

SESSION 2014

AGRÉGATION CONCOURS EXTERNE

**Section : PHYSIQUE-CHIMIE
Option : CHIMIE**

PROBLÈME DE CHIMIE

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : *La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

Le monoxyde de carbone : aspects de structure et de réactivité

Le sujet se compose de plusieurs parties indépendantes au sein desquelles de nombreuses questions et sous-parties sont elles-mêmes indépendantes les unes des autres.

Données et notations générales :

- N_A la constante d'AVOGADRO, $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- F la constante de FARADAY, $F = 9,649 \times 10^4 \text{ C.mol}^{-1}$
- R la constante des gaz parfaits, $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- k_B la constante de BOLTZMANN, $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
- e la charge élémentaire, $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
- h la constante de PLANCK, $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- c la célérité de la lumière dans le vide, $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Numéros atomiques et Electronegativités (dans l'échelle de PAULING) de quelques éléments :

élément	H	C	O
Numéro atomique	1	6	8
Electronegativité (notée EN)	2,20	2,55	3,44

Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1,36	1,54	1,63	1,66	1,55	1,83	1,88	1,91	1,90	1,65

Ru	Rh	Pd	Ir	Pt
44	45	46	77	78
2,18	2,28	2,20	2,20	2,28

Masses molaires (en g.mol^{-1}) :

C	O	^{16}O	air
12,01	16,00	15,995	$\approx 28,9$

Energies (en eV) des orbitales atomiques des atomes C et O :

$E_{1s}(\text{C}) = -288$	$E_{1s}(\text{O}) = -538$
$E_{2s}(\text{C}) = -16,6$	$E_{2s}(\text{O}) = -28,5$
$E_{2p}(\text{C}) = -8,3$	$E_{2p}(\text{O}) = -14,5$

Longueurs de liaison (en pm) :

- liaison CO (molécule de monoxyde de carbone) : 112,8
- liaison CO (CO^+ cation du monoxyde de carbone) : 111,5
- liaison CO (ligand carbonyle lié à un métal) : 114 à 115 usuellement
- liaison C=O (carbonyle) : environ 123 usuellement

Données spécifiques à la molécule CO :

- Valeur du moment dipolaire : 0,11 D (on indique : $1D = 1/3 \cdot 10^{-29} \text{ Cm}$) avec la charge négative sur le carbone
- Energie de la liaison CO (molécule de monoxyde de carbone) : 1074 kJ.mol^{-1} (soit une valeur supérieure à celle de N_2)
- Nombre d'onde associé à la vibration d'élongation de CO : 2144 cm^{-1}

Données thermodynamiques associées au corps pur CO :

- Point triple (noté T) : $T_T = 68,1 \text{ K}$ et $P_T = 0,1535 \text{ bar}$
- Température d'ébullition à 1,013 bar : $81,6 \text{ K}$
(on notera A ce point de coordonnées : $T_A = 81,6 \text{ K}$ et $P_A = 1,013 \text{ bar}$)
- Enthalpie standard de fusion au point triple $\approx 0,78 \text{ kJ.mol}^{-1}$
- Enthalpie standard de vaporisation au point A $\approx 6,01 \text{ kJ.mol}^{-1}$
- Masse volumique de la phase liquide au point A = $788,6 \text{ kg.m}^{-3}$

Autres données thermodynamiques :

- Enthalpies standard de formation et entropies molaires standard (à 25°C) :

	$\Delta_f H^\circ / \text{kJ mol}^{-1}$	$S^\circ / \text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
C (graphite)		5,7
CO(g)	-110,5	197,7
CO ₂ (g)	-393,5	213,7
O ₂ (g)		205,1
NO(g)	90,2	210,8
NO ₂ (g)	33,2	240,1
Zn(s)		41,6
ZnO(s)	-348,3	43,6
CH ₃ OH(g)	-201,5	239,8
CH ₃ CO ₂ H(g)	-460,8	282,4

- Température de changements d'état du corps pur (Sous p°) :

$T_{\text{fus}}(\text{Zn}) = 693 \text{ K}$, $T_{\text{vap}}(\text{Zn}) = 1180 \text{ K}$, $T_{\text{fus}}(\text{ZnO}) = 2248 \text{ K}$

$T_{\text{fus}}(\text{Cd}) = 594 \text{ K}$, $T_{\text{vap}}(\text{Cd}) = 1038 \text{ K}$

$T_{\text{fus}}(\text{Pb}) = 600 \text{ K}$, $T_{\text{éb}}(\text{Pb}) = 2013 \text{ K}$.

- Enthalpies standard de réaction (à 25°C) :

$\Delta_{\text{fus}} H^\circ(\text{Zn}) = 6,7 \text{ kJ.mol}^{-1}$ $\Delta_{\text{vap}} H^\circ(\text{Zn}) = 114,8 \text{ kJ.mol}^{-1}$

$\Delta_r H^\circ \approx 200 \text{ kJ.mol}^{-1}$ pour $\text{Ni}(\text{CO})_4 = \text{Ni}(\text{CO})_3 + \text{CO}$

$\Delta_r H^\circ \approx 350 \text{ kJ.mol}^{-1}$ pour $\text{Fe}(\text{CO})_5 = \text{Fe}(\text{CO})_4 + \text{CO}$

Partie A : présentation de la molécule

A.I. Notations de LEWIS

A.I.1. Quelles formules mésomères peut-on proposer pour la molécule de monoxyde de carbone ?

A.I.2. Quelle formule est la plus représentative ? Justifier en énonçant précisément la règle utilisée.

A.I.3. Quels résultats expérimentaux (fournis en données) confirment ce qui précède ?

A.I.4. Donner trois exemples de molécules ou ions isoélectroniques du monoxyde de carbone. On indiquera les notations de Lewis associées.

A.II. Orbitales moléculaires de la molécule de monoxyde de carbone

A.II.1. Etablir schématiquement le diagramme d'orbitales moléculaires du monoxyde de carbone. On choisira un repère avec l'axe Z correspondant à l'axe internucléaire. On détaillera le tracé effectué (positions relatives et représentation schématique des orbitales moléculaires, indication des orbitales atomiques combinées, origine du phénomène de « corrélation »...) et on explicitera les notations utilisées pour nommer les orbitales moléculaires ainsi formées (notamment l'utilisation ou non des indices « g » et « u »). Aucune valeur numérique concernant les orbitales moléculaires de monoxyde de carbone n'est attendue dans cette partie.

A.II.2. En déduire la configuration électronique de la molécule de monoxyde de carbone dans son état fondamental.

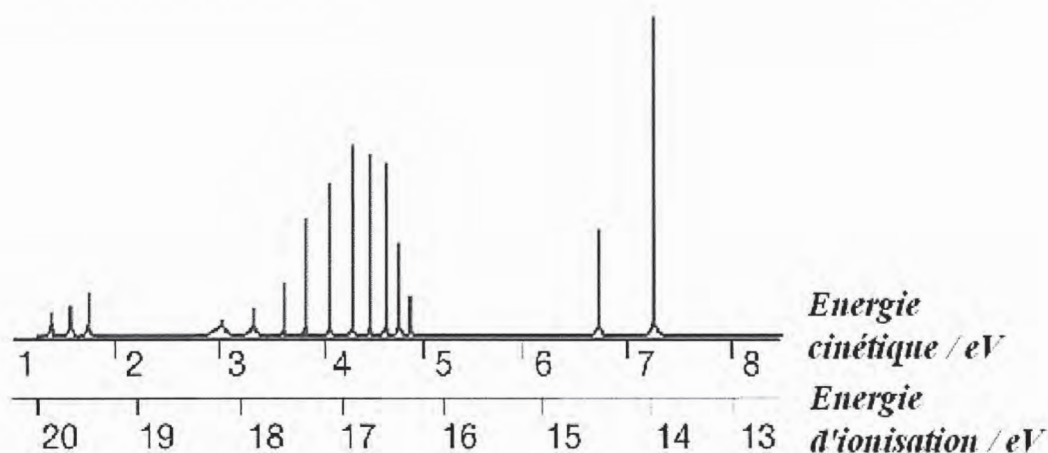
A.II.3. En s'appuyant sur des données judicieusement choisies et sur les résultats établis depuis le début du sujet, que peut-on penser *a priori* de la nature de la « H.O. » de la molécule de monoxyde de carbone ?

A.II.4. La distance C-O dans l'ion CO^+ vaut 111,5 pm. Que peut-on en conclure concernant la nature de la « H.O. » de la molécule de monoxyde de carbone ?

A.II.5. Comparer brièvement la stabilité et la réactivité de N_2 et de CO. En utilisant les questions précédentes, citer deux grands types généraux de réactivité auxquels on peut s'attendre pour la molécule de monoxyde de carbone. Justifier.

A.III. Spectrométrie photoélectronique de la molécule de monoxyde de carbone

Le spectre photoélectronique du monoxyde de carbone est schématisé ci-après :



A.III.1. Rappeler le principe de la spectrométrie photoélectronique UV. On précisera la signification des grandeurs indiquées sur l'axe des abscisses et on énoncera le théorème de KOOPMANS.

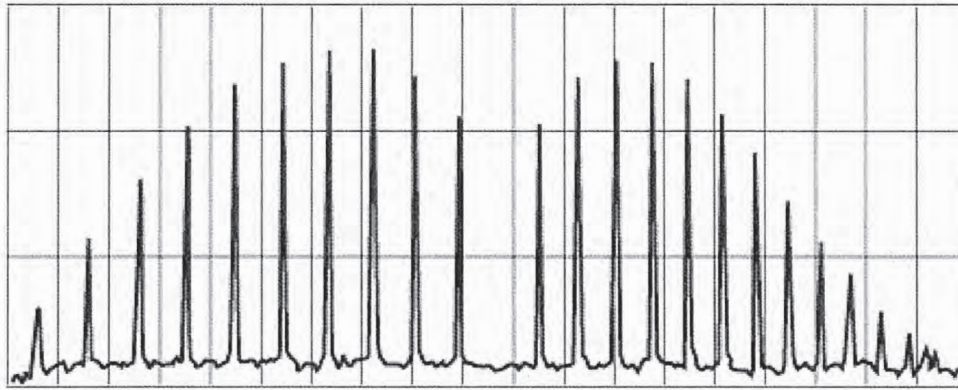
A.III.2. A quoi correspondent les différentes bandes observées sur ce spectre ? A quoi correspond la structure fine de ce spectre ?

A.III.3. Pour chacune des trois bandes (classées par énergie d'ionisation croissante), on indique une estimation des écarts entre les deux premiers pics : 2160 cm^{-1} pour la première, 1610 cm^{-1} pour la deuxième et 1990 cm^{-1} pour la troisième. Commenter ces résultats et indiquer s'ils sont en accord avec ceux de la sous-partie précédente (A.II).

A.III.4. Les raies d'une bande ne présentent pas la même intensité relative. Énoncer le principe de FRANK-CONDON et justifier succinctement et qualitativement cette observation.

A.IV. Spectroscopie Infra-Rouge de la molécule de monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone présente une bande d'absorption intense autour de 2150 cm^{-1} . Une analyse fine montre que cette bande est constituée de deux séries de pics (dites branches P et R). L'allure du spectre de la molécule $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ est représentée ci-après : l'écart entre les deux pics les plus proches qui entourent le « centre » de ce spectre, d'abscisse $2143,6\text{ cm}^{-1}$, est de $7,66\text{ cm}^{-1}$.



← cm⁻¹ —

A.IV.1. Justifier brièvement l'allure de ce spectre en expliquant l'origine des pics observés.

A.IV.2. Donner l'expression générale des énergies des différents niveaux vibrationnels et rotationnels de la molécule. On supposera que l'oscillateur est harmonique, que le rotateur est rigide et que la constante de rotation B est invariante.

A.IV.3. Quel est le nombre d'onde associé à la vibration d'élongation de la molécule $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$?

A.IV.4. En déduire la valeur de la constante de force k de la liaison. On précisera le modèle utilisé.

A.IV.5. calculer la constante de rotation B .

A.IV.6. Montrer que le moment d'inertie de la molécule (noté I) est égal au produit de la masse réduite de cette molécule et de la distance internucléaire à l'équilibre au carré. Pour effectuer cette démonstration, on pourra introduire le barycentre des masses (noté G) ainsi que les distances entre G et C (notée R_C) et entre G et O (notée R_O).

On indique que ce moment d'inertie I est relié à la constante B par la relation :

$$B = \frac{\hbar}{4\pi c I}$$

A.IV.7. En déduire la longueur de la liaison dans la molécule $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$. Commenter.

A.IV.8. L'oscillateur n'étant pas véritablement harmonique, que peut-on dire qualitativement de la valeur de la constante de rotation B dans un état vibrationnel excité (par rapport à sa valeur dans l'état fondamental) ?

A.IV.9. Pourquoi s'intéresser particulièrement à la molécule $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ dans cette sous-partie ? Comment est modifié (qualitativement) le spectre représenté précédemment dans le cas du monoxyde de carbone à l'état naturel ?

A.V. Entropie résiduelle du monoxyde de carbone.

A.V.1. L'entropie molaire standard d'un constituant physicochimique peut être déterminée expérimentalement : citer une méthode généralement utilisée à cet effet. On notera S°_{exp} cette entropie.

A.V.2. Par ailleurs, l'entropie molaire standard d'un gaz parfait peut être calculée à l'aide de la mécanique statistique. On notera S°_{calc} cette entropie. Indiquer quelques uns des paramètres (certains sont accessibles par spectroscopie) dont dépend le résultat du calcul de S°_{calc} .

A.V.3. Commenter les résultats indiqués dans le tableau suivant.

Constituant	CH ₄	CO	N ₂	CO ₂
$S^\circ_{\text{calc}} / \text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$	186,3	197,7	191,5	213,8
$S^\circ_{\text{exp}} / \text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$	186,3	193	191,6	213,7

On s'intéresse au cas du monoxyde de carbone : la différence entre S°_{calc} et S°_{exp} sera appelée « entropie molaire standard résiduelle » du monoxyde de carbone. A une pression *a priori* différente de P° , on parlera d'entropie molaire résiduelle.

A.V.4. Donner un énoncé du troisième principe de la thermodynamique.

On suppose que l'arrangement dans le cristal à 0 K est tel que l'orientation de chaque molécule de monoxyde de carbone est aléatoire (par exemple, les enchaînements ... CO CO CO CO ... et ... CO OC CO CO ... sont équiprobables).

A.V.5. Expliquer pourquoi cette hypothèse est légitime.

A.V.6. Rappeler la formule de BOLTZMANN donnant l'expression de l'entropie. On définira précisément les grandeurs intervenant dans cette formule. Dater (le plus précisément possible) cette formule.

A.V.7. En déduire une valeur approchée de l'entropie molaire résiduelle du monoxyde de carbone. Proposer deux commentaires au résultat obtenu. Que peut-on prévoir pour l'entropie molaire résiduelle de HCl ?

A.V.8. Historiquement, un des premiers exemples pour lequel une entropie résiduelle a été proposée – par PAULING – est l'eau. L'eau possède de nombreuses formes cristallines. La glace « ordinaire » possède une structure cristalline hexagonale et il est possible d'obtenir une variété de structure voisine, mais avec une maille cubique, en condensant la vapeur d'eau à pression ambiante à basse température (en dessous de -80°C) : on obtient une structure « type diamant ».

A.V.8.a. Donner quelques éléments de biographie concernant PAULING (la réponse ne devra pas excéder 50 mots).

A.V.8.b. Ecrire la maille de la glace « type diamant ». Préciser la coordinence.

A.V.8.c. En s'intéressant à l'environnement d'un atome d'oxygène bien déterminé, indiquer pourquoi une entropie résiduelle est attendue.

A.V.8.d. On se propose de reproduire ici le calcul de l'entropie résiduelle d'un échantillon de glace proposé par PAULING. Soit N le nombre de molécules d'eau de cet échantillon.

A.V.8.d.i. Combien y a-t-il de liaisons OH (les liaisons OH désignant à la fois les liaisons covalentes et les liaisons hydrogène) par atome d'oxygène et dans tout l'échantillon ?

A.V.8.d.ii. Combien y a-t-il *a priori* d'arrangements possibles (dans l'hypothèse où ils sont tous permis, y compris le cas d'un O lié par liaison covalente à 4 H) pour ces liaisons OH dans l'échantillon ?

A.V.8.d.iii. Pour chaque atome d'oxygène de l'échantillon, combien y a-t-il *a priori* de configurations possibles pour les liaisons OH (y compris le cas d'un O lié par liaison covalente à 4 H) ? Combien de ces configurations sont possibles compte tenu de la structure cristalline de la glace ?

Montrer alors que le nombre de configurations accessibles vaut $W = (6/16)^N \cdot 2^{2N}$ pour l'échantillon

A.V.8.d.iv. En déduire l'expression de l'entropie résiduelle de cet échantillon.

A.V.8.e. L'écart entre S°_{calc} et S°_{exp} vaut en réalité $3,4 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. Commenter.

A.V.8.f. L'entropie résiduelle est-elle différente ou identique dans le cas de la variété hexagonale ?

Partie B : CO un poison pour l'homme.

Même si à très faible dose, le monoxyde de carbone a été récemment identifié comme neurotransmetteur et pourrait être employé en tant qu'anti-inflammatoire, vaso-dilatateur ou promoteur de croissance néovasculaire, il constitue un composé toxique bien connu et extrêmement dangereux. Chimiquement identifié en 1800 par William C. CRUIKSHANK, ses propriétés toxiques seront étudiées dès 1846 par Claude BERNARD.

B.I. Indiquer succinctement à quoi est due la toxicité du monoxyde de carbone ?

B.II. Citer quelques origines fréquentes de la production de monoxyde de carbone, accidentellement ou involontairement, à l'échelle domestique. Quel est le point commun de toutes ces productions ?

B.III. Pourquoi le monoxyde de carbone se mélange-t-il particulièrement bien à l'air, par rapport à d'autres gaz (toxiques ou non) ?

B.IV. Le monoxyde de carbone est-il aisé à détecter sans appareillage ? Justifier.

B.V. Il existe de nombreux modèles de détecteurs à monoxyde de carbone (domestiques ou utilisés par les équipes de secours) utilisant des principes de détection différents : « les tubes

réactifs », « les capteurs électrochimiques », les « appareils à semi-conducteur » ... On se propose de présenter ces principaux types en se limitant à leur principe de mesure.

B.V.1. Les « tubes réactifs » reposent sur un test colorimétrique. Par exemple, le tube – scellé jusqu'à son utilisation - peut contenir une solution de pentoxyde de diiode et de l'amidon. En présence de monoxyde de carbone, une coloration bleue est observée.

B.V.1.a. Indiquer la réaction ayant lieu entre le pentoxyde d'iode et le monoxyde de carbone.

B.V.1.b. Justifier qualitativement le caractère quantitatif de cette réaction.

B.V.1.c. Quel phénomène est responsable de la coloration bleue observée.

B.V.1.d. Ce test peut néanmoins conduire à des « faux positifs » : quelles en sont les espèces responsables ? Donner quelques exemples concrets.

B.V.1.e. Proposer une solution technique simple permettant de limiter ce problème.

B.V.1.f. On peut *a priori* améliorer le dispositif pour quantifier le monoxyde de carbone ayant réagi : expliquer en quelques mots le principe de la mesure.

B.V.2. Le capteur « électrochimique ampérométrique » est constitué d'un électrolyte (gélatineux ou aqueux) dans lequel se trouvent 3 électrodes :

- une électrode de travail, ou de mesure, qui est une couche de métal inerte déposée sur une membrane (l'air ambiant diffusant à travers les pores de cette membrane)
- une contre-électrode reliée à l'électrode de mesure par un circuit externe de mesure du courant.
- une électrode de référence.

Les électrodes de mesure et de référence sont reliées à un potentiostat. Le dispositif est tel que dans l'air ambiant le dioxygène diffuse à travers la membrane et dans la cellule sans engendrer de différence de potentiel aux électrodes et sans générer de courant.

B.V.2.a. Indiquer la réaction qui a lieu à l'électrode de mesure lorsque le capteur est mis en présence de CO.

B.V.2.b. Quelle réaction peut-on alors envisager à la contre-électrode ?

B.V.2.c. Quel est le principe de la mesure ?

B.V.2.d. Montrer que l'intensité du courant traversant le capteur I peut se mettre sous la forme :

$$I = n.F.A.D.C/d$$

Avec n un entier à préciser, F la constante de FARADAY, A la superficie de la barrière de diffusion, D un coefficient à nommer, C la concentration du gaz, d l'épaisseur de la barrière de diffusion.

B.V.2.e. Ce type de détecteur consomme peu d'énergie : en quoi cet aspect est-il fondamental ?

B.V.3. Les appareils à semi-conducteur font appel à un matériau formé de particules d'oxyde d'étain d'une taille de 20 nm. Les variations de conductivité électrique de ce matériau, en présence de CO, sont analysées par un microprocesseur qui calcule la teneur en CO de l'air ambiant. Donner la définition d'un semi-conducteur.

B.VI. Quel traitement médical simple peut-on proposer aux personnes souffrant d'une intoxication aigüe au monoxyde de carbone ? Justifier ce traitement par un argument chimique.

B.VII. CO est non seulement un poison pour l'homme mais il serait également un des composés responsable de la destruction de l'ozone stratosphérique. Quelle équation chimique simple peut-on proposer pour rendre compte de cette hypothèse ?

Partie C : le monoxyde de carbone, un réducteur en phase sèche.

C.I. Les diagrammes d'ELLINGHAM permettent d'étudier des réactions d'oxydoréduction, dites par voie sèche, que l'on peut interpréter comme réactions de transfert de particule O_2 entre couples oxydant/réducteur. Les réactions concernées sont donc des oxydations par le dioxygène.

C.I.1. Comment doivent être écrites les équations associées à ces réactions ? Justifier.

On représente donc graphiquement les variations de $\Delta_r G^\circ$ associées à de telles équations en fonction de T en ayant préalablement procédé à une linéarisation (approximation d'ELLINGHAM).

C.I.2. Démontrer que les deux formulations suivantes sont équivalentes : « sur un domaine de température où aucun changement d'état n'est observé, $\Delta_r H^\circ$ ou $\Delta_r S^\circ$ est considérée indépendante de T » et « sur un domaine de température où aucun changement d'état n'est observé, $\Delta_r H^\circ$ et $\Delta_r S^\circ$ sont considérées indépendantes de T ».

C.I.3. Dans le cas simple où les deux espèces du couple oxydant/réducteur sont des phases condensées pures, montrer que le tracé du diagramme d'ELLINGHAM permet de définir des domaines d'existence des deux espèces. Que faut-il alors placer en ordonnée du diagramme à la place de $\Delta_r G^\circ$? Pourquoi faut-il parler de domaine d'existence et non de prédominance dans ce cas ?

C.II. On s'intéresse à présent au cas du diagramme d'ELLINGHAM de l'élément carbone. Le carbone est considéré sous forme de graphite (solide) ; le dioxygène, le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone sont sous forme gazeuse. Les températures sont comprises entre 700 et 1300 K.

C.II.1. Quelles sont les trois équations chimiques à considérer ?

C.II.2. Démontrer que les courbes $\Delta_r G^\circ = f(T)$ associées à chacune des trois équations se coupent en un même point ; on notera la température d'intersection T_i . Quelle est la signification de cette température ?

C.II.3. En utilisant les données fournies, tracer le diagramme d'ELLINGHAM de l'élément carbone sur la feuille de papier millimétrée fournie. Justifier les simplifications effectuées. Peut-on définir un domaine d'existence de CO ?

C.III. Un haut fourneau est en permanence alimenté en carbone. Celui-ci y est donc en excès, et l'état d'équilibre final du système est décrit par l'équilibre : $C + CO_2 \rightleftharpoons 2 CO$. On suppose que le mélange gazeux n'est composé que des gaz CO et CO_2 . On s'intéresse à la courbe $X_{co} = f(T)$, où X_{co} est la fraction molaire de CO en phase gaz.

C.III.1. Quel nom donne-t-on usuellement à cette courbe ? Quel qualificatif peut-on donner à la réaction dans le sens direct ?

C.III.2. Dans le cas où on travaille à la pression constante $P = 1$ bar, donner l'expression de cette courbe (*On pourra se limiter à l'expression intrinsèque : $X_{co}^2 / (1 - X_{co}) = f(T)$*).

C.III.3. La production de monoxyde de carbone est-elle favorisée à chaud ou à froid ? Ce résultat pouvait-il être prévu par une loi de déplacement de l'équilibre ? Comment expliquer que le monoxyde de carbone soit observé même à basse température ?

C.III.4. Quel est l'effet d'une diminution isotherme de la pression ? Illustrer ceci graphiquement.

C.IV. Application à la pyrométallurgie du zinc :

C.IV.1. Donner les équations numériques correspondant à la courbe d'ELLINGHAM du couple ZnO/Zn entre 300 K et 2200 K.

C.IV.2. Pourquoi considérer uniquement les températures inférieures à 2200 K ?

C.IV.3. Tracer le diagramme d'ELLINGHAM du couple ZnO/Zn et conclure quant à la prévision théorique de la réduction de ZnO par C et/ou CO. *Indication : des valeurs de température sont attendues dans cette question.*

On s'intéresse à présent à quelques aspects pratiques de la pyrométallurgie du zinc. La blende constitue le principal minerai de zinc ; elle est fréquemment associée à nombre d'impuretés : on ne considèrera ici que la galène PbS et le sulfure de cadmium CdS.

C.IV.4. Quel avantage, en tant que réducteur, le monoxyde de carbone présente-t-il par rapport au carbone ?

C.IV.5. Quel est le nom usuel donné à l'étape permettant l'obtention de ZnO à partir de la blende ? Donner l'équation de cette réaction, indiquer en quoi il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction et préciser ses principaux avantages.

C.IV.6. Industriellement, comment le plomb et le cadmium sont-ils usuellement éliminés ?

C.IV.7. A l'instar de l'oxyde de zinc, de nombreux oxydes métalliques sont réduits par le monoxyde de carbone : quel est celui dont le tonnage est le plus important ?