

Devoirs surveillé n° 4 8h00 – 12h00 4 heures

Calculatrice autorisée

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

Toutes les interprétations seront comptabilisées

Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

RAPPEL DES CONSIGNES

- Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.
- Ne pas utiliser de correcteur.
- Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.

Le devoir se compose de 2 problèmes indépendants. Les différentes parties du 2^e problème sont indépendantes entre elles.

Un document réponse est à joindre avec la copie.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées par le candidat sur sa copie ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées. Le barème tient compte du temps nécessaire pour explorer ces pistes et élaborer un raisonnement, il valorise ces questions de façon très significative.

Un formulaire et certaines données numériques sont disponibles en fin d'énoncé.

1^{er} problème : Utilisation de l'énergie éolienne

Une éolienne entraîne une génératrice électrique destinée à alimenter une installation électrique. Pour les aéromoteurs de faible puissance dont la vitesse de rotation présente certaines fluctuations, on adopte le choix d'une génératrice à courant continu.

La génératrice est constituée d'un stator inducteur dont l'excitation est indépendante, d'un rotor (induit) alimentant une installation (figure 9).

On désigne par :

i_e , le courant d'excitation circulant dans le bobinage inducteur du stator ;

U , la tension aux bornes de l'induit ;

I , le courant circulant dans l'induit ;

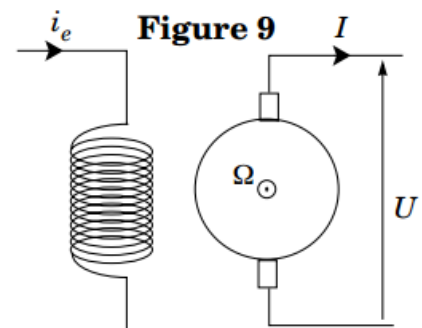
Ω , la vitesse angulaire de rotation du rotor ;

E_o , la tension à vide aux bornes de l'induit ;

Φ est la constante de la machine, dont la valeur ne peut être modifiée que par le courant d'excitation i_e .

R désigne la résistance totale du bobinage induit ;

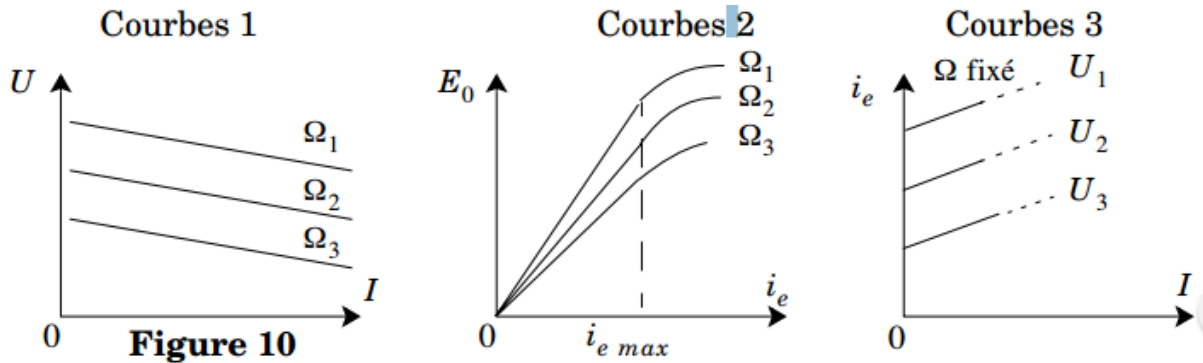
On néglige l'inductance propre de l'induit.



1- Quelle est l'unité de Φ ?

2- Représenter le schéma électrocinétique de l'induit.

Les caractéristiques de la machine en fonctionnement générateur sont regroupées sur la figure 10 :



- Caractéristiques 1 : $U(I)$ à Ω et i_e fixés (Courbes 1)
- Caractéristiques 2 : $E_0(i_e)$ à Ω fixé (Courbes 2)
- Caractéristiques 3 : $i_e(I)$ à Ω et U fixés (Courbes 3)

3- Tracer l'allure des variations de Φ en fonction de i_e . Que se passe-t-il physiquement lorsque $i_e > i_{e \max}$?

La génératrice à courant continu doit délivrer une tension U_0 , constante, destinée à alimenter à courant I_0 constant, soit un ensemble d'accumulateurs au plomb, soit un onduleur de tension. La tension doit donc être stable, malgré les fluctuations de la vitesse de rotation de l'éolienne.

4- Quelle doit être alors l'allure de la caractéristique $U(I)$ pour différentes valeurs de Ω ? Sur quel paramètre peut-on agir pour obtenir cette caractéristique ? En déduire l'allure de la caractéristique de $i_e(\Omega)$, on indiquera les abscisses Ω_1, Ω_2 et Ω_3 ainsi que l'ordonnée $i_{e \max}$. Conclure.

2^e problème : Autour d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire utilise l'énergie dégagée par la fission nucléaire des atomes d'uranium placés au cœur du réacteur. La chaleur générée par la fission est transférée à un fluide caloporteur, généralement de l'eau qui circule dans le circuit primaire. L'eau du circuit primaire est portée à très haute température par l'effet des réactions de fission nucléaire qui ont lieu au sein du cœur du réacteur. Elle passe ensuite dans un pressuriseur qui maintient sa pression constante et égale à $p = 155$ bar, puis effectue un échange thermique avec le circuit secondaire dans un générateur de vapeur : l'énergie thermique dégagée par l'eau du premier circuit vaporise alors l'eau du second, qui fait ensuite tourner plusieurs turbines génératrices d'énergie mécanique, elle-même enfin transformée en énergie électrique par un alternateur.

I Étude du circuit primaire

Le cœur est constitué de $N = 41\,448$ crayons combustibles. Chaque crayon combustible est constitué d'un cylindre de hauteur $H = 3,66$ m et de diamètre $d = 2\,R_4 = 9,5$ mm. Ces crayons sont le siège de réactions de fission, exothermiques.

La puissance thermique développée dans le cœur vaut : $P_1 = 2\,776$ MW.

Le circuit primaire doit être correctement dimensionné pour prévenir tout échauffement anormal du combustible, $\text{UO}_{2(s)}$, dont la température de fusion vaut 2800°C . La conductivité thermique de $\text{UO}_{2(s)}$ vaut $\lambda_2 = 3,5\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

La pression de vapeur saturante de l'eau à 345°C vaut 155 bar.

Évolution de la température entre le cœur du combustible et le fluide caloporteur

On étudie l'évolution de la température entre le centre du combustible $\text{UO}_{2(s)}$ et l'eau du circuit primaire, qui circule dans l'espace annulaire de rayon allant de R_4 à R_5 et entourant les crayons.

On suppose que la température du fluide caloporteur est une constante et vaut $T_5 = 303^\circ\text{C}$.

On note T_2 et T_3 les températures de part et d'autre de l'interface entre le combustible et la gaine.

On note T_4 et T_5 les températures de part et d'autre de l'interface entre la gaine et le fluide caloporteur.

Pour simplifier, on néglige les effets de bord à chaque extrémité des cylindres ; on considère pour l'étude que les N crayons combustibles de hauteur H sont disposés les uns au-dessus des autres et que les échanges thermiques se font exclusivement selon une direction radiale.

Les échanges thermiques au niveau d'une interface sont modélisés selon la relation de Newton : la puissance thermique traversant une surface dS de cette interface s'écrit $h\,dS\,(T_s - T_a)$ où h désigne le coefficient de transfert conducto-convectif et T_s et T_a désignent les températures de part et d'autre de l'interface.

Le coefficient de transfert conducto-convectif entre le combustible et la gaine vaut $h_2 = 10\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Le coefficient de transfert conducto-convectif entre la gaine et le fluide caloporteur vaut $h_4 = 25\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Chaque crayon est entouré d'une gaine d'épaisseur $e = R_4 - R_3 = 0,60$ mm dont la conductivité thermique vaut $\lambda_3 = 16\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

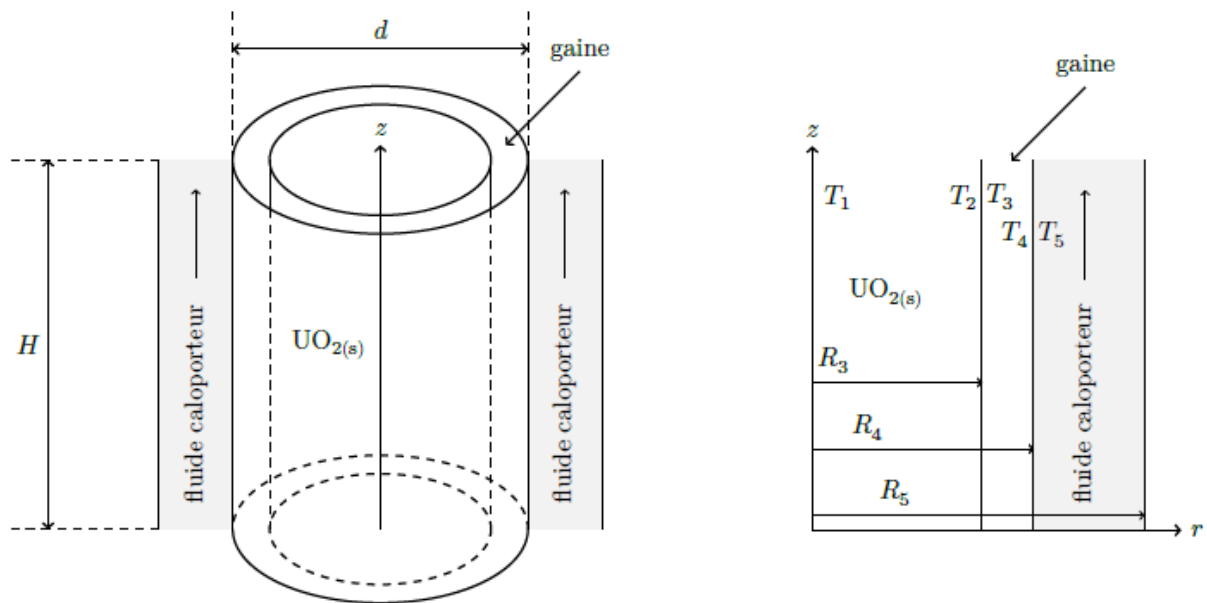


Figure 2

Q 1. Exprimer la surface latérale totale, notée S_{tot} , de l'ensemble des N crayons combustibles entourés de la gaine en fonction de N , d et H .

On note P_V la puissance thermique par unité de volume engendrée par les réactions de fission au cœur des crayons combustibles et que l'on suppose uniforme. On appelle r la distance à l'axe du cylindre modélisant l'ensemble des N crayons.

Q 2. Montrer que l'équation de la diffusion thermique vérifiée par la température dans le combustible s'écrit :

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + Ar = 0.$$

Exprimer A en fonction de P_V et λ_2 .

Q 3. Exprimer la température $T(r)$ dans $UO_{2(s)}$ en fonction de P_V , T_2 , R_3 , λ_2 et r .

Q 4. Exprimer la température T_3 en fonction de T_2 , P_1 , h_2 , d , e , H et N .

Q 5. Exprimer la température $T(r)$ en un point de la gaine en fonction de T_4 , P_1 , R_4 , λ_3 , S_{tot} et r .

Q 6. Calculer les températures T_4 , T_3 , T_2 et T_1 .

Q 7. Représenter le profil température $T(r)$ pour $0 \leq r \leq R_5$.

Q 8. Expliquer pourquoi le bon fonctionnement du pressuriseur du circuit primaire fait partie des critères majeurs de sûreté. Proposer une solution pour pouvoir évacuer une puissance plus importante.

II. Industrie de l'extraction de l'uranium

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 1).

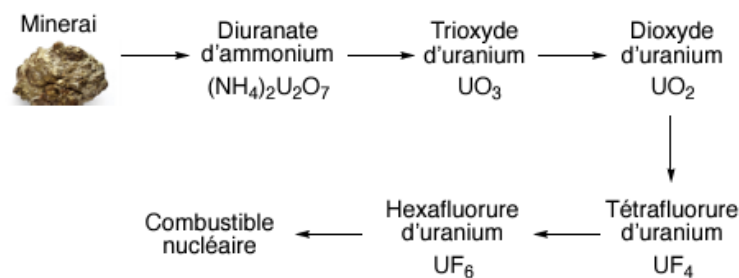


Figure 1. Production du combustible nucléaire d'uranium.

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.

Q9. A l'aide des abondances des isotopes de l'uranium (Annexe 2) évaluer la masse molaire de l'uranium naturel.

Principal minerai d'uranium, le dioxyde d'uranium ou uraninite (UO_2), de couleur noire, est un minerai cubique. C'est un cristal ionique constitué d'ions U^{4+} et O^{2-} . L'uraninite cristallise de la manière suivante : les ions U^{4+} dans un réseau cubique à faces centrées et les ions O^{2-} occupent tous les sites tétraédriques.

Q 10. Représenter la maille cristalline des ions U^{4+} . Préciser explicitement la position des ions O^{2-} .

Q 11. Déterminer numériquement le paramètre de maille a .

Q 12. Indiquer le nombre de chacun des ions par maille, déterminer la coordinence entre ions de charge opposée pour les ions U^{4+} d'une part et O^{2-} d'autre part.

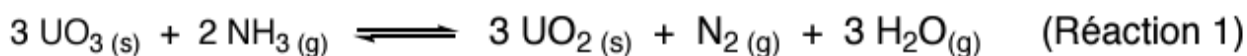
Q 13. Exprimer de manière littérale puis numérique la masse volumique de l'uraninite.

Réduction du trioxyde d'uranium en dioxyde d'uranium

Le dioxyde d'uranium est le plus souvent obtenu par réduction du trioxyde d'uranium via l'action d'un gaz réducteur comme le dihydrogène ou l'ammoniac ou via l'action d'un solide réducteur comme le carbone.

Réduction du trioxyde d'uranium par l'ammoniac

Le trioxyde d'uranium est réduit en dioxyde d'uranium par l'ammoniac selon la réaction :



Q14.- Calculer l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^\circ$ à 298 K pour cette réaction de réduction. A l'aide d'un raisonnement permettant d'établir le sens de variation de la constante d'équilibre

thermodynamique K° de la réaction avec la température, indiquer si la formation de UO_2 est favorisée à haute ou basse température.

Q15. Calculer l'entropie standard de réaction $\Delta_r S^\circ$ à 298 K.

Q16. En supposant que $\Delta_r H^\circ$ et $\Delta_r S^\circ$ sont indépendants de la température, déterminer l'enthalpie libre standard de réaction $\Delta G^\circ(T)$.

Q17. Calculer la constante d'équilibre K° à 900 K. Conclure.

Réduction du trioxyde d'uranium par le carbone solide

Dans le cas de la réduction du trioxyde d'uranium par le carbone solide, la réaction se produit grâce à la mise en contact des poudres des solides des deux phases. Le déroulement de la réaction va alors dépendre fortement de la qualité du mélange. Afin de mieux comprendre et contrôler les phénomènes mis en jeu au cours de la carboréduction, des études ont été réalisées sur l'effet d'un broyage du mélange des deux poudres par une analyse thermogravimétrique (Figure 3), technique qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température (pour une température variant de la température ambiante à 900 °C dans notre cas).

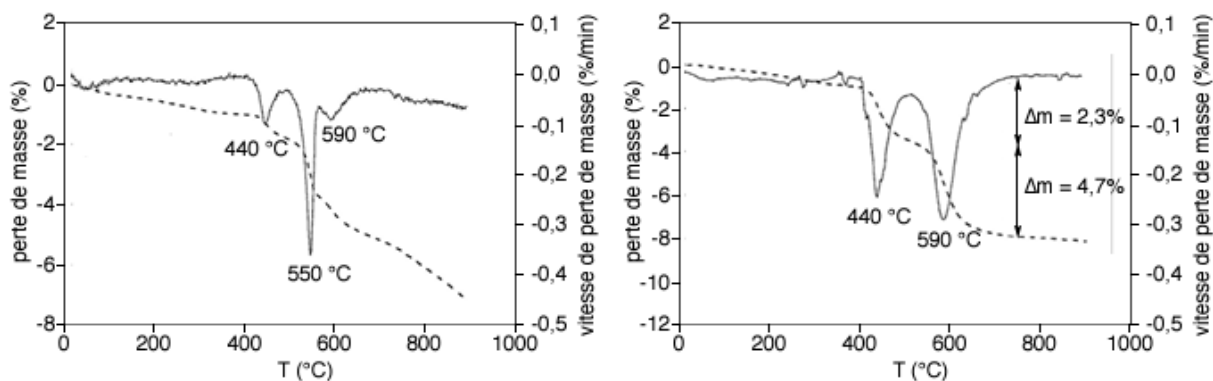
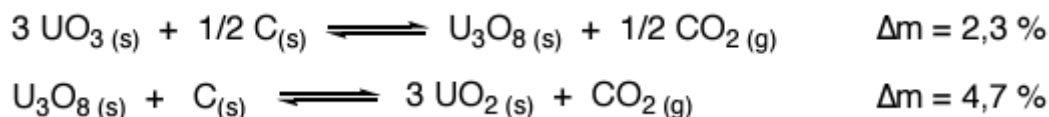


Figure 3. Courbes de perte de masse (pointillés) et vitesse de perte de masse (trait plein) pour le mélange non broyé (gauche) et broyé (droite).²

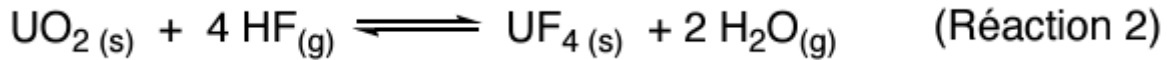
D'après les calculs de perte de masse théorique et compte tenu de la stœchiométrie UO_3/C du mélange, les pics de perte de masse situés à 440 °C et 590 °C sont attribués aux deux transformations suivantes (les pertes de masses étant données pour le mélange broyé) :



Q18. A l'aide de la Figure 3, expliquer si le broyage du mélange solide favorise la formation du dioxyde d'uranium et proposer une interprétation possible.

Obtention du tétrafluorure d'uranium

Le dioxyde d'uranium est transformé en tétrafluorure d'uranium au cours d'une hydrofluoruration par voie sèche selon la réaction 2 :



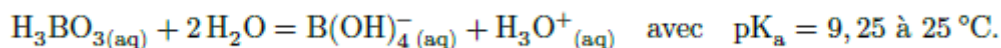
Cet équilibre a été étudié sous une pression de 1 bar en faisant passer du fluorure d'hydrogène gazeux sur du dioxyde d'uranium solide. Le rapport des pressions partielles à l'équilibre $x = \frac{P_{\text{HF}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}$ est égal à 10^{-2} dans le gaz sortant à 200°C

Q19. En déduire la constante d'équilibre thermodynamique K° de la réaction à cette température.

III. Contrôle de la concentration en bore dans le circuit primaire

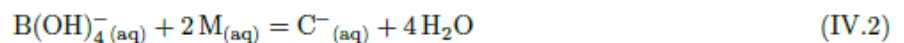
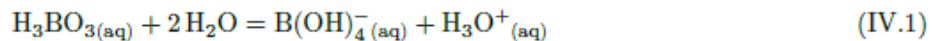
Chaque réacteur nucléaire est équipé d'un circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt. Ce circuit contient un mélange d'eau et de bore. Le bore, présent dans l'eau du circuit primaire sous forme d'acide borique dissous, permet de modérer, par sa capacité à absorber les neutrons, la réaction en chaîne. Les règles d'exploitation demandent de réaliser un contrôle de la concentration en bore.

L'acide borique H_3BO_3 est un monoacide faible :



Titration pH-métrique

En présence de D-mannitol (noté M), l'ion $\text{B}(\text{OH})_4^-$ donne un ion noté C^- . La dissociation de H_3BO_3 avec le D-mannitol s'écrit :



La constante thermodynamique d'équilibre de la réaction IV.2 est $K_2 = 10^5$.

Q20. Calculer la constante d'équilibre K de la réaction de formation de $\text{C}^-(\text{aq})$, avec un coefficient stœchiométrique unité, à partir de l'acide borique et du D-mannitol aqueux à 25°C. Commenter le résultat.

Le mélange $\text{H}_3\text{BO}_{3(\text{aq})} + 2 \text{M}_{(\text{aq})}$ joue le rôle d'un acide faible au sens de Bronsted. On définit la constante d'acidité apparente de l'acide borique par $K_{a,\text{app}} = \frac{a_{\text{C}^-} a_{\text{H}_3\text{O}^+}}{a_{\text{H}_3\text{BO}_3}}$ où interviennent les activités des espèces dissoutes.

Q 21. Exprimer $\text{pK}_{a,\text{app}}$ en fonction de $\text{pK} = -\log K$, $[\text{M}_{(\text{aq})}]$ et de la concentration standard c° .

On étudie le dosage de l'acide borique par une solution d'hydroxyde de sodium.

On prépare 10 mL d'une solution d'acide borique de concentration C_0 ; on ajoute x grammes de D-mannitol en s'assurant de respecter la condition $[\text{M}_{(\text{aq})}] \gg [\text{H}_3\text{BO}_{3(\text{aq})}]$; on complète à 200 mL avec de l'eau distillée. On ajoute un barreau aimanté afin d'agiter le mélange.

On dispose dans la burette d'une solution d'hydroxyde de sodium à la concentration $C_B = 0,10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. On appelle V_B le volume de la solution d'hydroxyde de sodium versé au cours du dosage.

On réalise trois dosages à 25°C avec des valeurs différentes de x , l'une d'elles correspondant au cas $x = 0$ (absence de D-mannitol). Les trois courbes (a), (b) et (c) correspondantes, obtenues suite à une étude expérimentale, figurent sur le graphe de la figure 8.

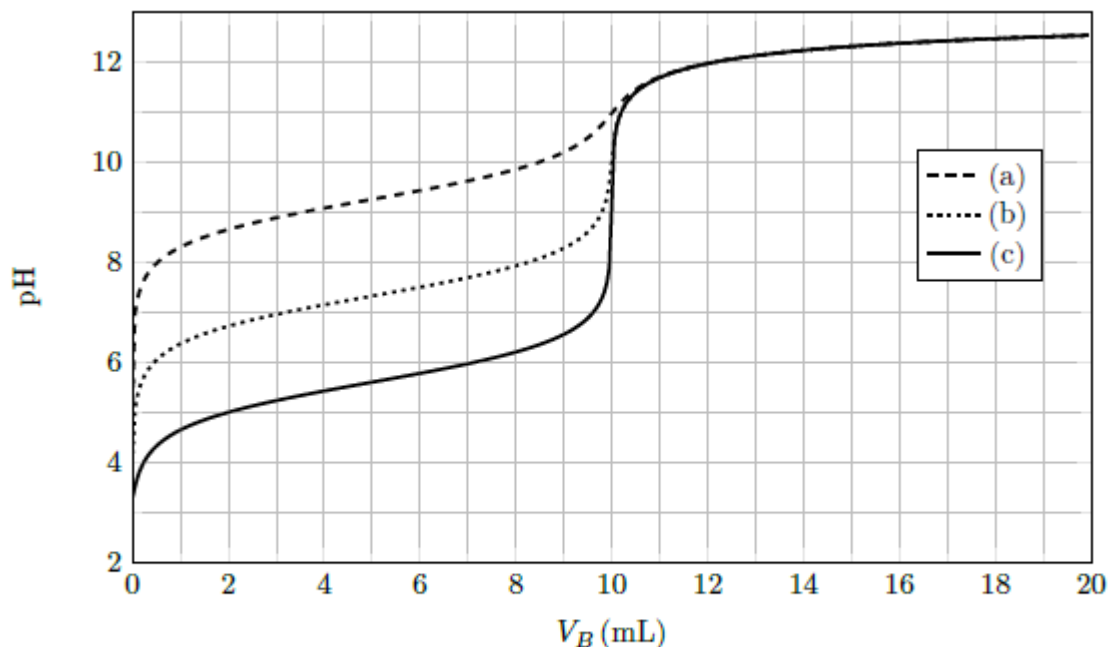


Figure 8 Courbe de titrage pH-métrique de l'acide borique, avec ou sans D-mannitol, par l'hydroxyde de sodium.

Q 22. Déterminer C_0 ainsi que les valeurs de x notées respectivement x_a , x_b et x_c ayant conduit à chacune des courbes (a), (b) et (c).

Titration conductimétrique

On s'intéresse à présent au principe d'une autre technique de titrage, conductimétrique.

On prépare 10 mL d'une solution d'acide borique de concentration C'_0 ; on la complète avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume $V_A = 40 \text{ mL}$ où la concentration en acide borique est notée C_A . On ajoute un barreau aimanté.

Dans la burette, on dispose d'une solution titrante d'hydroxyde de sodium à la concentration $C_B = 0,10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

On appelle V_B le volume de cette solution titrante versé au cours du dosage à 25°C .

On utilise un conductimètre pour suivre l'évolution de la conductivité σ de la solution titrée en fonction du volume V_B .

Q 23. Déterminer la loi de conductivité σ en fonction notamment du volume V_B de solution titrante versé avant et après l'équivalence.

Q 24. Représenter, justifications à l'appui, l'allure de $(V_A + V_B) \sigma$ en fonction de V_B en y repérant le volume réel versé $V_{B,\text{eq}}$ à l'équivalence. Conclure sur la possibilité de titrer ainsi le bore en solution.

IV Étude de la contamination des circuits par les produits d'activation

Un flux de neutrons peut activer des atomes qui produisent alors un rayonnement. Les tubes des générateurs de vapeur sont constitués d'Inconel (alliage à base de nickel et de chrome). La composition massique de l'alliage 690 est : 58 % de Ni, 31 % de Cr et 11 % de Fe. Les alliages à base de nickel jouent un rôle important dans la construction des matériaux utilisés pour le circuit primaire. De nombreuses études (Palmer, Tremaine et Leblanc, etc.) ont été menées sur la solubilité des oxydes métalliques (Ni, Fe, Cr, Co). On étudie par la suite l'oxyde de nickel $\text{NiO}_{(s)}$.

Préliminaire

Q 25. Représenter un diagramme de prédominance ou d'existence en fonction du pH relatif aux espèces $\text{NiO}_{(s)}$, $\text{Ni}^{2+}_{(aq)}$ à une température de 300°C . On prendra une concentration de frontière $C'_{fr} = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Q 26. Expliquer l'origine de l'irradiation possible des intervenants lors des opérations de maintenance dans le circuit primaire et la préconisation du choix d'un pH supérieur à 3 dans l'eau du circuit primaire à une température de 300°C .

Modèle de Palmer

On considère les espèces $\text{NiO}_{(s)}$, $\text{Ni}^{2+}_{(aq)}$ et $\text{Ni(OH)}_{2(aq)}$. On note s la solubilité de l'oxyde de nickel définie par $s = [\text{Ni}^{2+}_{(aq)}] + [\text{Ni(OH)}_{2(aq)}]$.

Q 27. Représenter un diagramme de prédominance en fonction du pH relatif cette fois-ci aux espèces $\text{Ni}^{2+}_{(aq)}$ et $\text{Ni(OH)}_{2(aq)}$ à la température de 300°C .

Q 28. Retrouver par le calcul les équations de droite du diagramme simplifié de la figure 9 représentant $\log(s)$ en fonction du pH pour un pH compris entre 3 et 11.

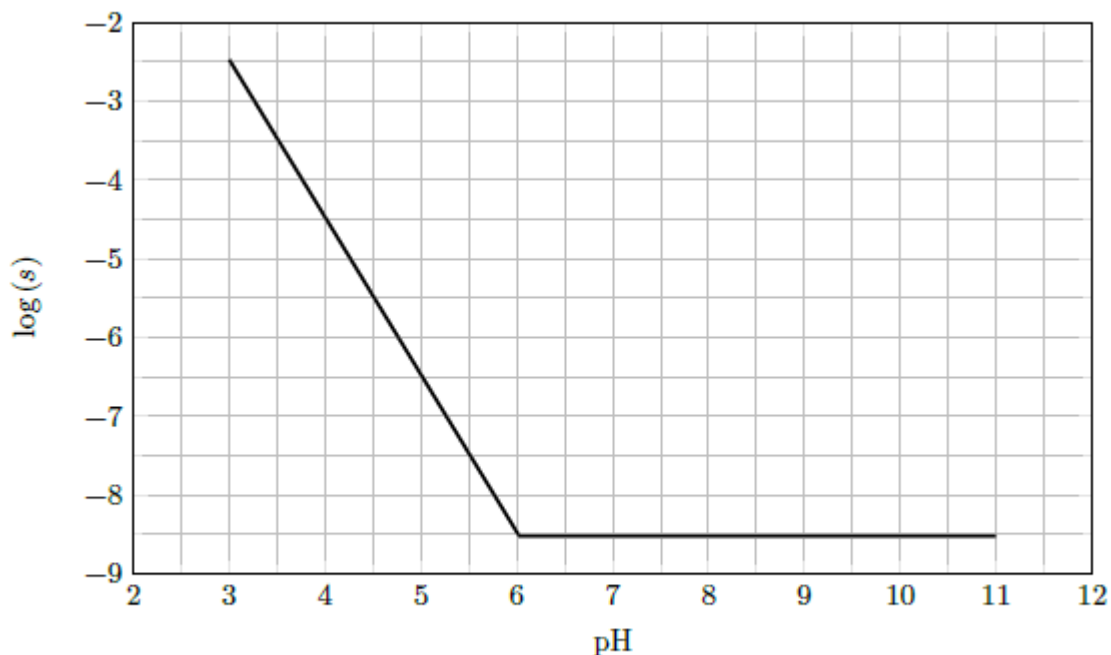


Figure 9 Diagramme de solubilité de l'espèce $\text{NiO}_{(s)}$ en fonction du pH à 300°C .

Q 29. Compléter le programme Python du document réponse permettant d'obtenir le tracé du diagramme de distribution donnant en pourcentages

$$\frac{[\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})}]}{[\text{Ni}(\text{OH})_{2(\text{aq})}] + [\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})}]} \quad \text{et} \quad \frac{[\text{Ni}(\text{OH})_{2(\text{aq})}]}{[\text{Ni}(\text{OH})_{2(\text{aq})}] + [\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})}]} \quad [\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})}]$$

en fonction du pH à la température de 300°C. Le programme doit également représenter sur le même graphique une droite verticale correspondant au pH de l'eau neutre à 300 ° C.

Le tracé obtenu est similaire à celui de la figure 10 réalisé dans les mêmes conditions d'étude.

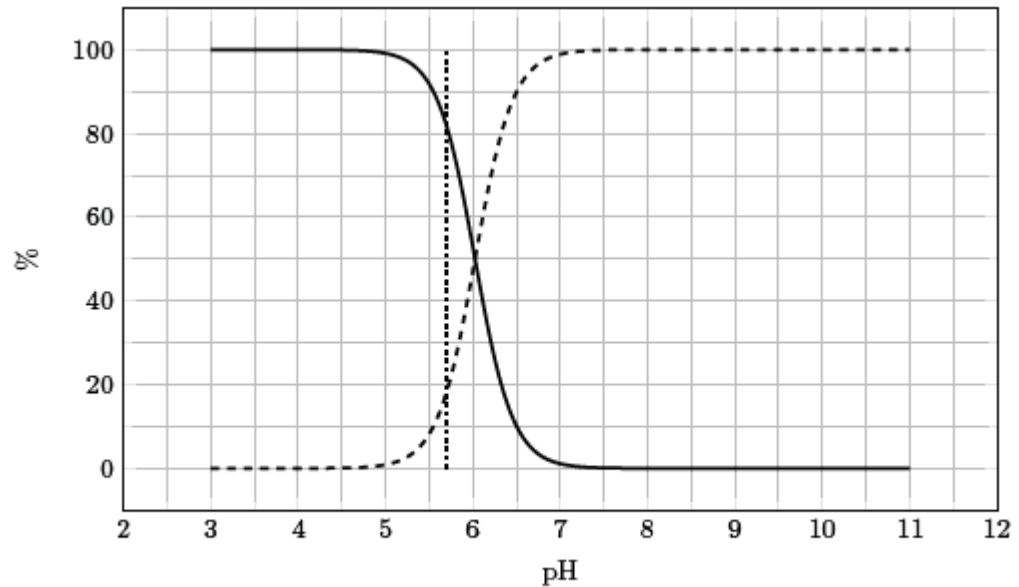


Figure 10 Diagramme de distribution à 300 °C.

Annexes

Annexe 2. Principaux isotopes de l'uranium et abondances naturelles et masse molaires.

$^{238}_{92}\text{U}$ (99,27%), $^{235}_{92}\text{U}$ (0,72%), et $^{234}_{92}\text{U}$ (0,005%).

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

Annexe 3. Rayons ioniques.

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

Dans le tableau ci-dessous **TOUTES** les enthalpies standard de formation sont **NEGATIVES** (ou nulles)

Annexe 6. Données thermodynamiques (considérées indépendantes de la température).

Espèce	$\text{N}_{2(g)}$	NH_3 (g)	$\text{HF}_{(g)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$	UO_2 (s)	UO_3 (s)	UF_4 (s)
$\Delta_f H^\circ$ (kJ·mol ⁻¹)	0	-47	-270	-240	- 1100	- 1200	- 1900
S_m° (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	190	190	170	190	80	100	150

Loi de Kohlrausch : $\sigma = \sum_i \lambda_i C_i$, avec σ la conductivité de la solution et λ_i la conductivité molaire ionique de l'ion d'indice i de concentration C_i .

Tableau de conductivités molaires ioniques à 25 °C :

Ion	H_3O^+	Na^+	OH^-	$\text{B}(\text{OH})_4^-$
λ_i (mS·m ² ·mol ⁻¹)	35,0	5,01	19,8	6,70

Produit ionique de l'eau à plusieurs températures :

Température (°C)	25	90	300
pK _e	14,00	12,44	11,41

Équations de réaction et lois d'évolution de leur pK avec la température T en kelvins :

$\text{NiO}_{(s)} + 2 \text{H}_3\text{O}^+_{(aq)} = \text{Ni}^{2+}_{(aq)} + 3 \text{H}_2\text{O}$	$\text{pK}_4 = 6,093 - \frac{5513,46}{T}$
$\text{Ni}^{2+}_{(aq)} + 4 \text{H}_2\text{O} = \text{Ni}(\text{OH})_{2(aq)} + 2 \text{H}_3\text{O}^+_{(aq)}$	$\text{pK}_5 = -6,09 + \frac{7282,7}{T} + 0,009476 T$

Autres données numériques :

Grandeur	Notation	Valeur	Unité
Masse molaire de l'acide borique	M_{HBO_3}	61,84	g·mol ⁻¹
Masse molaire du D-mannitol	M_{D}	182,17	g·mol ⁻¹
Constante des gaz parfaits	R	8,314	J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹
Concentration standard	c°	1	mol·L ⁻¹
Constante d'Avogadro	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$	mol ⁻¹

NOM :
Prénom :

PSI*

DOCUMENT REPONSE

DS4

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Fonctions de calcul des constantes d'équilibre K4 et K5 associées respectivement à pK4 et pK5
5 def K4(T): # Température T en kelvins
6     return 
7
8 def K5(T): # Température T en kelvins
9     return 
10
11 # Température en kelvins
12 T = 
13
14 # Valeur du pH de l'eau neutre à la température T
15 pHen = 
16
17 N = 1000 # Nombre de points
18 pHmin = 3 # pH de départ pour la représentation
19 pHmax = 11 # pH de fin pour la représentation
20 pas = (pHmax-pHmin)/(N-1) # Pas entre deux valeurs successives du pH
21
22 pH = np.zeros(N) # Tableau de N valeurs nulles
23 y1 = np.zeros(N)
24 y2 = np.zeros(N)
25
26 for i in range(N):
27     pH[i] = pHmin+i*pas # Valeur du pH pour le point d'indice i
28     h = 10**(-pH[i]) # Valeur de  $h=[H_3O^+]/c^0$ 
29     # Part y1 =  $[Ni^{2+}]/([Ni(OH)_2]+[Ni^{2+}])$ 
30     y1[i] = 
31     # Part y2 =  $[Ni(OH)_2]/([Ni(OH)_2]+[Ni^{2+}])$ 
32     y2[i] = 
33
34 # Réalisation du tracé en fonction du pH
35 # avec une ordonnée en pourcentage (valeurs comprises entre 0 et 100)
36 plt.figure()
37 plt.plot(, ) # Courbe relative à  $[Ni^{2+}]/([Ni(OH)_2]+[Ni^{2+}])$ 
38 plt.plot(, , linestyle='--') # Courbe relative à  $[Ni(OH)_2]/([Ni(OH)_2]+[Ni^{2+}])$ 
39 plt.plot([pHen, pHen], [0, 100], linestyle=':') # Courbe relative au pH de l'eau neutre
40 plt.xlabel('pH')
41 plt.ylabel('%')
42 plt.grid() # Affichage de la grille
43 plt.show()
```