

Le sujet comporte 39 questions pour un total de 114 points. Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

I) Synthèse d'analogues du péloruside A [CCINP PC 2022]

La synthèse débute par la préparation d'une solution de bromure d'allylmagnésium **3**, noté R-MgBr. La solution obtenue est traitée par l'orthoformiate **4**. Après hydrolyse par une solution aqueuse saturée en chlorure d'ammonium NH₄Cl, le composé **5**, représenté figure 7, est isolé avec un rendement de plus 80%.

Le composé **5** est ensuite traité par l'acide méta-chloroperbenzoïque (noté m-CPBA), en présence d'un excès d'hydrogénocarbonate de sodium NaHCO₃, dans le dichlorométhane à 0 °C, pour obtenir le composé **6**.

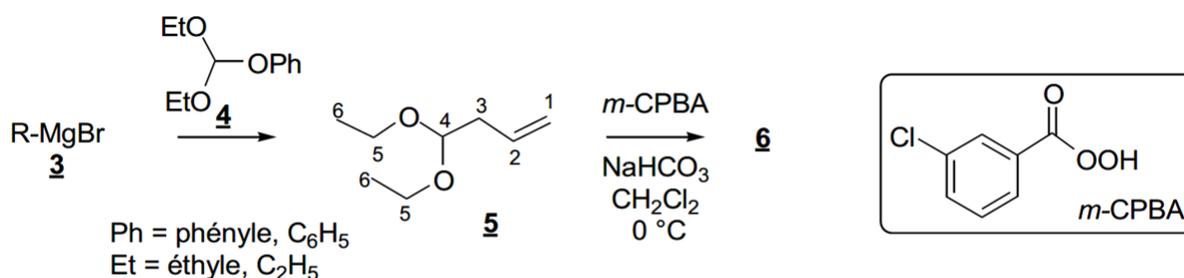


Figure 7 - Séquence réactionnelle de préparation du composé **6**

1. Représenter la formule topologique du bromure d'allylmagnésium **3**. Proposer des conditions opératoires (réactifs, solvant, précautions à prendre...) pour sa préparation (5)

2. Indiquer la nature de la réaction entre l'orthoformiate **4** et le bromure d'allylmagnésium **3**. Justifier que l'un des groupes de l'orthoformiate **4** soit meilleur nucléofuge que les autres. (2)

Le spectre RMN ¹H du composé **5**, enregistré dans le chloroforme deutéré CDCl₃, présente les signaux suivants de déplacement chimique δ (en ppm) :

δ = 1,20 (triplet, 6H) ;

δ = 2,40 (doublet de doublets, J = 7,0 Hz, J = 5,8 Hz, 2H) ;

δ = 3,45 - 3,70 (quadruplet, 4H) ;

δ = 4,52 (triplet, J = 5,8 Hz, 1H) ;

δ = 5,09 (multiplet, 2H) ;

δ = 5,80 (multiplet, 1H).

3. Attribuer les différents signaux du spectre RMN ¹H du composé **5** en respectant la numérotation imposée pour les atomes de carbone porteurs de protons. Justifier les multiplicités observées. (5)

Le protocole expérimental de la transformation $5 \rightarrow 6$ est le suivant :

À une solution du composé **5** (1,4 g ; 9,7 mmol) refroidie à 0°C dans 20 mL de dichlorométhane CH_2Cl_2 , en présence d'un excès de d'hydrogénocarbonate de sodium NaHCO_3 (2,1 g ; 25 mmol), est ajouté, par petites portions, du m-CPBA (3,1 g à 70–75% massique ; 12 mmol).

Après 4 heures de réaction, le mélange réactionnel est lavé avec 20 mL d'une solution de thiosulfate de sodium $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ de concentration 0,5 mol/L, puis testé avec du papier iodo-amidoné (papier imbibé d'une solution d'empois d'amidon et d'iodure de potassium KI). Si le papier iodo-amidoné prend une coloration bleue, des lavages supplémentaires avec la solution de thiosulfate de sodium sont réalisés jusqu'à ce que le test au papier iodo-amidoné soit négatif (le papier ne prend pas alors de coloration bleue).

La phase organique est ensuite lavée avec de l'eau et de la solution saturée en chlorure de sodium NaCl , puis séchée sur sulfate de magnésium MgSO_4 anhydre. Le solvant éliminé, le composé **6**, de formule $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_3$ (1,4 g ; 8,7 mmol), est isolé sans autre purification.

- Représenter la formule topologique du composé **6**. Expliquer le rôle de l'hydrogénocarbonate de sodium. (2)
- Quelle verrerie doit être utilisée pour réaliser les lavages successifs ? Indiquer le rôle du lavage avec la solution de thiosulfate de sodium. Préciser les éventuelles espèces chimiques révélées par le test au papier iodo-amidoné. Une liste des valeurs de potentiel standard d'oxydoréduction est fournie en fin de problème. (3)

Le composé **6** est traité, de nouveau, avec une solution de bromure d'allylmagnésium **3** selon la séquence réactionnelle présentée figure 8. Un mélange des composés **7** et **8** est alors obtenu après hydrolyse par une solution aqueuse saturée en chlorure d'ammonium NH_4Cl . Le composé **8** peut être recyclé en **6** selon des conditions opératoires adéquates.

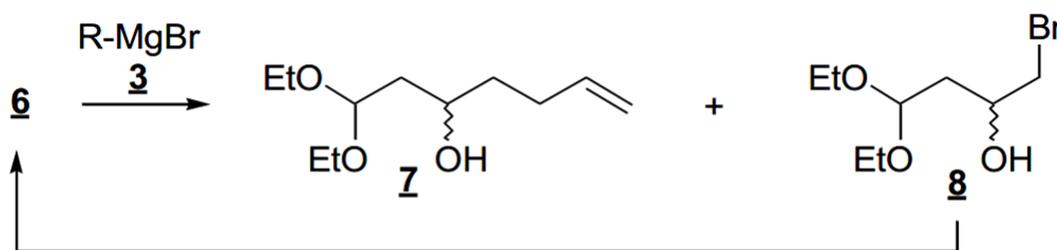


Figure 8 - Formation d'un mélange des composés **7** et **8**

- Proposer un mécanisme rendant compte de la transformation $6 \rightarrow 7$. Indiquer le(s) type(s) de sélectivité que présente cette transformation. (6)
- Proposer des conditions opératoires pour recycler le composé **8** en **6**. L'auteur de la thèse propose, comme explication à la formation concomitante des composés **7** et **8**, la présence de bromure de magnésium MgBr_2 . (2)

8. Nommer la réaction à l'origine de la formation de MgBr_2 lors de la préparation du bromure d'allylmagnésium **3**. Écrire l'équation de réaction modélisant sa formation. Proposer un dispositif expérimental permettant de limiter cette réaction. (3)

9. Dénombrer les stéréoisomères de configuration du composé **7** formés au cours de la séquence réactionnelle présentée. Indiquer s'ils sont physiquement séparables. Justifier. (3)

La fin de la synthèse utilise le procédé Wacker :

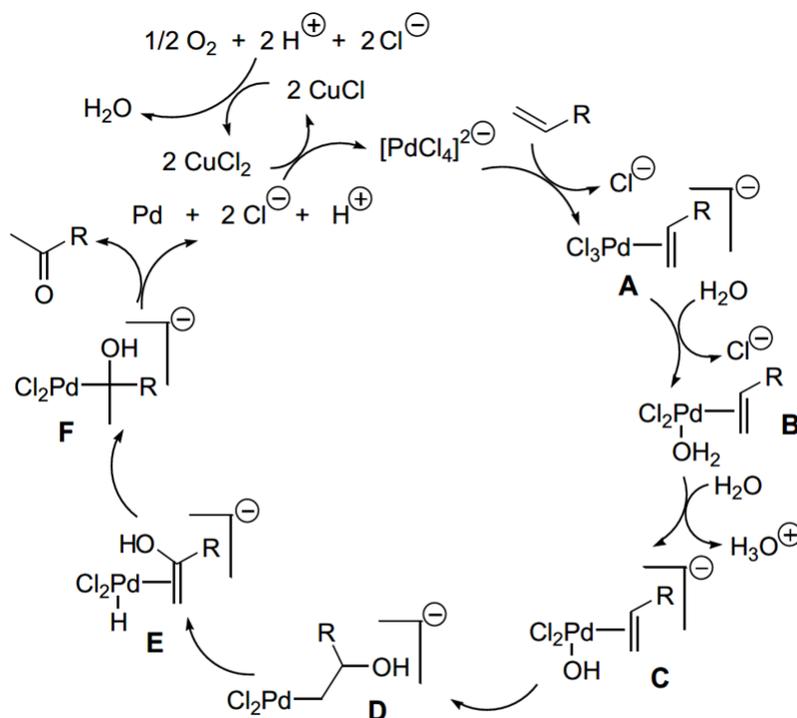


Figure 18 - Description du cycle catalytique du procédé Wacker

10. Indiquer le(s) espèce(s) catalytique(s) du procédé Wacker. Nommer les étapes suivantes du cycle catalytique : $A \rightarrow B$, $C \rightarrow D$ et $D \rightarrow E$. (5)

11. En utilisant les notations simplifiées proposées figure 18, écrire l'équation de la réaction associée au cycle catalytique du procédé Wacker. (2)

Données

Constantes d'acidité à 298 K

Acide	<i>m</i> -CPBA	H ₂ CO ₃	HCO ₃ ⁻	CF ₃ CO ₂ H
pK _a	7,6	6,4	10,3	0,3

Tableau 7 - Constantes d'acidité

Potentiels standard E° d'oxydoréduction à 298 K

Couples redox	H ₂ O ₂ (aq) [*] /H ₂ O	I ₂ (aq)/I ⁻ (aq)	S ₄ O ₆ ²⁻ (aq)/S ₂ O ₃ ²⁻ (aq)
E°(V)	1,77	0,63	0,09

* le pouvoir oxydant du *m*-CPBA est comparable à celui de H₂O₂

Tableau 8 - Valeurs de potentiels standard d'oxydoréduction

Données RMN ¹H

Valeurs de déplacements chimiques δ du proton en RMN ¹H

Proton H	-CH-C-	-CH-C=C-	H-C≡C-	-CH-C=O	-CH-OR	-CH=C-	-CH=O
δ (ppm)	0,9 – 1,3	1,6 – 2,5	1,8 – 3,1	2,0 – 3,0	3,3 – 3,7	4,5 – 6,0	9,5 – 10,0

Données INFRAROUGE

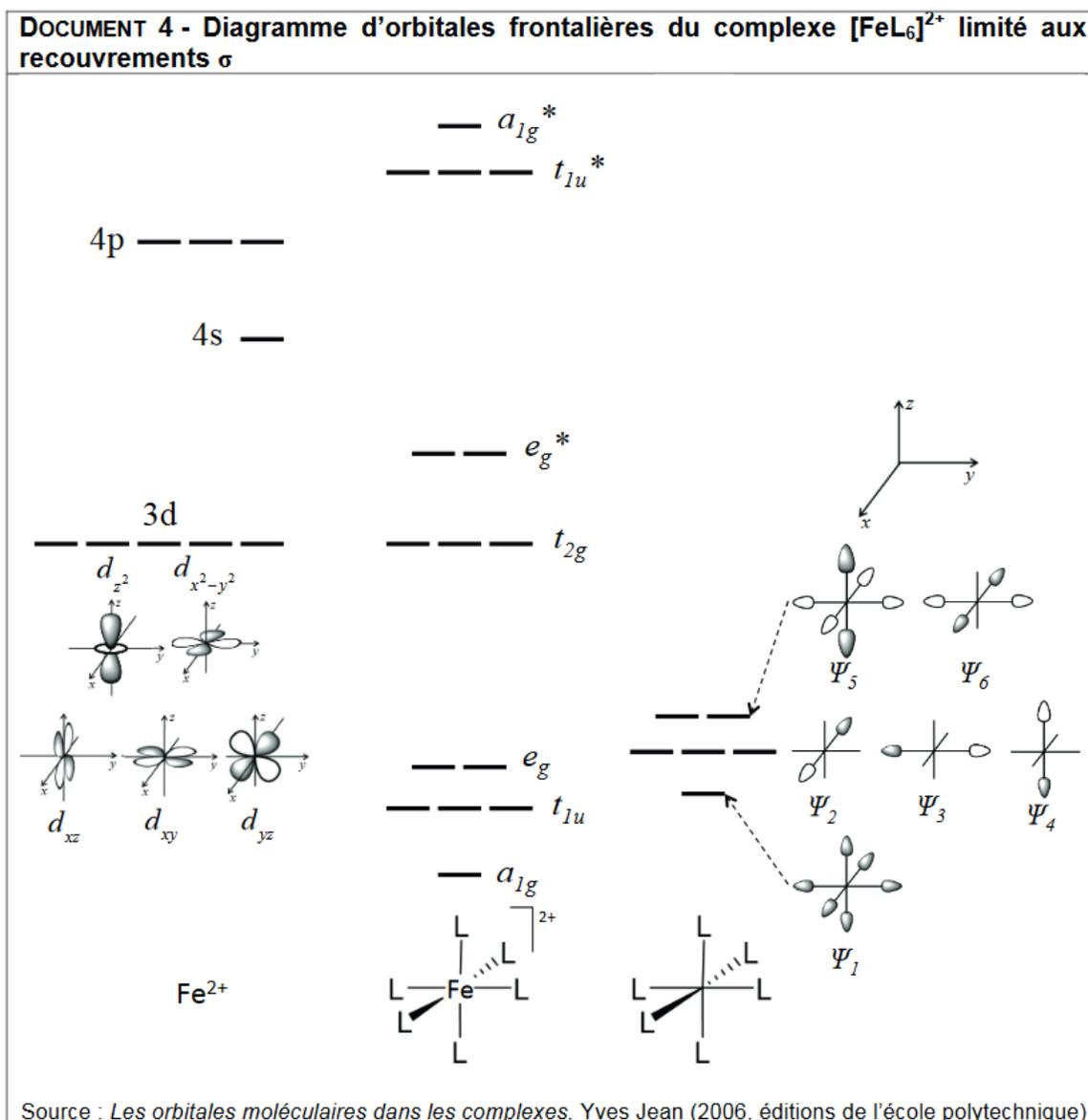
Nombres d'onde σ de vibration de quelques liaisons

liaison	OH	CH	C=C	C=O
σ (cm ⁻¹)	3 300 – 3 600	2 910 – 2 970	1 580 – 1 620	1 710 – 1 750

II) Diagramme énergétique d'un complexe de coordination [E3A PC 2022]

12. Établir la configuration électronique des ions Fe^{2+} ($Z = 26$) et Co^{3+} ($Z = 27$) dans leur état fondamental. (2)

On établit le diagramme d'orbitales frontalières d'un complexe modèle $[\text{FeL}_6]^{2+}$, avec L ligand monodentate sigma donneur. On considèrera en première approximation les seuls recouvrements σ entre les orbitales du métal et 6 orbitales de symétrie σ des ligands L. Le diagramme d'orbitales est établi à partir des orbitales du métal 3d, 4s et 4p, et des orbitales de fragment L_6 ($\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6$) en géométrie octaédrique (document 4).



13. A l'aide du document 4 identifier les orbitales de fragment ($\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6$) dont le recouvrement est non nul avec les orbitales 3d du métal. Pour ce faire, recopier

et compléter le tableau à double entrée suivant en indiquant dans chaque case S pour un recouvrement non nul et 0 pour un recouvrement nul.

Orbitales Métalliques	Orbitales Ligand					
	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	Ψ_5	Ψ_6
d_{xy}						
d_{xz}						
d_{yz}						
d_{z^2}						
$d_{x^2-y^2}$						

(5)

14. Recopier la partie du diagramme d'orbitales frontalières (document 4) en se limitant aux orbitales 3d, aux orbitales de fragment ($\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6$) et aux orbitales de complexe t_{2g} et e_g^{*}, et ajouter les lignes de corrélations et le remplissage électronique pour le complexe $[\text{FeL}_6]^{2+}$ dans l'hypothèse champ fort (bas spin).

(5)

III) Synthèse du chlorure d'or (III) [CCINP PC 2021]

L'un des principaux moyens d'obtention du chlorure d'or (III) au laboratoire est l'utilisation du complexe $\text{AuCl}_{4(aq)}^-$. L'or métallique n'est oxydé ni par de l'acide chlorhydrique ($\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{Cl}_{(aq)}^-$), ni par une solution aqueuse d'acide nitrique ($\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{NO}_{3(aq)}^-$). En revanche, un mélange de ces deux acides, appelé eau régale, permet d'oxyder partiellement l'or en complexe $\text{AuCl}_{4(aq)}^-$.

L'eau régale fut mentionnée pour la première fois dans une œuvre de Pseudo-Geber datée d'environ 1300. Historiquement, elle a été utilisée lors de la Seconde Guerre Mondiale par le chimiste hongrois George de Hevesy qui, voulant éviter le vol par les Nazis du prix Nobel en or de Max von Laue et James Franck, a dissous les deux médailles dans l'eau régale. La solution ainsi obtenue a permis plus tard de récupérer l'or pour refabriquer les deux médailles.

15. Justifier quantitativement que l'or métallique ne peut pas être oxydé par une solution d'acide nitrique d'un point de vue thermodynamique. Pour cela, on écrira notamment l'équation de la réaction la plus favorable thermodynamiquement et on calculera sa constante d'équilibre à 298 K. (4)

16. Déterminer, à partir des données, le potentiel standard du couple $\text{AuCl}_{4(aq)}^-/\text{Au}_{(s)}$ à 298 K. Détailler la démarche. En déduire que l'or métallique ne peut pas être oxydé par de l'acide chlorhydrique, en adoptant la même démarche que précédemment. (6)

17. Déduire qualitativement pourquoi l'eau régale peut oxyder l'or d'un point de vue thermodynamique et écrire l'équation de réaction correspondante. (2)

18. À l'aide du tracé de courbes de courant-potentiel appropriées, justifier si l'oxydation de l'or par l'eau régale présente ou non un blocage cinétique. (4)

La figure 2 représente le graphique donnant l'évolution des pourcentages des différents complexes $\text{AuCl}_x(\text{HO})_{y(aq)}^-$ (où les indices x et y sont des entiers positifs ou nuls tels que $x + y = 4$) en fonction du pH , les lettres de A à E étant relatives à chacun des complexes :

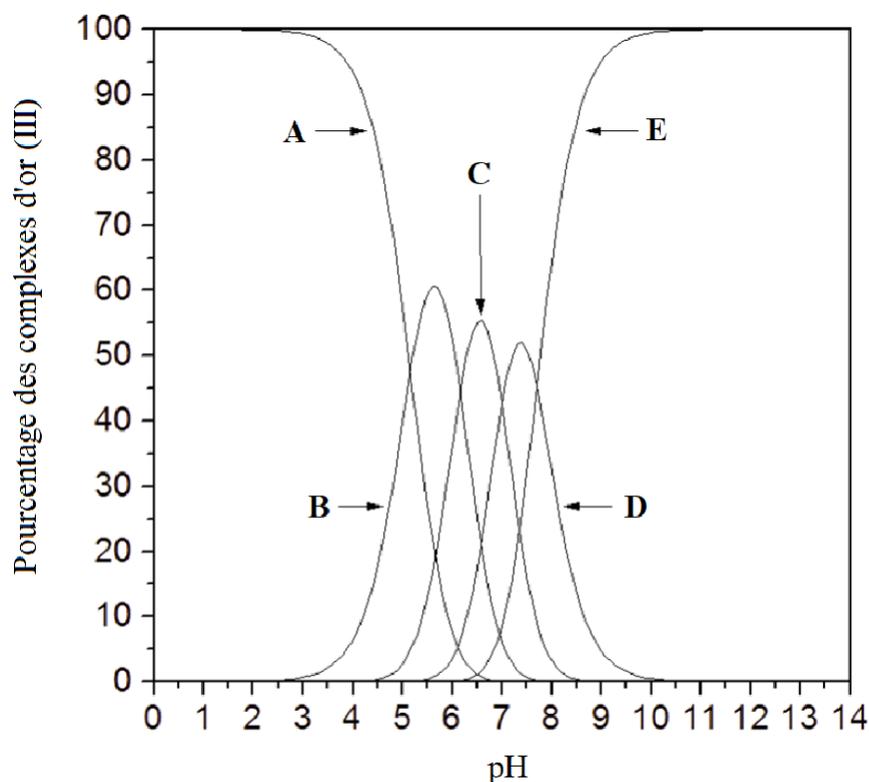


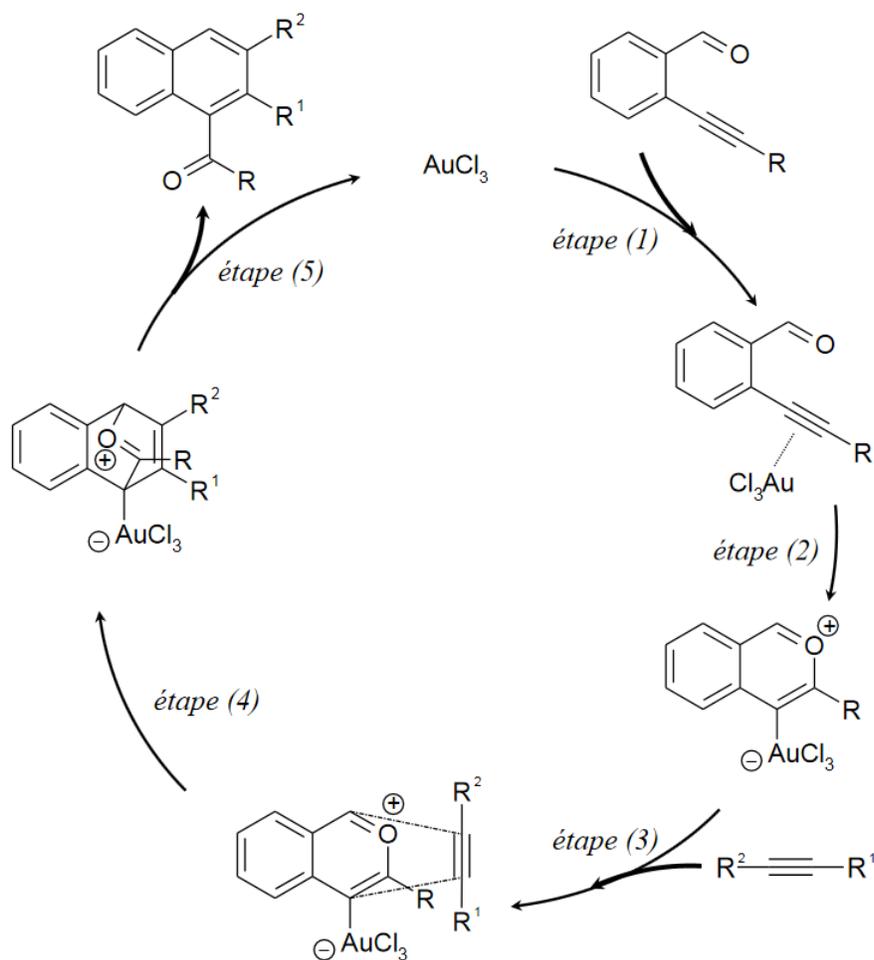
Figure 2

19. Donner, en justifiant succinctement, la formule de chacune des espèces chimiques A à E apparaissant sur le graphique de la figure 2. Quel intervalle de pH à l'équilibre est compatible avec la prédominance du complexe AuCl_4^- en solution ? (3)

À l'échelle industrielle, la synthèse du complexe AuCl_4^- est réalisée dans un réacteur, préalablement vidé d'air, dans lequel un courant de dichlore gazeux en excès à la pression $P = 10$ bar est envoyé sur des copeaux d'or, l'enceinte étant maintenue à une température constante de 250 °C. La réaction, très rapide, permet la synthèse de l'espèce AuCl_3 gazeuse qui est entraînée par le courant de dichlore gazeux dans un tube incliné menant à un réservoir réfrigéré à température ambiante où se dépose le solide AuCl_3 , l'excès de dichlore gazeux étant recyclé vers le réacteur. À partir de 100 g d'or métallique, on obtient 121 g de chlorure d'or AuCl_3 solide (identifié par diffraction des rayons X). $\text{AuCl}_{3(s)}$ est ensuite transformé quantitativement en $\text{AuCl}_{4(aq)}^-$ par dissolution en milieu aqueux chlorhydrique concentré.

20. À partir entre autres des données, discuter du choix de la température de 250 °C maintenue dans l'enceinte du réacteur lors de la synthèse du chlorure d'or (III). (2)
21. Justifier les conditions de pression élevée utilisées dans l'enceinte du réacteur permettant la synthèse quantitative du chlorure d'or (III). (2)
22. Calculer et commenter le rendement obtenu lors de la synthèse. (2)

Le chlorure d'or (III) sous sa forme AuCl_3 peut servir de catalyseur lors de synthèses organiques, telle que la synthèse de cétones aromatiques à partir d'alcynes proposée par Y. Yamamoto en 2002 et dont le cycle catalytique est représenté ci-dessous :



- Écrire l'équation de la réaction décrite par ce cycle catalytique. (2)
- Proposer un mécanisme à l'aide du formalisme des flèches courbes pour l'étape (2). (2)
- Préciser le nom de la réaction à laquelle s'apparente l'étape (4). (2)
- Proposer un mécanisme concerté à l'aide du formalisme des flèches courbes pour l'étape (5) et préciser, en justifiant, si cette étape (5) pourrait ou non être qualifiée d'élimination réductrice. (3)

Données

Numéros atomiques

Élément	H	C	N	O	Cl	Xe
Z	1	6	7	8	17	54

Masses molaires atomiques

Élément	H	C	O	Si	Cl	K	Au
M (g·mol ⁻¹)	1,0	12,0	16,0	28,1	35,5	39,1	197,0

Enthalpies standard de formation (supposées indépendantes de la température)

Espèce	Cl _{2(g)}	Au _(s)	AuCl _{3(g)}
Δ _f H° (kJ·mol ⁻¹)	0	0	-115

Constantes d'acidité (supposées indépendantes de la température)

Couple	pK _a
H ₂ AuCl _{4(aq)} /AuCl _{4⁻(aq)}	< 0
HCOOH _(aq) /HCOO ⁻ _(aq)	3,8

Constante de formation globale de AuCl_{4⁻(aq)} à 298 K : β₄ = 10³⁰

Potentiels standard (supposés indépendants de la température)

Couple	H ₃ O ⁺ _(aq) /H _{2(g)}	NO _{3⁻(aq)} /NO _(g)	Cl _{2(g)} / Cl ⁻ _(aq)	Au ³⁺ _(aq) /Au _(s)
E° (V)	0	0,96	1,36	1,50

Surtensions cathodiques en réduction (surtensions anodiques supposées nulles)

Couple	H ₃ O ⁺ _(aq) /H _{2(g)} sur Au	NO _{3⁻(aq)} /NO _(g) sur Au
η (V)	- 0,31	- 0,02

Constante de Faraday : F = 9,65 · 10⁴ C · mol⁻¹

Constante d'Avogadro : N_A = 6,02 · 10²³ mol⁻¹

Constante des gaz parfaits : R = 8,31 J · K⁻¹ · mol⁻¹

À 298 K : RTln(10)/F = 0,06 V

IV) Hydrométallurgie du cuivre [E3A PC 2018]

Le cuivre est présent dans l'écorce terrestre à la concentration de 50 parties par million environ. Aujourd'hui il n'existe plus à l'état natif comme dans l'Antiquité mais sous forme de sels mélangés à d'autres métaux comme l'or et l'argent. Les minerais de cuivre se présentent sous forme de minerais sulfurés ou de minerais oxydés. Les minerais sulfurés sont les plus répandus et représentent plus de 80 % de la production de cuivre qui est très principalement obtenu par pyrométallurgie. Nous nous intéressons dans cette partie à l'élaboration du cuivre à partir des minerais oxydés par voie humide aussi appelée hydrométallurgie (DOCUMENT 1).

DOCUMENT 1 – HYDROMETALLURGIE DU CUIVRE

L'hydrométallurgie du cuivre représente 20 % de l'élaboration du cuivre et concerne les minerais dits oxydés du cuivre. Ces minerais sont essentiellement des carbonates ayant subi une oxydation par l'eau et l'air. Il s'agit très principalement de malachite ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$).

La première phase du procédé est appelée lixiviation. Elle correspond à la mise en solution du cuivre à partir du minerai. Si la gangue (minerai ne présentant pas d'intérêt et entourant les sels de cuivre) est peu attaquée par l'acide sulfurique H_2SO_4 , c'est ce dernier qui est utilisé pour solubiliser les sels ou oxydes de cuivre. Lorsque la teneur du minerai atteint plus de 0,7 %, le minerai subit un broyage important (particules de diamètre inférieur à $75 \mu\text{m}$) puis est mis en suspension, par agitation, dans une solution d'acide sulfurique ($0,8 \text{ mol/L}$). Les composés solubles dans l'acide sulfurique dilué, et en particulier ceux du cuivre, passent en solution. En deux à cinq heures, plus de 95 % des oxydes du cuivre passent en solution qui titre environ 70 g/L en ions Cu^{2+} . La teneur résiduelle en acide est de l'ordre de 20 g/L . Cette étape conduit à l'obtention d'une boue contenant la gangue insoluble et différents résidus et d'une solution d'acide sulfurique et de sulfate de cuivre (Cu^{2+} , SO_4^{2-}) ainsi que d'autres ions métalliques minoritaires (principalement du fer présent à environ 5 % en masse dans les minerais). Dans le cas de gangues riches en carbonates (cas des roches calcaires par exemple), la mise en solution est réalisée en milieu basique à l'aide d'une solution aqueuse d'ammoniac.

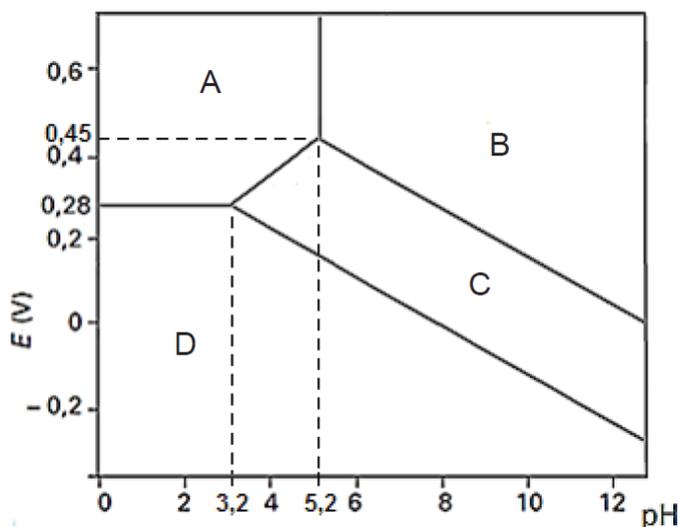
La solution est ensuite partiellement purifiée de certaines impuretés et notamment des ions fer présents (l'élimination des ions fer est indispensable car la présence d'ions ferreux Fe^{2+} et ferrique Fe^{3+} entraîne une forte baisse du rendement de courant lors de l'électrolyse du cuivre). Les ions Fe^{2+} sont oxydés en ions Fe^{3+} puis précipités, par augmentation du pH par ajout de chaux (oxyde ou hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$), sous forme d'hydroxyde de fer (III) $\text{Fe}(\text{OH})_3$ à $pH = 3,0-3,1$.

Après filtration, la solution, qui contient environ 15 g/L d'acide sulfurique et 70 g/L d'ions Cu^{2+} , subit alors une électrolyse, sous une tension de 2,0 à 2,5 V entre une anode en plomb (alliage à 6 % d'antimoine) de 100 kg, insoluble en milieu sulfurique, et une cathode en cuivre qui pèse initialement 5 kg. On parle d'électroextraction. La solution n'est que partiellement électrolysée : lorsque sa teneur atteint environ 25 g/L en Cu^{2+} , l'électrolyte est recyclé pour la lixiviation d'autres minerais. La concentration en acide est alors d'environ 80 g/L. L'élaboration d'un dépôt microcristallin compact de cuivre nécessite une densité de courant de l'ordre de 220 A.m^{-2} . La consommation électrique est importante : de 2000 à 2500 kWh par tonne de cuivre produite. L'électrode sur laquelle se dépose le cuivre est déchargée tous les 5 à 6 jours lorsqu'elle atteint 60 kg. Elle titre 99,8 % en cuivre et est utilisée sans raffinage ultérieur pour des usages non électriques pour lesquels le plomb serait une impureté gênante.

DOCUMENT 2 – DIAGRAMME POTENTIEL – pH DU CUIVRE

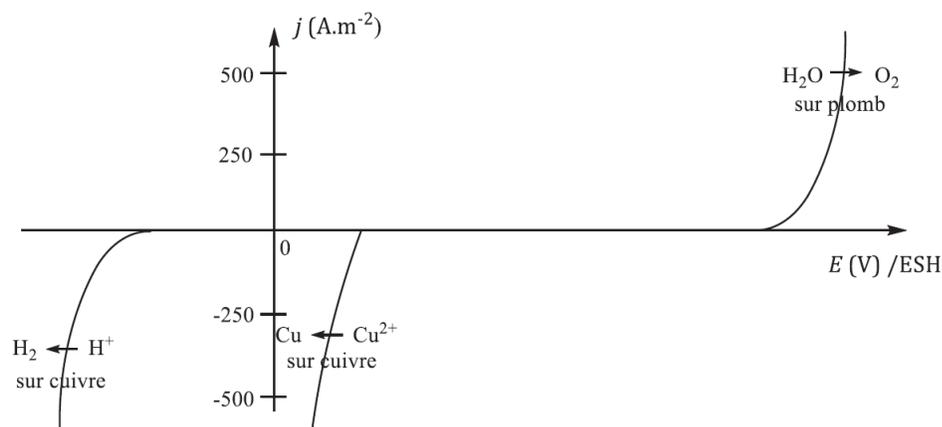
On donne ci-dessous le diagramme potentiel – pH du cuivre en présence d'eau à 25°C et à pression atmosphérique. Les potentiels électriques E sont exprimés en volt et les valeurs sont données par rapport à une électrode standard à hydrogène (ESH).

La convention de tracé des frontières est une concentration molaire à 10^{-2} mol/L pour chaque espèce dissoute.



DOCUMENT 3 – ALLURE DES COURBES COURANT – POTENTIEL

On donne ci-après l'allure des courbes courant surfacique – potentiel pour l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre entre anode en plomb et cathode en cuivre en milieu acide sulfurique.



- Couple ($\text{Cu}^+/\text{Cu}_{(s)}$) rapide sur cuivre.
- Surtension anodique seuil du dégagement de dioxygène sur plomb : 0,60 V.
- Surtension cathodique seuil du dégagement de dihydrogène sur cuivre : -0,50 V.

27. Expliquer pourquoi l'acide sulfurique (H_2SO_4) n'est pas utilisé pour la lixiviation de minerais riches en carbonates comme les roches calcaires qui contiennent CaCO_3 . (2)
28. Quel est l'intérêt de broyer fortement le minerai avant lixiviation ? (1)
29. Attribuer à chacun des domaines (A, B, C et D) du diagramme potentiel- pH du cuivre (DOCUMENT 2) l'espèce chimique du cuivre correspondante : $\text{Cu}_{(s)}$, $\text{Cu}_2\text{O}_{(s)}$, Cu^{2+} , $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$. Justifier brièvement l'attribution. (2)
30. Retrouver à partir du diagramme potentiel- pH la valeur du potentiel standard d'oxydoréduction du couple ($\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}_{(s)}$) à 25 °C . (3)
31. Retrouver à partir du diagramme potentiel- pH la valeur du produit de solubilité de l'hydroxyde de cuivre $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$ à 25 °C . (3)
32. Déterminer l'expression du pH de limite de précipitation d'un hydroxyde métallique de type $\text{M}(\text{OH})_z$ à partir d'une solution contenant des ions M^{z+} à la concentration C en fonction C , de $pK_e = -\log(K_e)$ et $pK_s = -\log(K_s)$ où K_e et K_s désignent respectivement le produit ionique de l'eau et produit de solubilité de l'hydroxyde métallique $\text{M}(\text{OH})_z$. (3)
33. À partir de la relation précédente, l'application numérique donne, à 25 °C et en tenant compte des concentrations des ions les pH de limite de précipitation suivants :
 - pour les ions Cu^{2+} : $pH = 4,2$;

- pour les ions Fe^{2+} : $pH = 6,5$;
- pour les ions Fe^{3+} : $pH = 1,6$.

Pourquoi est-il nécessaire d'oxyder les ions Fe^{2+} en ions Fe^{3+} avant ajout de chaux lors de l'étape de purification de la solution de sulfate de cuivre ?

(1)

34. Commenter la valeur de pH utilisé en pratique pour réaliser la purification de la solution. On discutera d'une part de l'efficacité de l'étape de purification (on estimera la concentration résiduelle en ions fer en solution) et d'autre part de la consommation en acide sulfurique.

(2)

35. Réaliser un schéma du montage utilisé lors de l'électroextraction du cuivre à partir de la solution acide de sulfate de cuivre. On précisera la cathode, l'anode ainsi que la polarité du générateur et le sens de passage du courant dans le circuit extérieur.

(4)

36. Compléter le schéma précédent en indiquant les demi-équations d'oxydoréduction se produisant respectivement à l'anode et à la cathode et indiquer sur les courbes courant – potentiel (DOCUMENT 3) les conditions de fonctionnement de l'électrolyseur en tenant compte de la densité de courant utilisée.

(3)

37. Expliquer pourquoi il est plus rentable d'un point de vue énergétique de réaliser l'électrolyse sur des solutions concentrées en ions Cu^{2+} plutôt que diluées.

(2)

38. Justifier l'ordre de grandeur des tensions utilisées pour réaliser l'électroextraction du cuivre. On supposera qu'il est possible d'assimiler potentiel d'équilibre et potentiel standard.

(1)

39. Relever dans la procédure d'hydrométallurgie les différentes références à la concentration à la solution d'acide sulfurique et expliquer son évolution au cours de la procédure. Proposer des équations de réaction pour chaque évolution.

(3)

Données :**Données numériques générales :**Masses molaires atomiques (en $g \cdot mol^{-1}$) :

<i>H</i>	<i>O</i>	<i>S</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Ag</i>
1,0	16,0	32,1	55,8	63,6	107,9

Constante des gaz parfaits : $R = 8,31 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ Constante d'Avogadro : $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} mol^{-1}$ **Données thermodynamiques à 25 °C :**Produit ionique de l'eau : $K_e = 1,0 \cdot 10^{-14}$ pK_a de couples acido-basiques en solution aqueuse :

H_3O^+/H_2O	$CO_2, H_2O/HCO_3^-$	HCO_3^-/CO_3^{2-}	H_2O/HO^-
0	6,3	10,3	14

L'acide sulfurique H_2SO_4 est assimilé à un diacide fort.Produits de solubilité K_s :

$Cu(OH)_2$	$Fe(OH)_2$	$Fe(OH)_3$
$2,2 \cdot 10^{-20}$	$4,9 \cdot 10^{-17}$	$2,8 \cdot 10^{-39}$

Données électrochimiques à 25 °C :Constante de Faraday : $\mathcal{F} = 9,65 \cdot 10^4 C \cdot mol^{-1}$ $\alpha = \frac{RT \ln 10}{\mathcal{F}} = 0,06 V$

Potentiels standards d'oxydoréduction (à pH = 0) :

Couple Ox/Red	$H^+_{(aq)}/H_{2(g)}$	$Cu^{2+}_{(aq)}/Cu_{(s)}$	$O_{2(g)}/H_2O_{(l)}$
$E^\circ (V/ESH)$	0	+ 0,34	+ 1,23