

# Devoir en Temps Limité n°3 de Physique-Chimie

Le samedi 19 octobre 2024

**Thèmes** : Thermodynamique ; Diffusion thermique ; Chimie générale

**Niveau** : E3A/CCINP

## Consignes

Ce devoir est constitué de **trois exercices** indépendants, et contient **11 pages** dont une annexe à rendre **avec la copie** (page 11).

Il est demandé de porter le plus grand soin à la rédaction, c'est-à-dire :

- dans la forme : résultats **encadrés**, copies aérées ;
- dans le fond : justification des réponses, clarté de l'expression, concision des réponses.

**Tout résultat non justifié ne sera pas évalué**

**Calculatrice autorisée**

# I Conditionnement d'air d'une voiture

Dans tout le problème, on considérera que l'accélération de pesanteur vaut  $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$ . On rappelle la constante des gaz parfaits  $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ .

## I.1 Modélisation du régime permanent

Pour le confort et la sécurité des passagers d'une voiture (la respiration des passagers changerait la composition de "l'air" qui deviendrait moins riche en dioxygène, ce qui favorise l'endormissement du conducteur), on doit renouveler l'air intérieur et empêcher aussi refroidissement ou réchauffement par rapport à une situation normale dans laquelle l'intérieur du véhicule reste à une température consigne uniforme et constante égale à  $T_C = 293 \text{ K}$ .

On assimile l'automobile (représentée schématiquement ci-dessous) à un parallélépipède creux de hauteur  $H = 1,5 \text{ m}$ , de largeur  $\ell = 1,75 \text{ m}$  et de longueur  $L = 4,0 \text{ m}$ , réalisée en partie avec un matériau 1 hybride d'épaisseur  $e_1 = 10 \text{ cm}$ , de conductivité thermique  $\lambda_1 = 0,10 \text{ S.I.}$  et en partie en verre d'épaisseur  $e_2 = 2,0 \text{ mm}$  et de conductivité thermique  $\lambda_2 = 1,2 \text{ S.I.}$

On peut simplifier le modèle en supposant que les vitres occupent une hauteur  $d = 0,50 \text{ m}$  des parois verticales. Le toit, le sol et les parties basses des parois verticales sont constitués du matériau 1. On néglige les effets de bord et/ou la conduction par les coins.

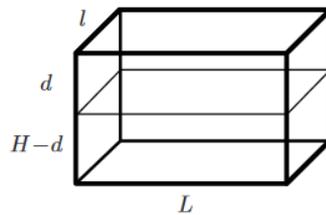


FIGURE 1 – Modèle schématique d'une voiture.

**Q1.** Rappeler la loi de Fourier en définissant les grandeurs utilisées. Par analyse dimensionnelle, préciser quelle est l'unité de la conductivité thermique  $\lambda_i$ .

On considère un morceau de paroi de surface  $s$ , d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$ . La température est supposée ne dépendre que de la variable position sur la normale à cette paroi notée  $Oz$ .

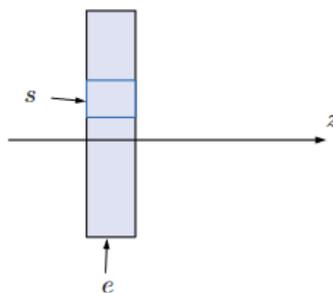


FIGURE 2 – Modèle d'une paroi de voiture.

**Q2.** Établir, en régime permanent, le lien entre la différence des températures de part et d'autre de la paroi  $\Delta T = T_{ext} - T_{int}$  et le flux thermique (ou puissance thermique)  $\Phi$  qui traverse, de l'extérieur vers l'intérieur, une surface  $s$  de paroi d'un matériau de conductivité thermique  $\lambda$ . En déduire la résistance thermique de cet élément de paroi en fonction de  $s$ ,  $e$  et  $\lambda$ .

- Q3.** À quelle situation physique correspond une association en série de résistances thermiques ? À quelle situation physique correspond une association en parallèle de résistances thermiques ?
- Q4.** Donner l'expression des résistances thermiques des parties suivantes du véhicule en fonction des données nécessaires :
- $R_1$  résistance thermique du toit (le sol de la voiture possède la même résistance thermique) ;
  - $R_2$  résistance thermique des parties latérales en matériau 1 (de hauteur  $H - d$ ) ;
  - $R_3$  résistance thermique de toutes les vitres (partie latérale de hauteur  $d$ ).
- Q5.** Faire un schéma électrique équivalent de la voiture et en déduire sa résistance thermique totale  $R_v$ .
- Q6.** Calculer la valeur numérique de  $R_v$  et celle de  $R_3$  (partie vitrée). Comparer la puissance thermique totale perdue par la voiture et celle traversant les vitres. Commenter.
- Q7.** En réalité, le rapport entre l'écart de température  $\Delta T = T_{ext} - T_{int}$  et le flux thermique total  $\Phi$  entrant dans la voiture par les parois est différent du résultat précédent. Ceci est dû à l'existence d'un transfert thermique de type conducto-convectif caractérisé par un flux surfacique  $\Phi_{cc}$  de valeur absolue  $|\Phi_{cc}| = h(T_p - T_{ext})$ , avec  $T_p$  la température de la paroi du véhicule.  
Exprimer, pour le plafond, la résistance qui doit être rajoutée à  $R_1$  en appelant  $h$  le coefficient de la loi de NEWTON entre le matériau 1 et l'air. Commenter. Faire le nouveau schéma électrique équivalent.
- Par la suite, on prendra  $G = \frac{1}{R_v} = 150 \text{ W.K}^{-1}$  pour le rapport  $\frac{\Phi}{\Delta T}$ .
- On suppose que :
- l'appareil de conditionnement de l'air de la voiture permet de refroidir l'habitacle en été, de le réchauffer en hiver et de renouveler l'air en même temps ;
  - la pression est toujours la même à l'extérieur et à l'intérieur et est égale à la pression standard  $p = p^0 = 1,010^5 \text{ Pa}$  ;
  - et l'habitacle est maintenu à la température de consigne  $T_C = 293 \text{ K}$ .
- Q8.** Chacun des  $n$  passagers dégage une puissance thermique  $p = 75 \text{ W}$ . Exprimer la puissance  $P_1$  fournie par le conditionneur en fonction de  $n$ ,  $p$ ,  $G$  et  $\Delta T = T_{ext} - T_{int}$ .
- Q9.** Calculer les deux valeurs de  $P_1$  pour  $n = 4$  passagers, en été  $T_{ext} = 303 \text{ K}$  ou en hiver  $T_{ext} = 263 \text{ K}$ . Commenter le signe. Pour quelle température extérieure n'y aurait-il pas besoin de conditionnement ? L'ordre de grandeur vous paraît-il vraisemblable ?

## I.2 Régime transitoire

Lorsque les passagers montent dans le véhicule, la température intérieure est égale à la température extérieure  $T_{ext} = 263 \text{ K}$  (hiver). Dès leur installation dans le véhicule, les passagers règlent le conditionneur au maximum, ce dernier fournit alors une puissance  $P_{1,max}$  dont on se propose de déterminer la valeur pour que la température de consigne  $T_C$  soit atteinte en  $\Delta t = 2,0 \text{ min}$ .

On rappelle que les passagers fournissent une puissance  $p = 75 \text{ W}$  par personne et que la conductance thermique de l'ensemble de la voiture vaut  $G = \frac{1}{R_v} = 150 \text{ W.K}^{-1}$ .

L'atmosphère intérieure au véhicule est caractérisée par une capacité thermique totale  $C$ .

On se place dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS).

- Q10.** Montrer que la température de l'air du véhicule vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_\infty}{\tau}$$

en explicitant les expressions de  $\tau$  et  $T_\infty$  en fonction de  $R_v$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $T_{ext}$  et  $P_{1,max}$ .

- Q11.** Proposer un schéma électrique équivalent.
- Q12.** Représenter l'allure de l'évolution au cours du temps de la température de l'habitacle.

- Q13.** Résoudre l'équation de la question **Q10.** et déterminer l'expression littérale de  $P_{1,max}$  en fonction de  $R_v$ ,  $\tau$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $T_{ext}$ ,  $T_c$  et  $\Delta t$  pour que la température de consigne soit atteinte en une durée  $\Delta t$ .
- Q14.** Évaluer l'ordre de grandeur de la quantité de matière ( $q$  en mol) de l'air contenu dans la voiture en supposant que l'air occupe 50% du volume intérieur. L'air est considéré comme un gaz parfait de masse molaire  $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$  et caractérisé par des capacités thermiques molaires isobare  $C_p$  et isochore  $C_v$  dont le rapport vaut  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$ . On fera l'application numérique à la température  $T_c = 293 \text{ K}$ .
- Q15.** Rappeler le lien entre énergie interne et enthalpie d'une mole de gaz parfait. En déduire la valeur de  $C_p - C_v$  et l'expression de  $C_p$  en fonction de  $R$  et  $\gamma$ .
- Q16.** Évaluer la valeur numérique de la capacité  $C$  des  $q$  moles d'air puis celle de  $P_{1,max}$ . Commenter.
- Q17.** Déterminer, sans calculs excessifs et en réutilisant les résultats des questions précédentes, la puissance  $P_{1,min} < 0$  que devrait avoir un climatiseur pour que  $T$  atteigne  $T_c$  en  $\Delta t = 2,0 \text{ min}$  également en été ( $T_{ext} = 303 \text{ K}$ ) avec  $n = 4$  passagers.
- Q18.** Quelles critiques pourriez-vous faire à ce modèle simpliste et quelles améliorations du modèle proposeriez-vous ?

## II Cogénération par centrale à vapeur

Le principe de la cogénération au gaz naturel est de produire à la fois de l'électricité et de l'eau chaude. On utilise pour cela une centrale à vapeur et on récupère de l'énergie mécanique dans sa turbine et de l'énergie thermique au niveau du condenseur. On s'intéresse dans un premier temps au fonctionnement général d'une telle centrale sans prendre en compte la valorisation de l'énergie dissipée dans le condenseur. On étudie ensuite la récupération d'énergie thermique.

Le cycle de base d'une centrale à vapeur parcourue par de l'eau est schématisé figure 3. Il consiste essentiellement en une chaudière où le combustible est brûlé générant ainsi de la vapeur d'eau surchauffée (2 → 3) qui est ensuite détendue dans une turbine à vapeur dont l'arbre fournit le travail moteur (3 → 4). La vapeur d'eau sortant de la turbine est totalement liquéfiée dans un condenseur (4 → 1) avant qu'une pompe ne lui redonne la pression de chaudière (1 → 2). Le refroidissement du condenseur est assuré par une source froide externe.

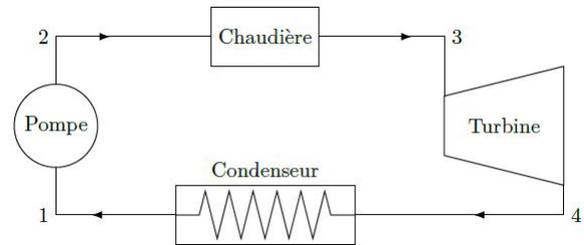


FIGURE 3 – Schéma d'une centrale à vapeur

On supposera les transformations subies par le système dans la turbine et dans la pompe comme étant adiabatique et réversible. On négligera le travail de la pompe devant le travail de la turbine :  $|W_p| \ll |W_t|$ .

Le fluide est en écoulement stationnaire avec un débit massique  $D_{m1} = 1.0 \text{ kg s}^{-1}$ . On négligera les variations de vitesse et d'altitude du fluide. On donne l'expression de l'entropie  $S$  en  $\text{J K}^{-1}$  d'une masse donnée d'eau liquide à la température  $T$  :

$$S(T) = S(T_0) + C_{\text{eau}} \ln \left( \frac{T}{T_0} \right)$$

avec  $C_{\text{eau}}$  la capacité thermique de l'eau en  $\text{J K}^{-1}$ . On rappelle la capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_{\text{eau}} = 4.18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

### II.1 Description du cycle thermodynamique

On considère que le fluide circulant au cours d'un cycle reçoit les transferts thermiques  $Q_c$  et  $Q_f$  respectivement des sources chaude de température  $T_c$  et froide de température  $T_f$  ainsi que le travail mécanique de la turbine  $W_t$ .

- Q1. Préciser, en justifiant, les signes de  $Q_c$ ,  $Q_f$  et  $W_t$ .
- Q2. Pourquoi ce cycle est qualifié de cycle à combustion externe ? Quel avantage présente-t-il ? Donner un exemple de cycle à combustion interne.
- Q3. Exprimer le rendement  $r$  de la machine en fonction  $Q_c$  et  $W_t$ .
- Q4. En déduire l'expression du rendement  $r$  en fonction de  $T_f$ ,  $T_c$ ,  $Q_c$  et  $S_c$  l'entropie créée au cours d'un cycle.
- Q5. En déduire l'expression du rendement de CARNOT  $r_c$ . Effectuer l'application numérique avec  $T_f = 300 \text{ K}$  et  $T_c = 603 \text{ K}$ .

### II.2 Diagramme des frigoristes

- Au point 1 en sortie de condenseur, l'eau est à l'état liquide saturant, sous une faible pression à la température  $T_f$ .
- La pompe (1 → 2) comprime l'eau à environ 128 bar. La température  $T$  reste sensiblement constante pendant cette compression. Le point 2 se situe à l'intersection de l'isotherme  $T = 300 \text{ K}$  (environ  $30^\circ \text{C}$ ) et de l'isobare  $P = 128 \text{ bar}$ .
- Dans la chaudière (2 → 3), l'eau sous pression est portée à haute température, l'échauffement comportant les deux étapes :
  - chauffage du liquide à pression constante ;
  - évaporation de l'eau jusqu'à la dernière goutte de liquide.
- L'évolution dans la turbine (3 → 4) est modélisée par une détente adiabatique réversible.

- Q6.** Compléter le diagramme  $\log(P) = f(h)$  (cf. annexe), en représentant le cycle parcouru par le fluide et en indiquant les étapes 1, 2, 3 et 4.
- Q7.** Calculer le transfert thermique massique  $q_c$  reçu par le fluide dans la chaudière.
- Q8.** Calculer le travail massique  $w_t$  reçu de la part de la turbine.
- Q9.** Justifier la légitimité de l'hypothèse  $|w_p| \ll |w_t|$ .
- Q10.** Préciser la nature de la transformation  $\rightarrow 1$ . Quel est l'intérêt de cette étape ?
- Q11.** Établir l'expression de la fraction massique de vapeur  $x_{v4}$  au point 4 en fonction de  $h_1$ ,  $h_4$  et  $\Delta h_v(T_f)$ , enthalpie massique de vaporisation à la température  $T_f$ . Faire l'application numérique.
- Q12.** Exprimer les variations d'entropie au cours de chaque transformation du système  $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$ ,  $\Delta S_{2 \rightarrow 3}$ ,  $\Delta S_{3 \rightarrow 4}$  et  $\Delta S_{4 \rightarrow 1}$  en fonction de la masse du système  $m$ , la capacité thermique massique de l'eau  $c_{\text{eau}}$ ,  $T_f$ ,  $T_c$ ,  $\Delta h_v(T_f)$ ,  $\Delta h_v(T_c)$  et  $x_{v4}$ .
- Q13.** En déduire l'expression de  $x_{v4}$  en fonction de  $\Delta h_v(T_f)$ ,  $\Delta h_v(T_c)$ ,  $c_{\text{eau}}$ ,  $T_f$  et  $T_c$ .
- Q14.** Quelle puissance mécanique  $P_t$  reçoit la turbine ? Faire l'application numérique. Commenter le résultat.

### II.3 Récupération de l'énergie thermique

On s'intéresse ici à l'énergie thermique que l'on peut récupérer au niveau du condenseur afin de produire de l'eau chaude pour alimenter une installation de chauffage domestique (figure 4).

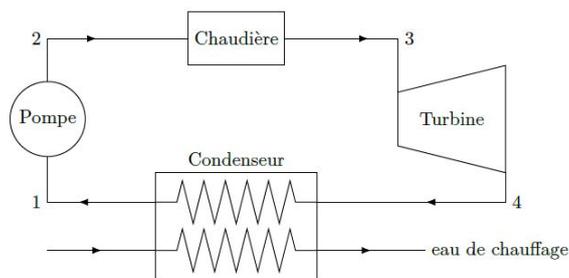


FIGURE 4 – Centrale à vapeur avec récupération de l'énergie thermique dans le condenseur

Le condenseur est un échangeur thermique que l'on suppose parfaitement calorifugé, schématisé figure 5.

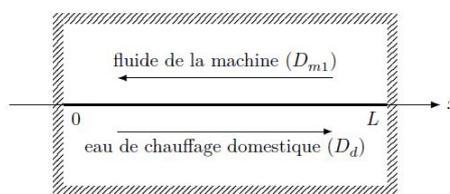


FIGURE 5 – Schéma du condenseur

On suppose les fluides en écoulement stationnaire. On puise l'eau de chauffage domestique à la température  $T_d(x=0) = 5.0^\circ\text{C}$ , avec un débit  $D_d$ . Elle ressort de l'échangeur à la température  $T_d(x=L) = 60^\circ\text{C}$ .

- Q15.** Calculer la puissance thermique reçue par l'eau de chauffage domestique  $P_d$ .
- Q16.** Calculer le débit massique  $D_d$  que doit posséder l'eau de chauffage domestique.
- Q17.** Exprimer puis calculer  $e_{\text{cogen}}$ , l'efficacité de la machine utilisant le principe de cogénération. Commenter.

### III Étude d'un minerai d'uranium

L'uranium est un élément chimique découvert en 1789 à partir de roches provenant d'un gisement en République Tchèque. Nommé en l'honneur de la planète Uranus, il fut isolé pour la première fois en 1841 par le chimiste Eugène-Melchior Péligot. L'uranium naturel est composé de trois principaux isotopes :  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{234}\text{U}$ . Avec l'essor du nucléaire dans la production d'électricité, l'industrie de l'extraction de l'uranium et du traitement du minerai d'uranium a connu un développement exceptionnel. Cette activité, qui était pratiquement inexistante jusqu'au début des années 1940 (l'uranium n'était alors qu'un sous-produit des industries du vanadium et du radium), est devenue une grande industrie hydrométallurgique : aucune branche du traitement des minerais n'a connu un développement aussi rapide jusqu'à nos jours. Nous allons aborder une partie des différentes étapes de l'industrie de l'uranium permettant d'obtenir du combustible nucléaire, utilisé dans les centrales, à partir du minerai d'uranium (Figure 6).

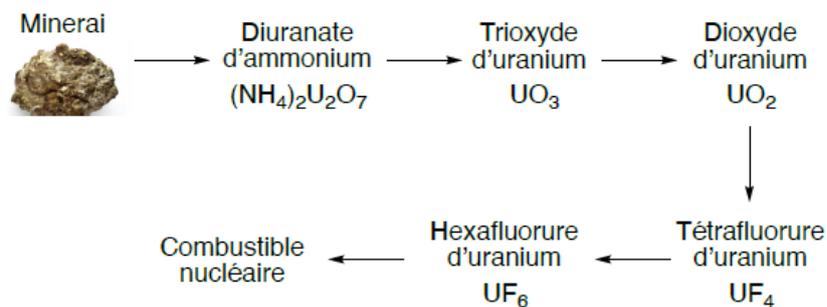


FIGURE 6 – Production du combustible nucléaire d'uranium

#### III.1 Étude du dioxyde d'uranium

L'uranium est un élément lourd, de numéro atomique  $Z = 92$ , appartenant au groupe des actinides de la classification périodique.

**Q1.** À l'aide des abondances des isotopes de l'uranium fournies dans les données, évaluer la masse molaire de l'uranium naturel.

Principal minerai d'uranium, le dioxyde d'uranium ou uraninite ( $\text{UO}_2$ ), de couleur noire, est un minerai cubique. C'est un cristal ionique constitué d'ions  $\text{U}^{4+}$  et  $\text{O}^{2-}$ . L'uraninite cristallise de la manière suivante : les ions  $\text{U}^{4+}$  dans un réseau cubique à faces centrées et les ions  $\text{O}^{2-}$  occupent tous les sites tétraédriques.

**Q2.** Représenter la maille cristalline correspondante.

**Q3.** Déterminer numériquement le paramètre de maille  $a$ .

**Q4.** Indiquer le nombre de chacun des ions par maille, déterminer la coordinence entre ions de charge opposée pour les ions  $\text{U}^{4+}$  d'une part et  $\text{O}^{2-}$  d'autre part. Calculer la compacité.

**Q5.** Exprimer de manière littérale puis numérique la masse volumique de l'uraninite.

### III.2 Obtention du trioxyde d'uranium

Le minerai uranifère est dissous dans de l'acide nitrique, et une oxydation en ion U(VI) est réalisée, permettant l'obtention des ions uranyle  $\text{UO}_2^{2+}$ . Il est intéressant à ce stade de titrer les ions uranyle obtenus afin de contrôler la quantité d'uranium extraite du minerai (Document 1).

#### Document 1. Titration des ions uranyles $\text{UO}_2^{2+}$ .

Étape 1. À une solution contenant de 1 à 25 mg de sel d'uranyle dans 20 mL d'acide sulfurique à  $2 \text{ mol L}^{-1}$ , sont ajoutées quelques gouttes d'une solution de phénosafranine à 0,025% (indicateur d'oxydoréduction dont la forme réduite est incolore et la forme oxydée rouge). Une solution de Cr(II) (préparée juste avant l'emploi par réduction d'une solution de chlorure de chrome(III) à  $0.5 \text{ mol L}^{-1}$  par de l'amalgame de zinc en présence d'acide chlorhydrique à  $0.1 \text{ mol L}^{-1}$ ) est ajoutée goutte à goutte jusqu'au virage de l'indicateur du rouge à l'incolore, puis un léger excès est ajouté.

Étape 2. Pendant quelques instants, de l'air est mis à barboter jusqu'au nouveau virage au rouge de l'indicateur.

Étape 3. Enfin un dosage par une solution de permanganate de potassium est réalisé.

Afin de pouvoir étudier le principe de ce dosage, il est tout d'abord nécessaire d'analyser les diagrammes E-pH de l'uranium et du chrome (Figure 7).

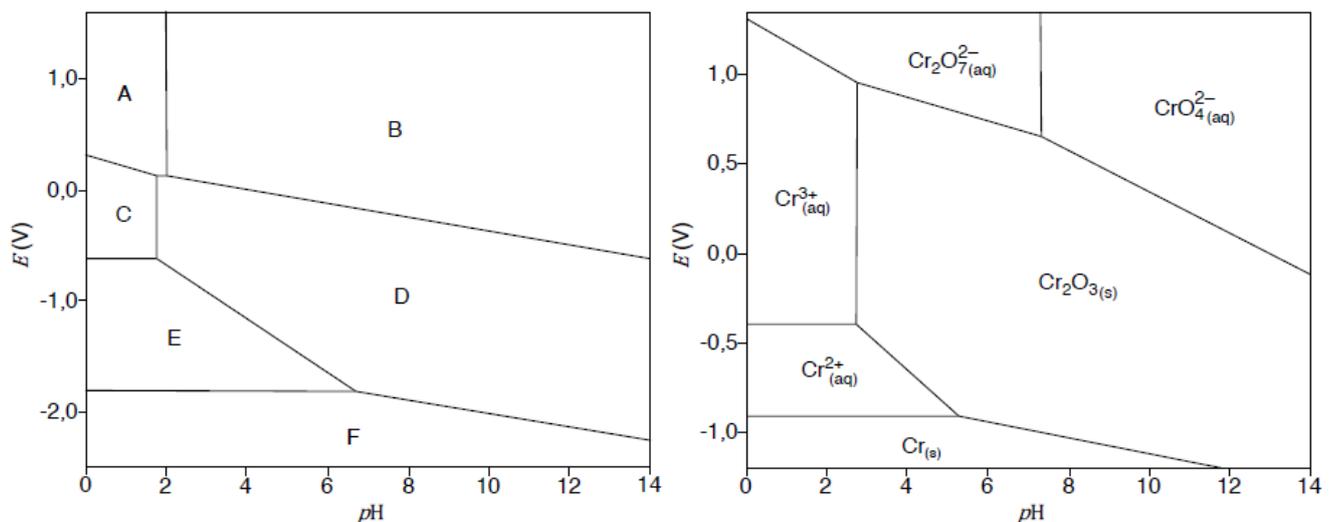


FIGURE 7 – Diagrammes E-pH de l'uranium (à gauche) et du chrome (à droite).

Les diagrammes ont été tracés à 298 K en solution aqueuse, en prenant aux frontières les concentrations des espèces en solution égales à  $1 \text{ mol L}^{-1}$  et en se limitant aux espèces suivantes pour l'uranium :  $\text{U}(s)$ ,  $\text{U}^{3+}_{(aq)}$ ,  $\text{U}^{4+}_{(aq)}$ ,  $\text{UO}_2^{2+}_{(aq)}$ ,  $\text{U}(\text{OH})_3(s)$ ,  $\text{U}(\text{OH})_4(s)$  et  $\text{UO}_2(\text{OH})_2(s)$ .

- Q6.** Pour le diagramme E-pH de l'uranium, attribuer les différents domaines de prédominance ou d'existence (numérotés de A à F, Figure 7) parmi les différentes espèces considérées. Justifier.
- Q7.** À l'aide de la formule de Nernst, calculer la pente de la frontière entre les domaines A et C.
- Q8.** Déterminer les pH des frontières A/B et C/D à partir d'un calcul fondé sur des valeurs de constantes thermodynamiques.
- Q9.** À la lecture des deux diagrammes E-pH (Figure 7), quelles sont les espèces chimiques obtenues à partir des ions uranyle et des ions chrome(II) lors de l'étape 1 du protocole de dosage? (Document 1; aucune équation de réaction n'est demandée en guise de justification)

Il faut ensuite éliminer les ions chrome(II) versés en excès, ce qui est fait lors de l'étape 2 grâce au dioxygène de l'air (Document 1).

- Q10.** Quelle transformation subissent les ions chrome(II) au cours de cette étape (aucune équation de réaction n'est demandée) ?
- Q11.** Écrire la réaction de titrage qui a lieu lors de l'étape 3 (Document 1), en considérant que les ions chrome ne sont pas impliqués.
- Q12.** Calculer la constante d'équilibre thermodynamique  $K^\circ$  de cette réaction à 25 °C. On pourra exprimer le résultat sous la forme d'une puissance de 10.

Une fois le dosage réalisé, des étapes de purification peuvent avoir lieu : une extraction avec un solvant ou une résine échangeuse d'ions, concentration puis précipitation du diuranate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$  par addition d'ammoniac  $\text{NH}_3$ . La calcination du diuranate d'ammonium produit le trioxyde d'uranium.

- Q13.** Proposer une équation de réaction modélisant la calcination du diuranate d'ammonium, sachant que de l'ammoniac est également formé.

## Données utiles

- Constante d'Avogadro :  $N_A \simeq 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Constante des gaz parfaits :  $R \simeq 8 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\frac{RT}{F} \ln(x) = 0.06 \log(x)$  à 298 K

*Principaux isotopes de l'uranium et abondances naturelles et masse molaires.*

${}_{92}^{238}\text{U}$  (99.27%),  ${}_{92}^{235}\text{U}$  (0.72%) et  ${}_{92}^{234}\text{U}$  (0.005%)

- Masse molaire de l'oxygène  ${}^{16}_8\text{O}$  :  $16 \text{ g mol}^{-1}$ .

*Rayons ioniques.*

$\text{U}^{4+}$  :  $r_+ = 110 \text{ pm}$  ;  $\text{O}^{2-}$  :  $r_- = 120 \text{ pm}$

*Potentils standard d'oxydoréduction à 25°C.*

- $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$  :  $E^\circ = 1.5 \text{ V}$  ;
- $\text{U}^{3+}/\text{U}$  :  $E^\circ = -1.8 \text{ V}$  ;
- $\text{U}^{4+}/\text{U}^{3+}$  :  $E^\circ = -0.6 \text{ V}$  ;
- $\text{UO}_2^{2+}/\text{U}^{4+}$  :  $E^\circ = 0.3 \text{ V}$ .

*Produits de solubilité à 25°C.*

- $\text{U}(\text{OH})_3$  :  $pK_S = 19$  ;
- $\text{U}(\text{OH})_4$  :  $pK_S = 49$  ;
- $\text{UO}_2(\text{OH})_2$  :  $pK_S = 24$ .



### Annexe : diagramme des frigoristes du fluide R718

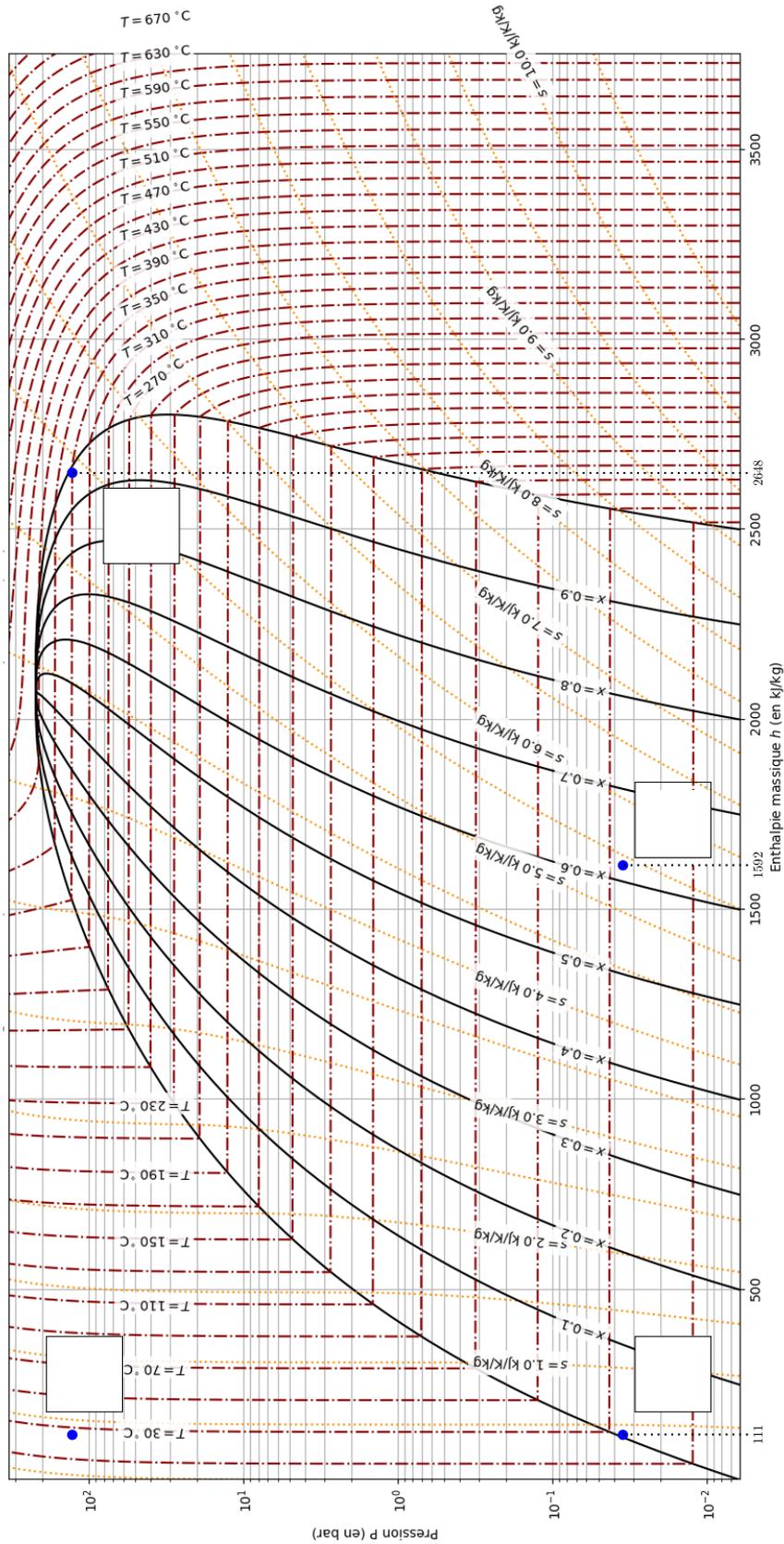


Figure A