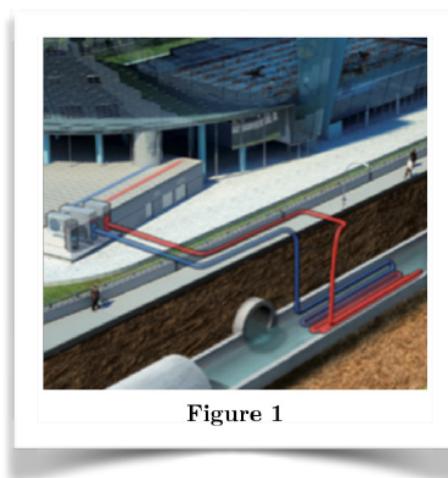


Classe :
Nom :
Prénom :

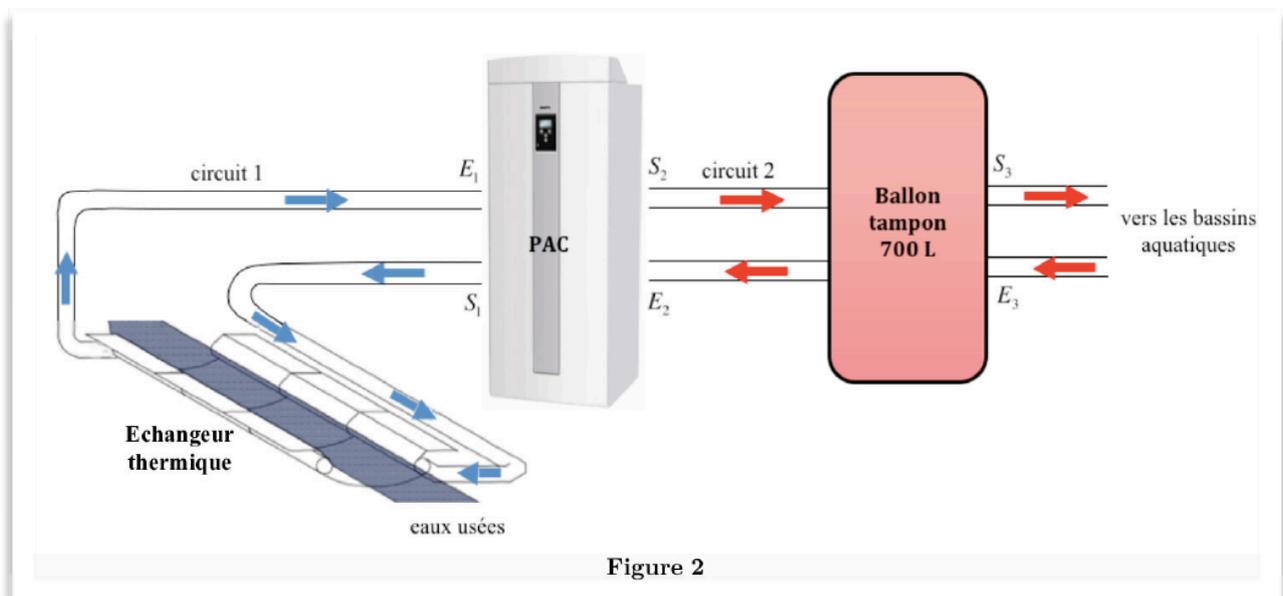
Devoir Surveillé n°9

Exercice n°1

On étudie ici le procédé Degrés Bleus de la société Suez. Ce dernier consiste en la récupération d'une partie de l'énergie thermique des eaux usées (véhiculées dans les collecteurs d'égouts), dont la température peut varier approximativement entre 15°C et 23°C suivant le mois de l'année. Un échangeur thermique est ainsi directement placé dans les collecteurs comme illustré sur la figure 1. Ce système a été mis en place pour la première fois au centre aquatique de Levallois-Perret en 2010.

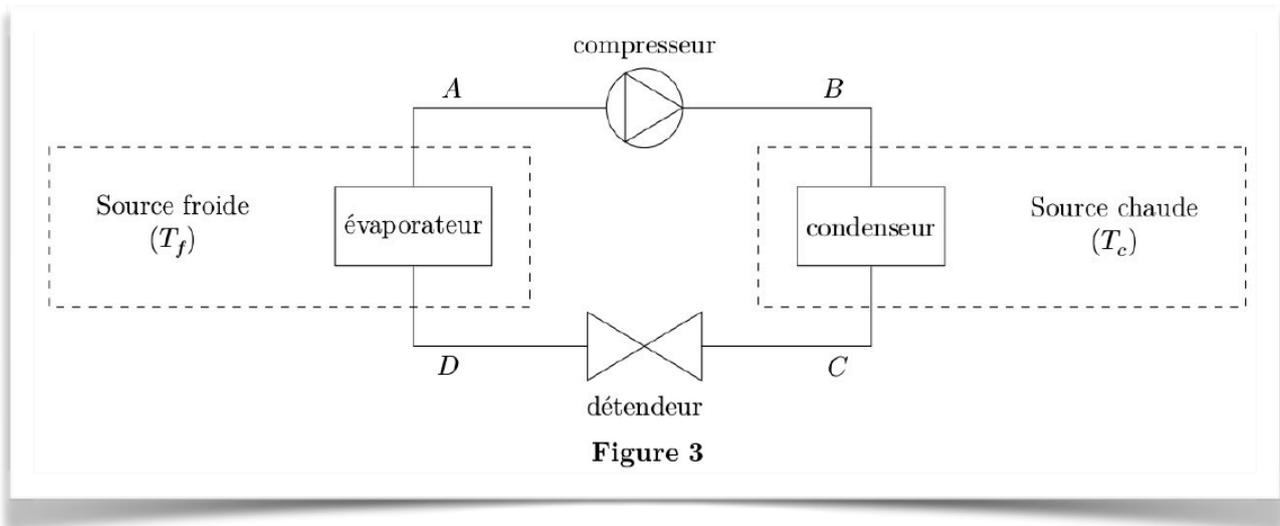


Le schéma de principe de l'installation est représenté sur la figure 2. Il est constitué de trois modules : l'échangeur thermique placé dans les collecteurs d'eaux usées, la pompe à chaleur (PAC) et le ballon tampon d'eau chaude de 700 L.



I. Étude d'une pompe à chaleur idéale

Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur est rappelé figure 3. Le cycle est supposé réversible. Au contact de la source froide de température T_f , le fluide se vaporise complètement. Il est ensuite comprimé par le compresseur et se liquéfie dans le condenseur, au contact de la source chaude de température T_c . Il est ensuite détendu dans le détendeur.



Pour transfert thermique, le fluide reçoit une énergie Q_f de la part de la source froide et une énergie Q_c de la part de la source chaude. Le fluide reçoit un travail W de la part du compresseur. Le détendeur est calorifugé et ne présente pas de pièce mobile (détente isenthalpe).

- Définir l'efficacité (ou COP, coefficient de performance) η de la pompe à chaleur. Préciser le signe des grandeurs algébriques Q_f , Q_c et W .

- Établir l'expression de η en fonction de T_f et T_c .

3. Calculer η pour $T_f = 13^\circ\text{C}$ et $T_c = 44^\circ\text{C}$. Commenter la valeur obtenue.

II. Étude de la pompe à chaleur du centre aquatique

On admet que, pour un écoulement stationnaire unidimensionnel d'un système à une entrée et une sortie, le premier principe s'écrit :

$$(h_s + e_{ms}) - (h_e + e_{me}) = w_u + q \quad (1)$$

où h_e , h_s , e_{me} et e_{ms} correspondent respectivement aux enthalpie et énergie mécanique massiques en entrée et sortie du dispositif, q et w_u le transfert thermique et travail utile (autre que les force de pression) massiques échangés entre l'entrée et la sortie. Ce résultat sera établi en deuxième année.

On néglige dans la suite toute variation d'énergie cinétique ou d'énergie potentielle, soit $e_{me} = e_{ms}$.

L'équation (1) s'écrit alors :

$$h_s - h_e = w_u + q \quad (2)$$

On donne en annexe, dans le diagramme des frigoristes, le cycle réversible de la PAC du centre aquatique de Levallois-Perret pour un fonctionnement nominal typique en période froide (janvier-février). Le fluide frigorigène est du tétrafluoroéthane R134a. Les isothermes sont graduées en $^\circ\text{C}$. Les isochores sont repérées par v en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Les isentropiques sont marquées avec s en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Les isotitres x sont graduées sur l'échelle des abscisses.

La puissance prélevée à la source froide est : $\frac{\delta Q_f}{dt} = 60 \text{ kW}$.

1. Identifier et justifier la nature des quatre transformations $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 5$, $5 \rightarrow 6$ et $6 \rightarrow 1$ du cycle.

2. Déterminer pour chacun de ces quatre états (1, 2, 5 et 6) la température, la pression et l'état physique du système.

3. Quel est l'intérêt de la transformation $7 \rightarrow 1$?

4. Quel est l'intérêt de la transformation $4 \rightarrow 5$?

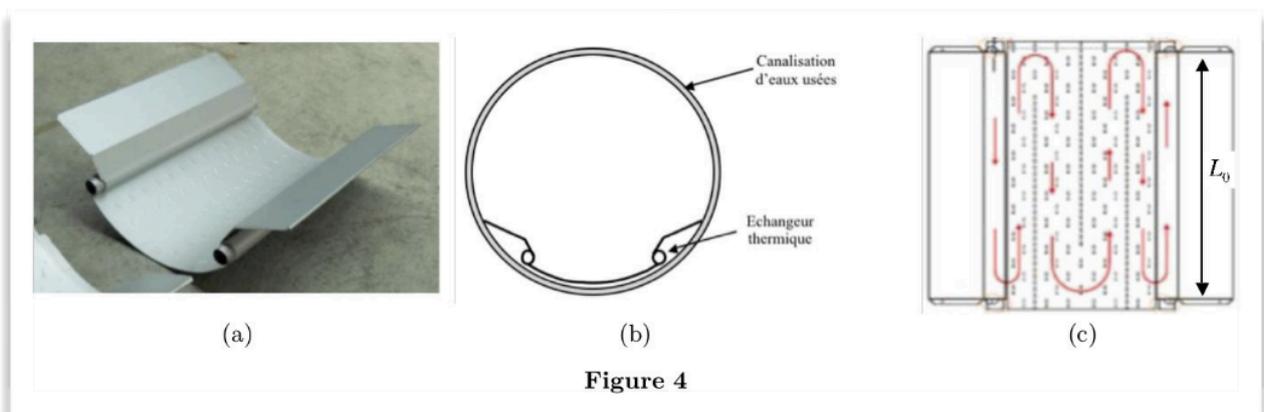
5. Sachant que la puissance prélevée à la source froide est de $P_f = 60 \text{ kW}$, calculer le débit massique D_m de fluide caloporteur de la pompe à chaleur.

6. Calculer l'efficacité théorique η_{th} de la pompe.

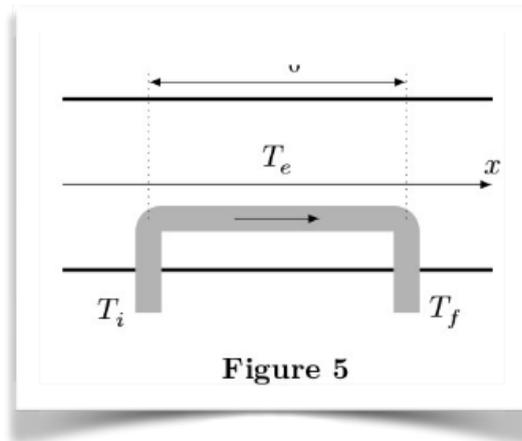
7. La puissance réellement fourni au compresseur est $P = 19 \text{ kW}$. Calculer l'efficacité réelle de la pompe à chaleur et conclure quant au calcul de la question précédente.

III. Dimensionnement simplifié de l'échangeur du collecteur

L'échangeur repose sur le fond de la conduite cylindrique d'eaux usées, comme indiqué figure 4.b. La figure 4.a présente un tronçon d'échangeur d'un mètre de long. On réalise ainsi un module échangeur de longueur L_0 par mise en série de L_0 tronçons d'un mètre de long.



Après mise en série des tronçons, le fluide circule dans un module selon le schéma technique de la figure 4.c (vue du dessus du module). Il se réchauffe progressivement au contact des eaux usées, de température T_e supposée uniforme. On supposera pour simplifier que l'échange thermique se fait uniquement sur la partie incurvée ce qui correspond, d'après la figure 4.c, à deux allers-retours soit 4 passages du fluide sur la longueur du tronçon considéré. Le module est donc équivalent théoriquement au schéma de la figure 5.



Les hypothèses suivantes sont formulées :

- l'écoulement est supposé parfait, permanent, unidimensionnel, de variation d'énergie cinétique négligeable. On note D_{m0} le débit massique dans un module, $c_e = 4180 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ la capacité thermique massique du fluide assimilé à de l'eau.
 - La température du fluide T ne dépend que de x . Le fluide entre à la température T_i et ressort à la température T_f .
 - Le fluide, à la température $T(x)$, reçoit, par unité de longueur, une puissance thermique linéique $P_{th} = \alpha(T_e - T(x))$ avec $\alpha = 143 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
1. En considérant une petite partie du module comprise entre les abscisses x et $x + dx$, montrer que l'équation différentielle vérifiée par $T(x)$ s'écrit :

$$\frac{dT}{dx} + \frac{T}{l_c} = \frac{T_e}{l_c}$$

avec $l_c = \frac{c_e D_m}{\alpha}$.

2. Montrer que $T(x)$ s'écrit sous la forme $T(x) = T_e + Ae^{\frac{x}{l_c}}$. Exprimer A en fonction des données du problème.

3. Quelle est la signification physique de l_c ?

On impose $T_e = 16^\circ\text{C}$, $T_i = 12,5^\circ\text{C}$ et $T_f = 15,5^\circ\text{C}$. Ces températures correspondent au fonctionnement hivernal envisagé. En tenant compte des pertes thermiques dans les canalisations du circuit 1 (figure 2), les températures T_{E1} et T_{S1} du circuit 1 en entrée et sortie de l'évaporateur de la pompe à chaleur sont alors $T_{E1} = 15^\circ\text{C}$ et $T_{S1} = 13^\circ\text{C}$.

4. L'évaporateur étant supposé parfaitement calorifugé, déterminer l'expression analytique du débit massique D_{m1} de l'eau dans le circuit 1 en fonction de $\frac{\delta Q_f}{dt}$, c_e , T_{S1} et T_{E1} . Calculer numériquement D_{m1} .

5. L'installation est constituée de $N_m = 45$ modules indépendant (donc correspondant à une association parallèle), posés les uns à la suite des autres sur une longueur totale L . Exprimer D_{m0} en fonction de D_{m1} et N_m .

6. Exprimer L en fonction de l_c , T_i , T_f , T_e et N_m .

7. Calculer numériquement L et conclure. Le calcul d'une installation constituée d'un seul module aurait donné une longueur d'échangeur équivalente. Pourquoi cette solution n'a pas été retenue ?

Exercice n°2

L'acier inoxydable est un alliage majoritairement composé de fer, de moins de 1,2% (en masse) de carbone et contenant au moins 10,5% (en masse) de chrome nécessaire pour garantir la formation d'une couche passive résistante à la corrosion. En effet, au contact du dioxygène, une couche d'oxyde de chrome va se former à la surface du matériau. Cette couche protège alors l'acier de la corrosion et a la particularité de s'auto-régénérer.

Dans un souci de simplification et de modélisation, l'acier inoxydable étudié ici sera uniquement composé de fer, de carbone et de chrome avec une teneur massique en chrome de 16,1% .

Données :

- numéro atomique du molybdène $Z = 42$
- $M(C) = 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M(\text{Fe}) = 55,6 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
- masse volumique de l'acier : $\rho_{\text{acier}} = 8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- nombre d'Avogadro : $N_a = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- $E^\circ(\text{O}_{2(g)} / \text{H}_2\text{O}) = 1,23 \text{ V}$
- $E^\circ(\text{H}_2\text{O} / \text{H}_{2(g)}) = 0 \text{ V}$
- à 298 K , on prendra : $\frac{RT}{F} \ln(x) = 0,06 \ln(x)$
- $E^\circ(\text{Cr}^{2+} / \text{Cr}_{(s)}) = -0,91 \text{ V}$

Le chrome existe sous plusieurs formes isotopiques dont les plus abondantes sont données dans le tableau ci-dessous.

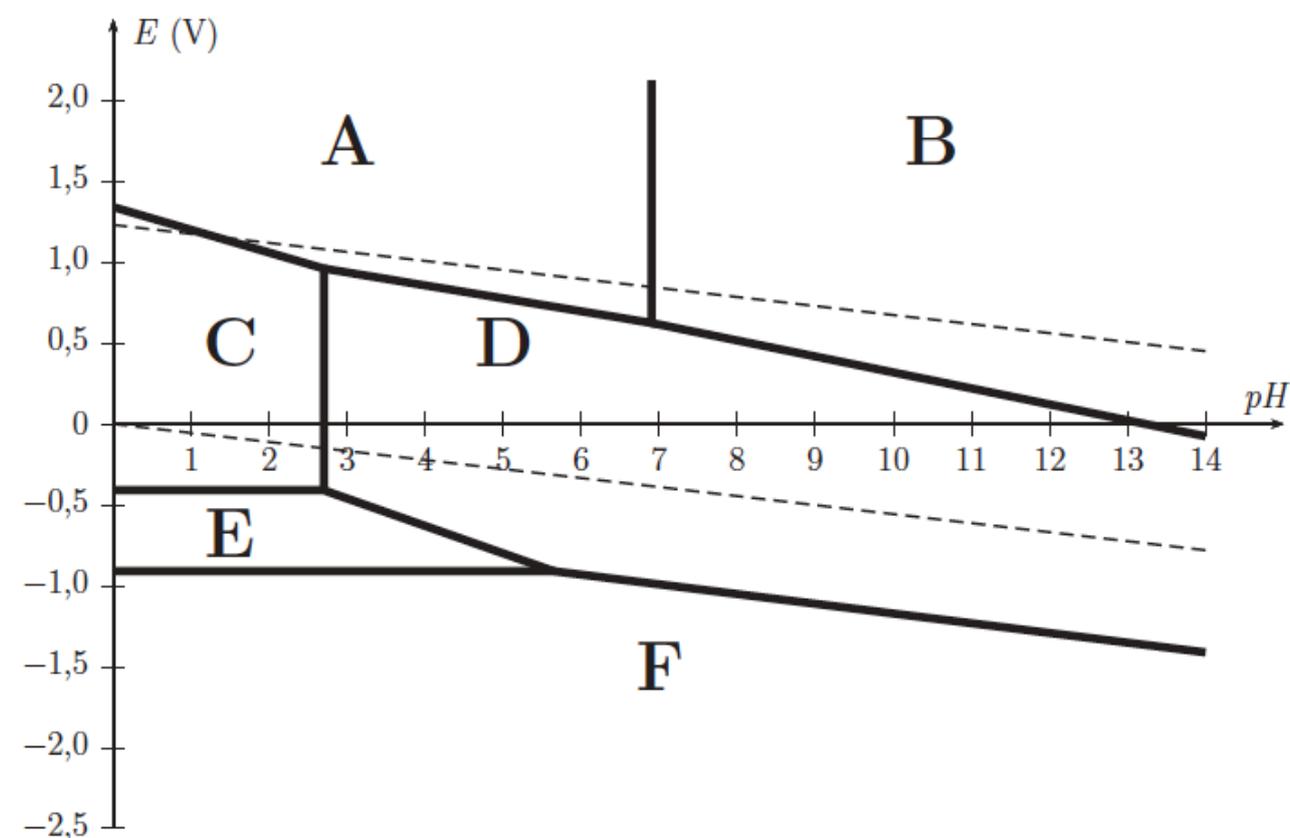
Isotope	^{50}Cr	^{52}Cr	^{53}Cr	^{54}Cr
Abondance naturelle (%)	4,35	83,79	9,50	2,36
Masse atomique (u.m.a)	49,946	51,941	52,941	53,939

1. Donner la composition du noyau atomique de chacun des isotopes cités.

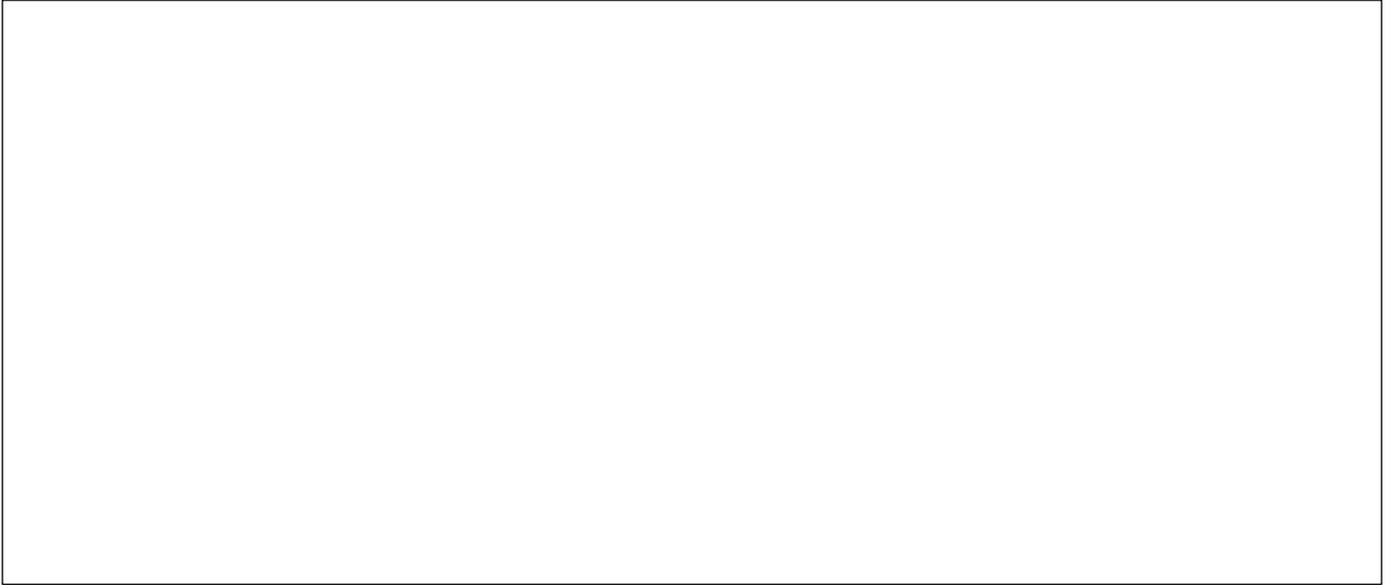
2. Calculer la masse atomique du chrome à l'état naturel. En déduire la valeur de la masse atomique molaire du chrome naturel en *u.m.a* sachant que l'unité de masse atomique représente $\frac{1}{12}$ de la masse d'un atome de carbone $^{12}_6\text{C}$.



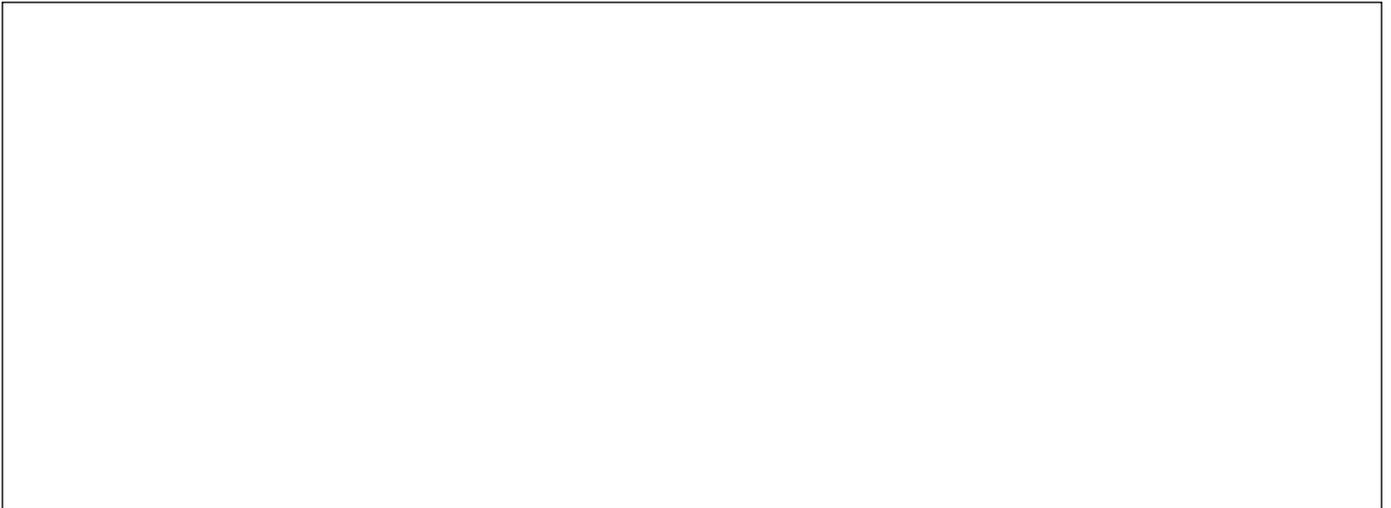
La figure ci-dessous présente un diagramme simplifié potentiel-pH du chrome à 298 K . La concentration des espèces dissoutes étant égales à C_{tra} , ce dernier fait intervenir six espèces : $\text{Cr}_{(s)}$, $\text{Cr}_{(aq)}^{2+}$, $\text{Cr}_{(aq)}^{3+}$, $\text{Cr}_2\text{O}_{3(s)}$, $\text{Cr}_2\text{O}_{7(aq)}^{2-}$ et $\text{CrO}_{4(aq)}^{2-}$.



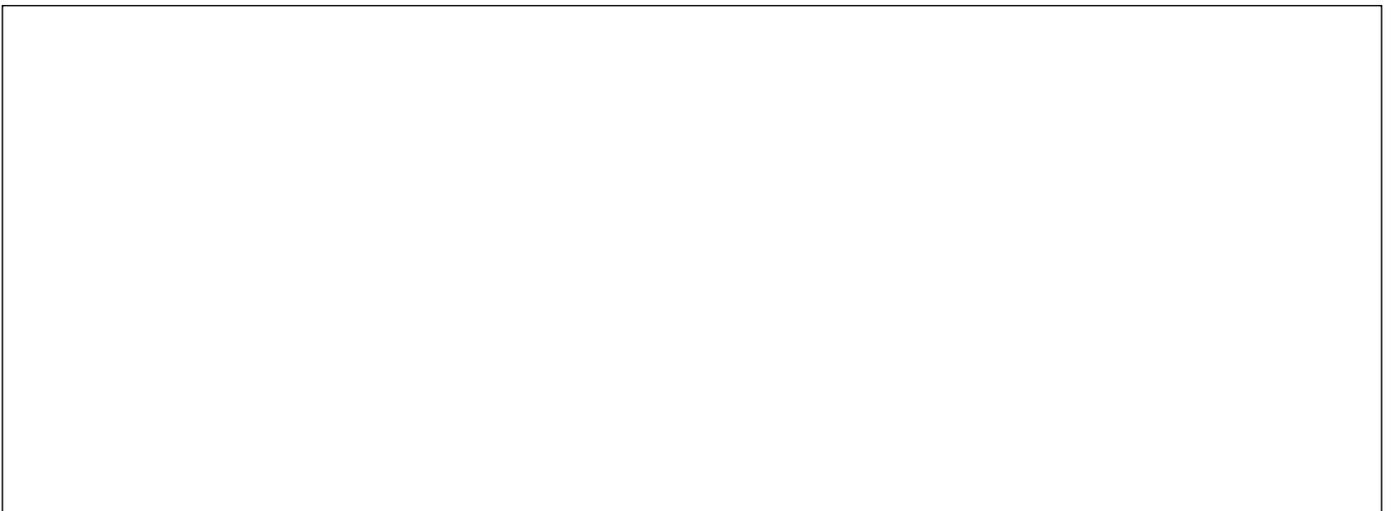
3. Indiquer pour chacun des domaines du diagramme l'espèce chimique correspondante. Préciser s'il s'agit d'un domaine de prédominance ou d'existence.



4. Déterminer la concentration C_{tra} pour le diagramme ci-dessus.



5. Établir la valeur du potentiel standard du couple (Cr^{3+} / Cr^{2+}) .



6. Déterminer la valeur du pK_s de $\text{Cr}_2\text{O}_{3(s)}$.

7. Montrer que les frontières (D/A) et (D/F) sont parallèles.

8. Sur ce diagramme ont été portées deux droites en pointillés délimitant le domaine de stabilité de l'eau. Rappeler les couples (ox/red) pour l'eau. Établir les équations de ces deux droites.

9. Discuter du comportement du chrome métallique tout d'abord dans une eau désaérée, puis dans une eau aérée (contenant du dioxygène).

Une couche de passivation dite native se forme toujours à la surface d'un acier inoxydable. Lorsque celui-ci est en présence d'une solution dont la valeur du pH est égale à 6, l'acier inoxydable résiste toujours très bien à l'oxydation.

10. Quel oxyde de chrome est responsable de la passivation ? Quelle est la conséquence pour l'acier inoxydable étudié ?

Annexe

