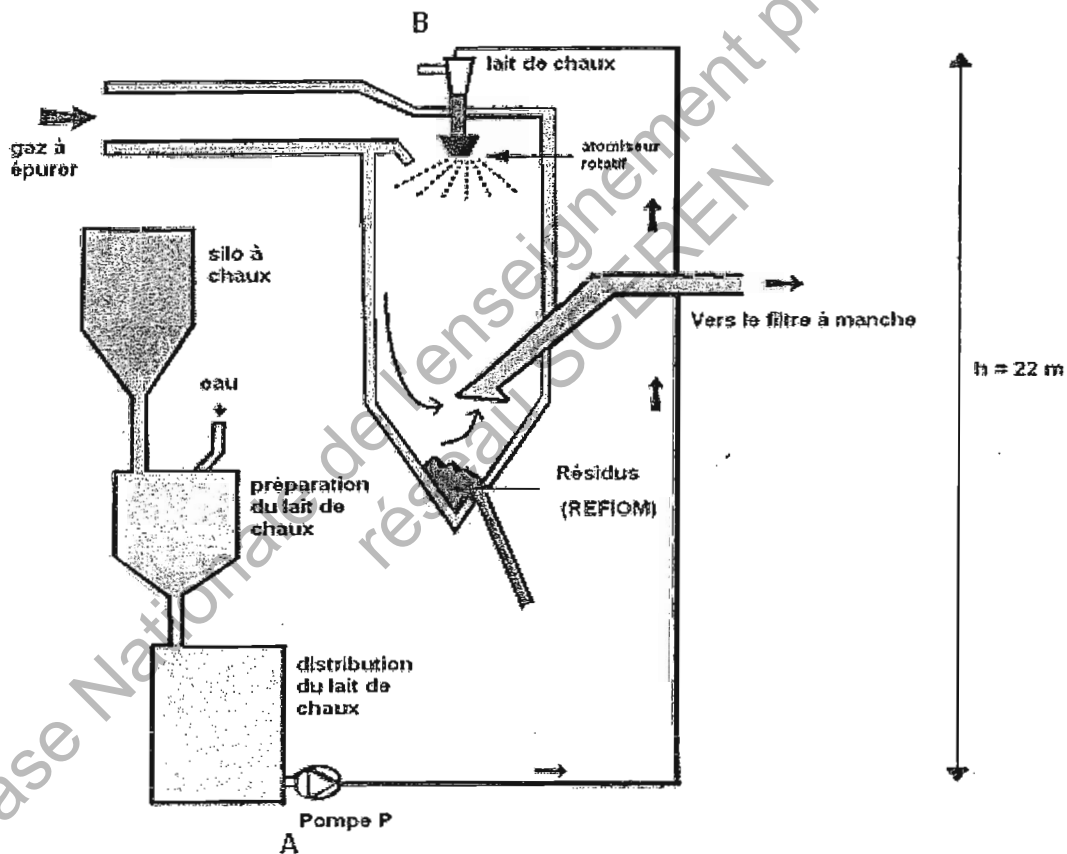


Schéma 2 : Schéma de principe du procédé semi humide

Données :

- Diamètre intérieur de la conduite d'alimentation en lait de chaux : $D = 120 \text{ mm}$
- Longueur de la conduite : $L = 33 \text{ m}$
- Masse volumique du lait de chaux à 11% en masse : $\rho = 1\,030 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Pression à l'entrée de la pompe : $p_A = 3,0 \text{ bar}$
- Viscosité dynamique du lait de chaux à 11% : $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Nombre de Reynolds : $R_e = \frac{\rho V D}{\eta}$
- La pesanteur : $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

CAE3CI

- Coefficient de perte de charge en régime laminaire : $\lambda = \frac{64}{Re}$
- Coefficient de perte de charge en régime turbulent : $\lambda = 0,316 \times Re^{-0,25}$
- Perte de charge (en mètre) : $\Delta H = \lambda \frac{L V^2}{2gD}$
- Puissance utile d'une pompe : $P_{\text{utile}} = \text{HMT} Q_m \rho$ où Q_m est le débit massique du fluide et HMT la hauteur manométrique totale de la pompe.

1. Le lait de chaux est un composé très corrosif. Quel type de précaution doit-on prendre lors du choix des conduites ?
2. Pourquoi doit-on maintenir une agitation constante dans la cuve de distribution de lait de chaux ?
3. À la concentration utilisée, soit environ 11 % en masse, le lait de chaux se comporte comme un fluide newtonien. Le débit moyen du lait de chaux dans la conduite est de $Q_v = 10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.
 - 3.1 Calculer le débit volumique en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
 - 3.2 En déduire la vitesse moyenne V de circulation du fluide.
4. Déterminer la valeur du nombre de Reynolds. En déduire le régime d'écoulement du lait de chaux dans la conduite.
5. Calculer le coefficient de perte de charge λ , puis en déduire les pertes de charge ΔH et conclure.
6. Le débit étant faible, on négligera les pertes de charge dans le circuit d'alimentation en lait de chaux. Quelle doit être la HMT de la pompe pour que la pression en B soit de 2,0 bars ?
7. La HMT étant égale à 12 m, calculer la puissance fournie au fluide par la pompe.

Deuxième exercice : Valorisation énergétique

L'énergie dégagée par la combustion des déchets au sein du four est récupérée au niveau des chaudières à l'aide d'un circuit fermé d'eau surchauffée sous une pression de 20 bars. Cet échange de chaleur conduit à la production d'eau destinée au chauffage urbain par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur.

Réseau
urbain

Réseau
"usine"

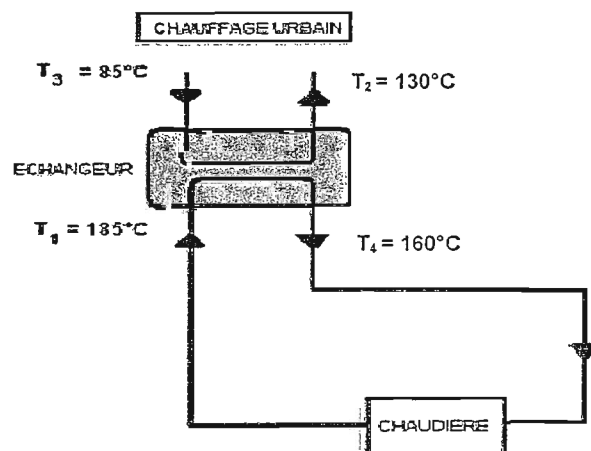


Schéma 3

Données :

- Capacité thermique massique de l'eau surchauffée : $C_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Capacité thermique massique de la vapeur d'eau : $C_{\text{vap}} = 1,41 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- PCI du fioul : $9,96 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{L}^{-1}$
- Débit volumique de l'eau surchauffée dans le réseau « usine » : $Q_v = 110 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1. Choix énergétique

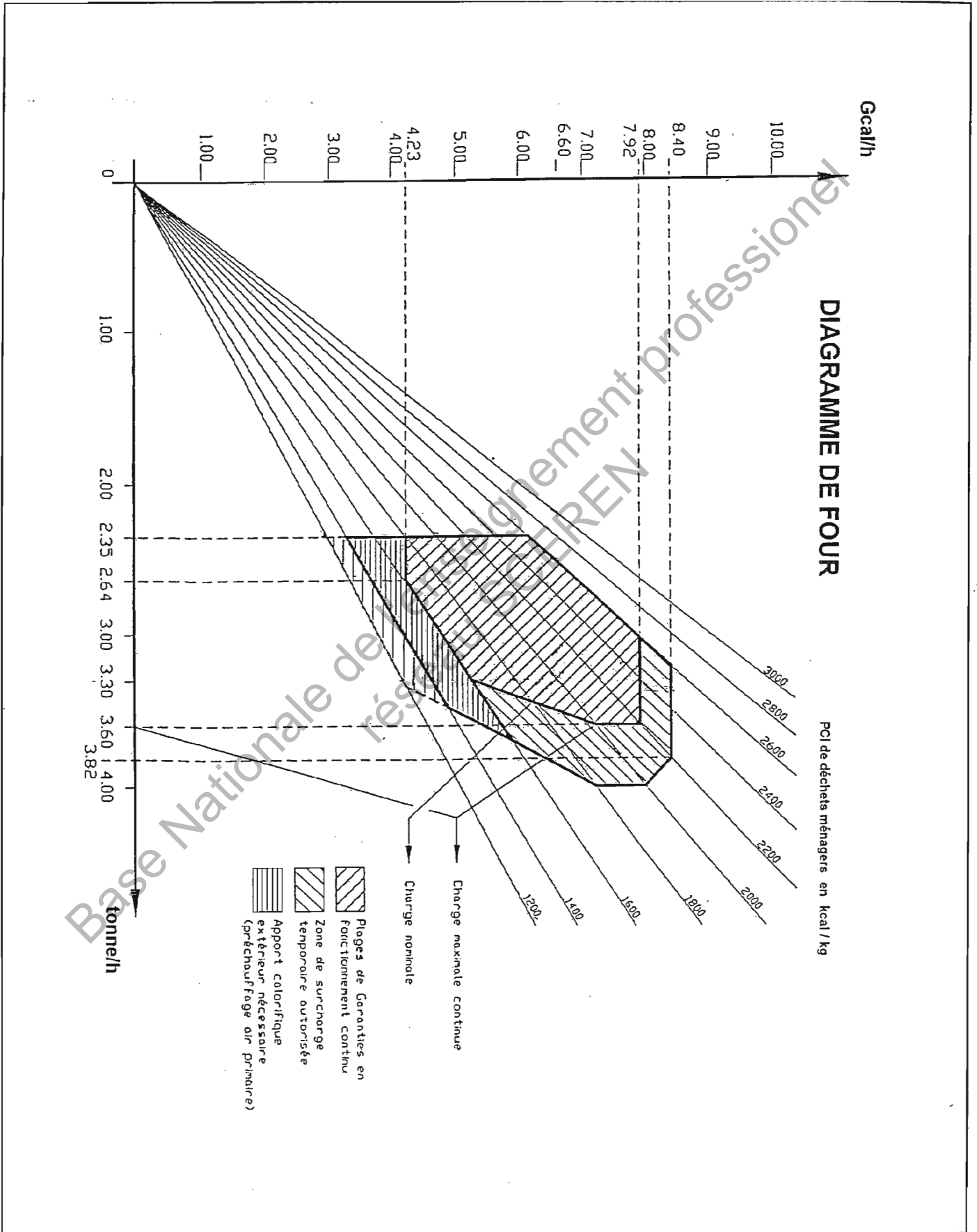
- 1.1. Pourquoi avoir choisi comme fluide de l'eau surchauffée plutôt que de la vapeur ?
- 1.2. Compléter le diagramme de phase (**courbe a**) de l'**annexe 2**. Vous indiquerez sur votre copie le nom des changements de phase ①, ② et ③, lorsque la température augmente.
- 1.3. En utilisant la **courbe b** de l'**annexe 2**, déterminer la température de l'eau surchauffée. Pourquoi cette valeur ne devra-telle pas être atteinte ?
- 1.4. Chaque année, 57 000 000 kW·h sont ainsi fournis sous forme de chauffage urbain. Quel volume de fioul a-t-on ainsi économisé ?

2. L'échangeur de chaleur utilisé est un échangeur à tubes fonctionnant à co-courant de puissance $P = 9 \text{ MW}$, de surface S et de coefficient de transmission thermique $K = 2\,500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

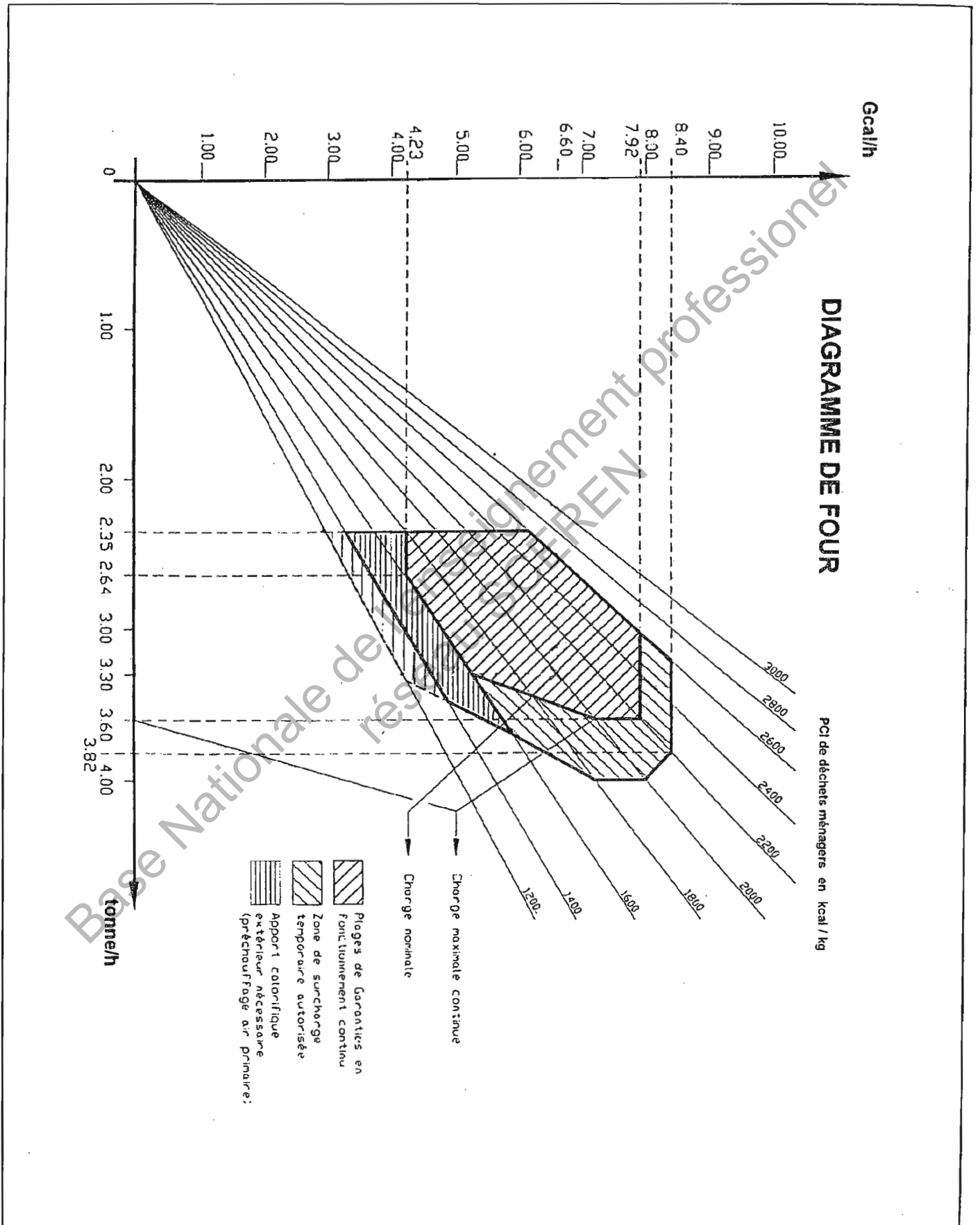
- 2.1. Soient $\Delta T_{\text{entrée}}$, différence des températures côté entrée et ΔT_{sortie} , différence des températures côté sortie. Identifier $\Delta T_{\text{entrée}}$ et ΔT_{sortie} en fonction des températures indiquées sur le schéma, puis calculer leur valeur.
- 2.2. Déterminer la valeur de ΔT . On rappelle l'expression de ΔT , moyenne logarithmique de la température :
$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\text{entrée}} - \Delta T_{\text{sortie}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{entrée}}}{\Delta T_{\text{sortie}}}}$$
- 2.3. En déduire la surface S de l'échangeur.

3. Quel dispositif peut servir à éviter une surchauffe dans le circuit de la chaudière. On s'aidera du **schéma 1 page 2** pour y répondre.

ANNEXE 1

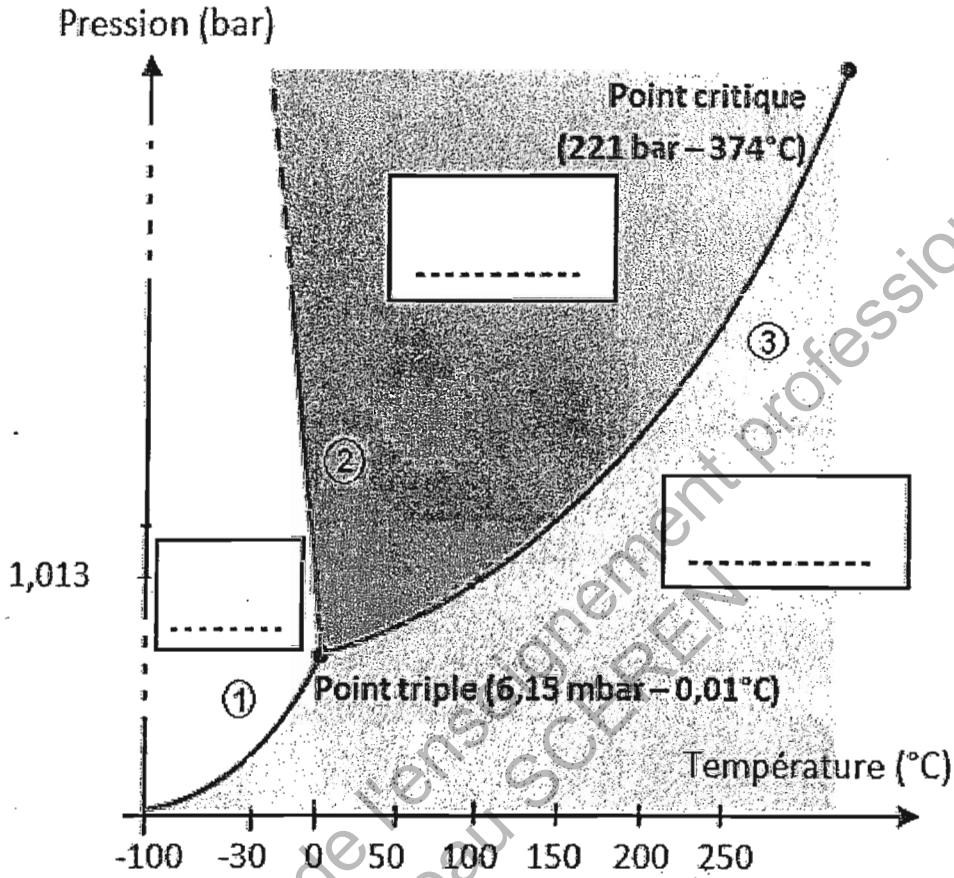


ANNEXE 1

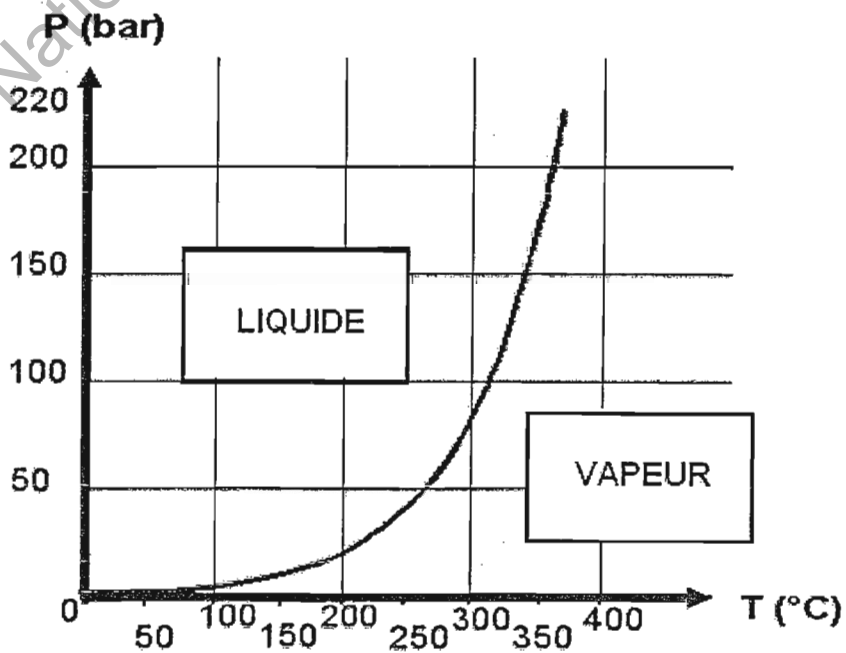


ANNEXE 2

Courbe a : Diagramme de phase de l'eau

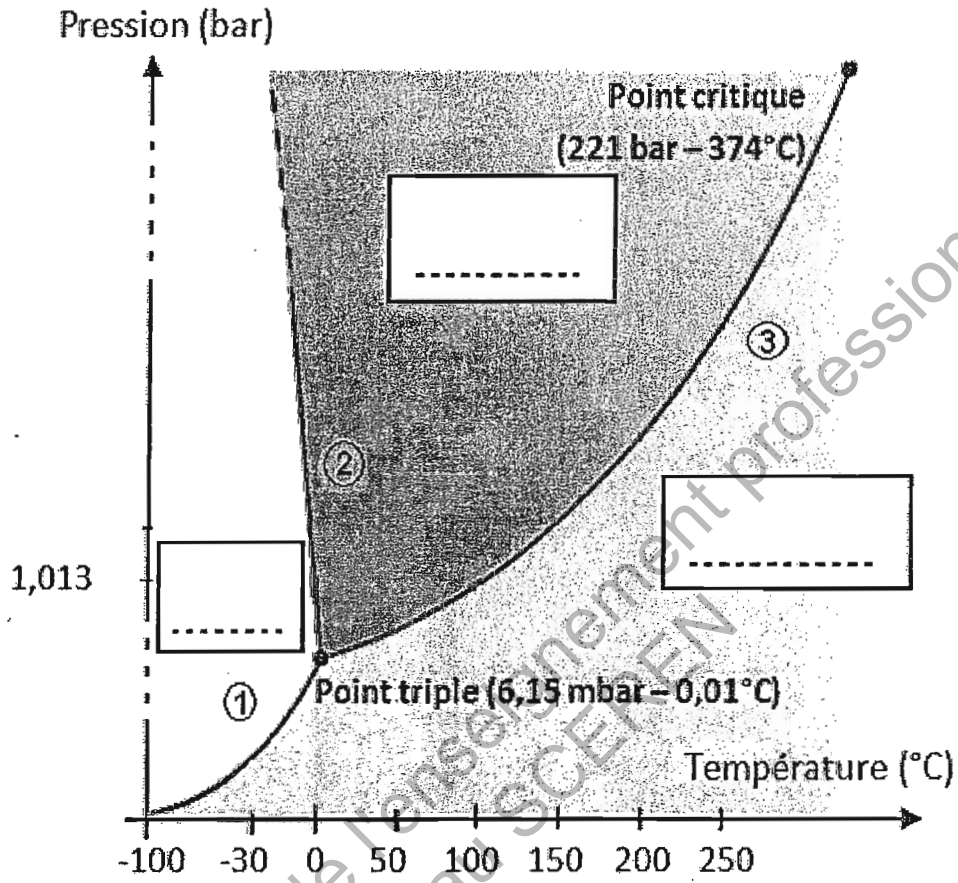


Courbe b : $P = f(T)$



ANNEXE 2

Courbe a : Diagramme de phase de l'eau



Courbe b : $P = f(T)$

