

CHIMIE

(Durée 3 heures 30)

L'usage d'une calculatrice est interdit pour cette épreuve.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Cette épreuve est constituée de deux problèmes indépendants comprenant, chacun, des parties indépendantes.

*Le sujet comporte deux annexes imprimées sur feuilles séparées.
Les diagrammes et représentations graphiques doivent être collés sur la copie.*

Premier problème

LA SIDERITE

La sidérite de formule brute FeCO_3 est un carbonate de fer (II). Commune dans les roches sédimentaires et dans les veines hydrothermales, la sidérite est très présente à l'intérieur des sols (sédiments lacustres, estuaires, sources riches en carbonates) et s'étend jusqu'aux sous-sols profonds (roches, minéraux et sédiments). Elle a aussi été identifiée dans les matériaux extraterrestres (météorites, poussières interplanétaires).

Données à 298 K

Attention, certaines valeurs numériques ont été volontairement arrondies ou simplifiées afin de pouvoir traiter cette épreuve sans calculatrice.

Enthalpies standard de formation $\Delta_f H^\circ$ et entropies molaires standard S_m° .

On suppose ces données indépendantes de la température.

Formule	$\text{FeCO}_3(\text{s})$	$\text{FeO}(\text{s})$	$\text{CO}_2(\text{g})$
$\Delta_f H^\circ$ en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	-740	-260	-393
S_m° en $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$	93	58	214

Les gaz seront assimilés à des gaz parfaits.

1 bar = 10^5 Pa.

Constante des gaz parfaits $R \approx 8,0 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

Valeurs numériques utilisables : $e^{\frac{5}{8}} \approx 2,0$; $\ln 2 \approx 0,69$; $\log 2 \approx 0,30$; $\ln 10 \approx 2,3$; $\frac{1}{4} \approx 10^{-0,6}$

I – Décomposition thermique de la sidérite

La décomposition de la sidérite joue un rôle important dans l'extraction du fer et dans la composition minérale des météorites. Cette décomposition est ici modélisée par l'équilibre hétérogène simplifié



On prendra $T = 500 \text{ K}$.

- I-1.** Déterminer la valeur de la constante d'équilibre thermodynamique (à $T = 500 \text{ K}$) de la réaction de décomposition thermique de la sidérite. En déduire la pression de dioxyde de carbone à l'équilibre.
- I-2.** Justifier qualitativement le signe de l'entropie standard de réaction.
- I-3.** Quelle est l'influence de la température sur cet équilibre ? Justifier brièvement.
- I-4.** Dans un récipient de 10 L vide d'air, on introduit à 500 K, n mol de carbonate de fer. Donner l'allure de la courbe donnant la pression P dans l'enceinte en fonction de n (n variant de 0 mol à 1,0 mol). Justifier brièvement.
- I-5.** Définir la variance d'un système physico-chimique et commenter brièvement le résultat.
- I-6.** Déterminer la variance du système pour chaque domaine de la courbe.
- I-7.** On introduit initialement, à 500 K, 1 mol d'oxyde de fer FeO et 1 mol de dioxyde de carbone gazeux dans un récipient de 10 L vide d'air.
- I-7.a-** Quel est le signe de l'affinité chimique initiale ? Justifier et conclure.
- I-7.b-** Déterminer l'état final du système à l'équilibre.

II – Étude de la solubilité de la sidérite

L'étude de la solubilité de la sidérite dans l'eau joue un rôle important dans la composition des lacs ou des eaux souterraines. Les eaux naturelles riches en fer doivent être traitées pour la distribution d'eau potable.

Données à 298 K :

Produit ionique de l'eau : $pK_e = 14,0$.

pK_a du couple $\text{CO}_2(\text{aq})/\text{HCO}_3^-$: $pK_{a_1} = 6,4$; pK_a du couple $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$: $pK_{a_2} = 10,3$

- II-8.** Le produit de solubilité de la sidérite $\text{FeCO}_3(\text{s})$ est $K_s = 10^{-11}$ à 25 °C. Que serait la solubilité de la sidérite dans l'eau en négligeant les propriétés acido-basiques des ions carbonate ? (Le résultat sera mis sous la forme d'une puissance de dix.) Montrer à l'aide d'un calcul de pH que la réaction de l'eau sur les ions carbonate ne peut pas être négligée.
- II-9.** On cherche maintenant la solubilité de la sidérite en prenant en compte les propriétés acido-basiques des ions carbonate. Écrire l'équation de la nouvelle réaction prépondérante de dissolution de la sidérite et en déduire la solubilité. Vérifier la pertinence du choix de la nouvelle réaction prépondérante en calculant le pH de la solution saturée.
- II-10.** On s'intéresse maintenant à la dissolution du carbonate de fer dans une solution de pH fixé par une solution tampon ce qui est plus représentatif d'une eau naturelle.
- II-10.a-** Établir la relation entre la solubilité s de la sidérite avec la concentration en ions oxonium notée h , les constantes d'acidité K_{a_1} et K_{a_2} et le produit de solubilité de la sidérite.
- II-10.b-** En supposant que $[A]$ est négligeable devant $[B]$ si $[A] < [B]$, montrer que la courbe $\log s = f(\text{pH})$ peut être assimilée à trois portions de droite. Donner l'équation numérique de chaque segment.
- II-10.c-** Sur la partie réservée à cet effet sur l'annexe 1 (partie quadrillée du haut), tracer la courbe $\log s = f(\text{pH})$.
- II-11.** Étude de la solubilité de la sidérite en présence de dioxyde de carbone.
- Dans une solution saturée en carbonate de fer, en présence d'un large excès de FeCO_3 , on envoie un courant de dioxyde de carbone gazeux. L'apport de dioxyde de carbone gazeux est constant et fixe la concentration en dioxyde de carbone dissous telle que $[\text{CO}_2(\text{aq})] = 0,05 \text{ mol.L}^{-1} \approx 10^{-1,3} \text{ mol.L}^{-1}$.
- II-11.a-** Montrer que la solubilité de la sidérite va augmenter.
- II-11.b-** Quelle quantité de carbonate de fer peut-on dissoudre dans 1 L d'eau saturée en dioxyde de carbone ?

III – Étude d'une méthode de dosage du fer(II) dissous

Une méthode spectrophotométrique de routine de dosage des ions fer(II) dans les eaux souterraines utilise un complexe stable entre l'ion fer(II) et l'orthophénanthroline.

Données à 298 K

On prendra $(RT/F) \cdot \ln(x) = 0,06 \cdot \log(x)$

$E^{\circ}(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = 1,23 \text{ V}$ K_{s1} : produit de solubilité de $\text{Fe}(\text{OH})_3$: $pK_{s1} = 38$

A – Détermination de la formule du complexe fer(II)-orthophénanthroline

L'ion fer(II) donne avec l'orthophénanthroline (notée ophen) un ion complexe de formule $[\text{Fe}(\text{ophen})_p]^{2+}$.

Il est possible de déterminer la valeur de l'indice de coordination p par spectrophotométrie en étudiant l'absorbance A de solutions obtenues en mélangeant des solutions (stabilisées et tamponnées vers $\text{pH} = 3,5$) de sel de Mohr (sulfate d'ammonium-fer(II) hexahydraté $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et d'orthophénanthroline toutes les deux à la concentration $c = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-dessous. On note $V(\text{Fe}^{2+})$ et $V(\text{ophen})$ respectivement les volumes versés de solution de sel de Mohr et de solution d'ophen. On définit également le rapport $r = V(\text{Fe}^{2+})/V_{\text{total}}$ dans lequel $V_{\text{total}} = 20 \text{ mL}$. L'absorbance est mesurée à 550 nm c'est à dire à la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption du complexe. On suppose que seul le complexe $[\text{Fe}(\text{ophen})_p]^{2+}$ absorbe à cette longueur d'onde et on néglige les propriétés basiques de l'orthophénanthroline.

$V(\text{Fe}^{2+})$ (mL)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
$V(\text{ophen})$ (mL)	18,0	17,0	16,0	15,0	14,0	13,0	12,0
A	0,50	0,75	1,0	1,25	1,17	1,08	1,0
r	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40

La réaction de complexation est supposée *quantitative*.

III-12. Rappeler la loi de Beer-Lambert.

III-13. Exprimer l'absorbance de la solution dans le cas où $n_0(\text{ophen}) \geq p \cdot n_0(\text{Fe}^{2+})$. L'absorbance sera exprimée en fonction du coefficient d'absorption molaire du complexe ε , de la longueur de la cuve utilisée ℓ , de c et de r .

III-14. Exprimer l'absorbance de la solution dans le cas où $n_0(\text{ophen}) \leq p \cdot n_0(\text{Fe}^{2+})$ en fonction, entre autres, des grandeurs utilisées à la question précédente.

III-15. Quelle particularité présente la courbe $A = f(r)$ lorsque $n_0(\text{ophen}) = p \cdot n_0(\text{Fe}^{2+})$? Exprimer alors $p = f(r)$ en ce point.

III-16. Sur la partie réservée à cet effet sur l'annexe 1 (partie quadrillée du bas), tracer la courbe $A = f(r)$ à l'aide des valeurs expérimentales et en déduire l'indice de coordination p .

III-17. À l'aide des valeurs des deux potentiels standard donnés ci-dessous, justifier l'hypothèse selon laquelle la formation du complexe $[\text{Fe}(\text{ophen})_p]^{2+}$ est considérée quantitative.

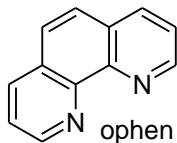
$$E_{\text{A}}^{\circ} = E^{\circ}(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) = 0,77 \text{ V} \text{ et } E_{\text{B}}^{\circ} = E^{\circ}(\text{Fe}^{3+}/[\text{Fe}(\text{ophen})_p]^{2+}) = 2,03 \text{ V}$$

III-18. On cherche dans cette question à comprendre la valeur de cet indice de coordination.

III-18.a- Donner les configurations électroniques, à l'état fondamental, de l'atome de fer ($Z = 26$), de l'ion fer(II) et du krypton ($Z = 36$) qui est le gaz noble qui suit le fer dans la classification périodique.

III-18.b- Sachant que l'ion fer(II) cherche à acquérir la structure électronique de valence du krypton, combien lui manque-t-il d'électrons ?

III-18.c- L'orthophénanthroline est représentée ci-dessous. À quel nombre de liaisons ligand/cation métallique participe chaque molécule d'orthophénanthroline ? Expliquer et justifier la valeur de p .



B – Dosage d'une eau souterraine

Afin de doser les ions fer(II) dans une eau souterraine, on utilise la procédure décrite ci-dessous.

À $V_1 = 50,0$ mL d'eau souterraine à doser, on ajoute 25 mL de solution tampon $\text{pH} = 3,5$ et 25 mL d'une solution d'hydroxylamine (qui joue le rôle d'antioxydant). On ajoute alors à la microburette des volumes connus v de solution d'orthophénanthroline de concentration $c_{\text{ophen}} = 0,0100 \text{ mol.L}^{-1}$ et on mesure à 550 nm l'absorbance de la solution obtenue pour chaque valeur de v .

Le volume équivalent est déterminé à partir de la courbe $A = f(v)$: on obtient $v_{\text{éq}} = 3,0$ mL.

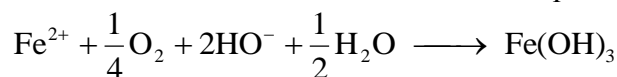
III-19. Déterminer les expressions de l'absorbance A en fonction de v pour $v < v_{\text{éq}}$ et pour $v > v_{\text{éq}}$. On notera $V_0 = 100$ mL le volume total initial.

III-20. Pourquoi avoir choisi $V_0 \gg v_{\text{éq}}$? En déduire l'allure de la courbe $A = f(v)$. Comment repère-t-on le volume équivalent sur la courbe $A = f(v)$?

III-21. Déterminer la concentration en ions fer(II) dans l'eau souterraine. Le résultat sera exprimé en mmol.L^{-1} .

IV – Cinétique de la réaction entre le dioxygène et Fe^{2+}

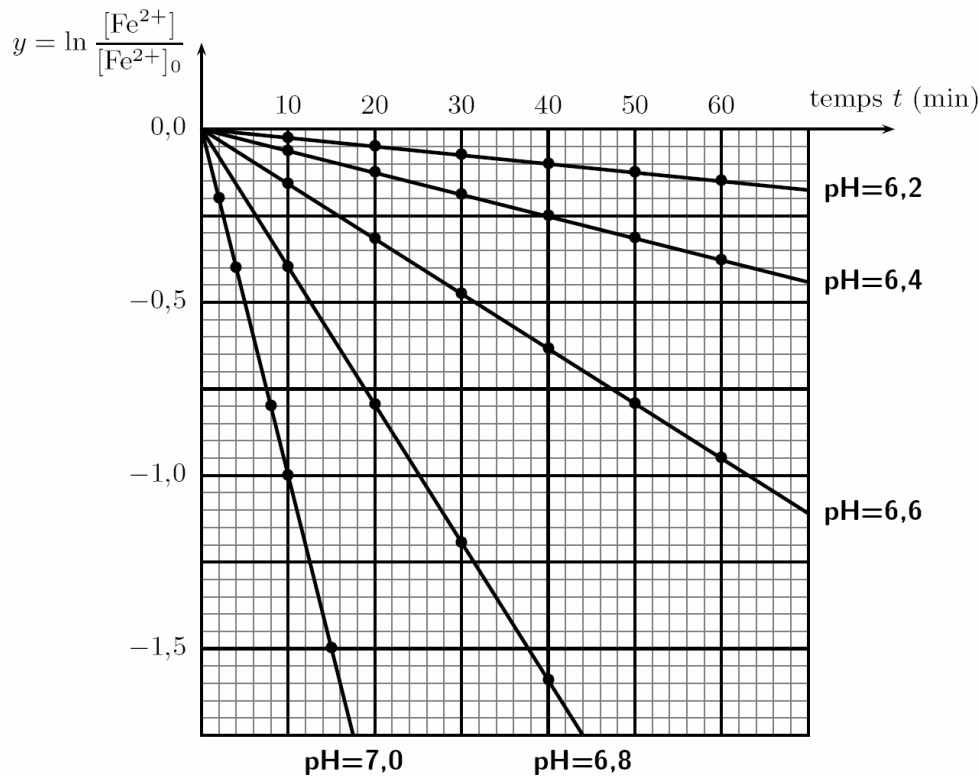
On s'intéresse à la cinétique de la réaction d'oxydation de Fe(II) en Fe(III) par O_2 qui joue un grand rôle dans le cycle du fer dans les eaux des lacs ou les eaux souterraines. L'équation de la réaction sera écrite :



Pour déterminer la vitesse d'oxydation dans les conditions des eaux naturelles, le système tampon des eaux naturelles a été choisi c'est-à-dire qu'un mélange de gaz $\text{O}_2/\text{CO}_2/\text{N}_2$ dont la composition est fixée barbote dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium à $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$. La température est constante et égale à 25°C . Les concentrations sont choisies de telle sorte que FeCO_3 ne précipite pas et comme la concentration en dioxygène dissous est proportionnelle à la pression partielle *fixée* en dioxygène ($[\text{O}_{2(\text{aq})}] = k_H \cdot p_{\text{O}_2}$) on cherchera à montrer que la vitesse de disparition de Fe^{2+} peut se mettre sous la forme :

$$v = k \cdot [\text{Fe}^{2+}]^\alpha [\text{HO}^-]^\beta$$

Différentes expériences sont menées à différents pH constants et à pression partielle constante en dioxygène ($p_{\text{O}_2} = 0,2$ bar). Les résultats sont présentés dans le graphique ci-après sur lequel on a représenté les courbes $\ln([\text{Fe}^{2+}]/[\text{Fe}^{2+}]_0)$ en fonction du temps t pour chacune des expériences menées à différents pH . On donne également les modélisations de ces courbes.



Modélisation des courbes (t en minutes)

$$\begin{aligned} \text{\AA } pH = 6,2, & \quad y = -10^{-2,6} \cdot t \\ \text{\AA } pH = 6,4, & \quad y = -10^{-2,2} \cdot t \\ \text{\AA } pH = 6,6, & \quad y = -10^{-1,8} \cdot t \\ \text{\AA } pH = 6,8, & \quad y = -10^{-1,4} \cdot t \\ \text{\AA } pH = 7,0, & \quad y = -10^{-1,0} \cdot t \end{aligned}$$

IV-22. Montrer *clairement* que l'examen d'une seule des cinq expériences permet de déterminer un des deux ordres partiels α ou β . Déterminer cet ordre partiel.

IV-23. À l'aide d'une représentation graphique qui sera effectuée sur la partie quadrillée de l'annexe 2 à coller sur la copie, déterminer l'ordre partiel manquant. La procédure sera clairement explicitée.

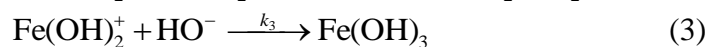
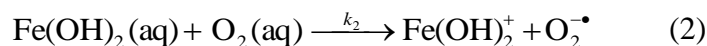
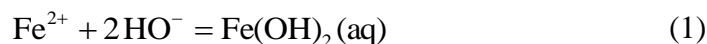
IV-24. Que vaut la constante de vitesse k dans les conditions de l'expérience ($\theta = 25^\circ\text{C}$ et $p_{\text{O}_2} = 0,2$ bar) ?

IV-25. Au laboratoire, les solutions de fer(II) sont conservées en milieu acide. Interpréter ce mode de conservation, en particulier, calculer les temps de demi-réaction à $\text{pH} = 6$ et à $\text{pH} = 4$.

IV-26. Que faudrait-il faire pour évaluer l'influence de la pression partielle en dioxygène sur la cinétique de cette réaction ?

IV-27. Une *partie* du mécanisme de la réaction étudiée est proposée ci-dessous. On précise que la première étape constitue un équilibre rapidement établi de constante d'équilibre K^0 tandis que la deuxième étape de constante de vitesse k_2 est l'étape cinétiquement déterminante.

$\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{aq})$ représente une espèce solubilisée.

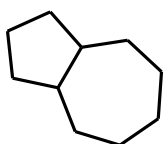


Montrer que cette partie de mécanisme est compatible avec les résultats expérimentaux. Quelle serait l'influence de la pression partielle en dioxygène selon ce mécanisme ?

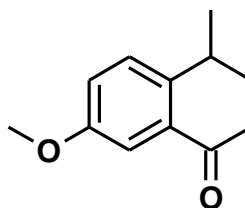
CHIMIE

Second problème : SYNTHÈSE D'UN PSEUDOGUAIANOLIDE

Plus de 2 500 produits naturels contenant le squelette bicyclo[5.3.0]décane ont été isolés à partir de plantes (notamment des sesquiterpènes à 15 atomes de carbone). Un grand nombre de ces produits naturels ont des activités variées et importantes, et certains d'entre eux sont couramment utilisés en médecine ou en recherche médicale. Par exemple, les pseudoguaianolides qui appartiennent à la classe des sesquiterpènes lactones (STL) ont très tôt été utilisés à des fins médicinales, probablement depuis la naissance de la pharmacothérapie primitive (certains chimpanzés sauvages reconnaissent le potentiel thérapeutique de plantes contenant des STL, en les utilisant comme agents anti-infectieux lors d'attaques parasitaires). On s'intéresse à la synthèse d'un de ces composés.



squelette bicyclo[5.3.0]décane

4-méthyl-7-méthoxytétralone **A**

V – Synthèse du squelette bicyclo[5.3.0]décane

Dans un ballon bicol, muni d'une ampoule de coulée isobare (à tubulure latérale de compensation de pression) et d'un réfrigérant à boules surmonté d'une garde à chlorure de calcium, on introduit un barreau magnétique et 1,2 équivalents (1,2 éq.) de zinc Zn(s) activé. On ajoute alors sous agitation et au goutte à goutte une solution composée d'un mélange de 4-méthyl-7-méthoxytétralone **A** (1 éq.), de tétrahydrofurane (THF) anhydre et de 2-bromoéthanoate d'éthyle (1 éq.). À la fin de l'addition, le ballon est chauffé pendant 2 heures de manière à maintenir un léger reflux à l'aide d'un bain d'huile thermostaté à 85 °C puis le mélange est refroidi dans un bain d'eau glacée.

On ajoute alors par l'ampoule de coulée une solution aqueuse glacée à 10 % d'acide sulfurique. À l'aide d'une ampoule à décanter, on recueille la phase organique, on la traite par une solution aqueuse de carbonate de sodium à 10 % (on observe alors un dégagement gazeux) puis elle est lavée à l'aide d'eau distillée. La phase organique est alors séchée et le solvant est éliminé. On recueille un composé liquide **B**.

On signale que le 2-bromoéthanoate d'éthyle mélangé à de la poudre de zinc donne un dérivé organozincique comparable à un organomagnésien mixte mais moins réactif.

V-28. Donner la formule semi-développée ou topologique du 2-bromoéthanoate d'éthyle ainsi que la formule de l'organozincique intermédiaire.

V-29. Faire un schéma soigné et légendé du dispositif expérimental dans lequel se déroule la synthèse.

V-30. Proposer, par analogie avec le schéma réactionnel d'une synthèse magnésienne, celui de la synthèse de **B**.

V-31. Pourquoi cette synthèse ne peut pas être effectuée avec du magnésium à la place du zinc ?

V-32. À l'aide d'une équation de réaction, préciser le rôle de la solution de carbonate de sodium.

V-33. Comment la phase organique est-elle séchée ? Comment peut-on « éliminer » le solvant ? (*on demande une réponse rapide et non détaillée à cette question*)

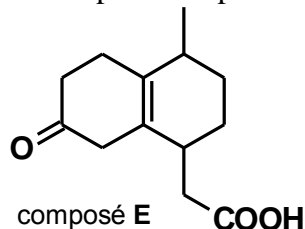
La synthèse se poursuit par la déshydratation du composé **B** suivi d'une hydrogénation catalytique (le catalyseur est du palladium supporté par du carbone). On obtient le composé **C** possédant, entre autres, une fonction ester. Ce dernier est traité à chaud par une solution d'hydroxyde de potassium. Après

réaction et passage en milieu acide du milieu réactionnel on recueille un solide **D** qui est isolé, purifié et dont la température de fusion vaut 81,5 °C.

V-34. Donner les structures des composés **C** et **D**.

V-35. Comment peut-on purifier **D** ? Pourquoi et comment mesure-t-on sa température de fusion ? (*On demande une réponse rapide et non détaillée à cette question.*)

Un traitement particulier de **D** (réduction à l'aide de lithium dans l'ammoniac liquide en présence de 2-méthylpropan-2-ol et de THF) conduit au composé **E** représenté ci-après.



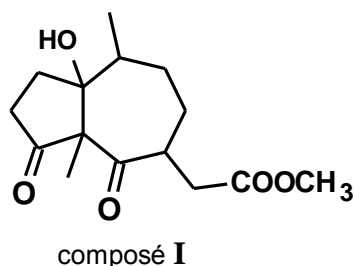
E est traité par le chlorure de thionyle SOCl_2 . On obtient **F** qui est mis en présence de méthanol. Le composé **G** obtenu subit alors l'action de l'ozone à -86 °C suivie d'un léger traitement réducteur.

Le composé **H** est extrait.

V-36. Donner les structures des composés **F**, **G** et **H**.

V-37. Proposer un mécanisme pour la formation de **G**.

H est traité à chaud pendant 4 heures par du carbonate de potassium et de l'iodométhane dans l'acétone. On obtient le composé **I** représenté ci-dessous. Cette étape constitue l'étape clé de la synthèse du squelette bicyclo[5.3.0]décane.



V-38. La première étape du mécanisme de formation de **I** est la formation d'un ion énolate. Lequel et pourquoi ?

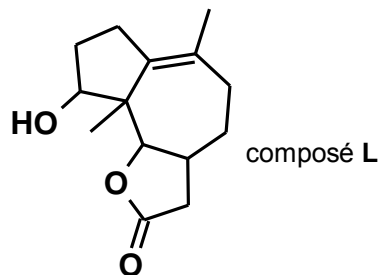
V-39. Proposer un mécanisme de formation de **I** à partir de **H**.

I est déshydraté en milieu acide dans des conditions telles que la fonction ester n'est pas réactive. On isole très majoritairement le composé **J**.

V-40. Donner la structure de **J**.

VI – Obtention du pseudoguaianolide

Le composé **J** est ensuite traité par un composé qui permet la réduction *sélective* des fonctions cétones en alcool. On obtient le composé **K** qui en milieu acide conduit au composé **L** dont la structure est donnée ci-après.



VI-41. Donner la structure de **K**.

L'hydrogénation de **L** en présence de palladium suivie de l'oxydation du composé formé par le trioxyde de chrome CrO_3 permet d'isoler **M**.

VI-42. Identifier **M**.

VI-43. Le spectre RMN ^1H du composé **M** présente, entre autres, les signaux suivants (δ est le déplacement chimique) :

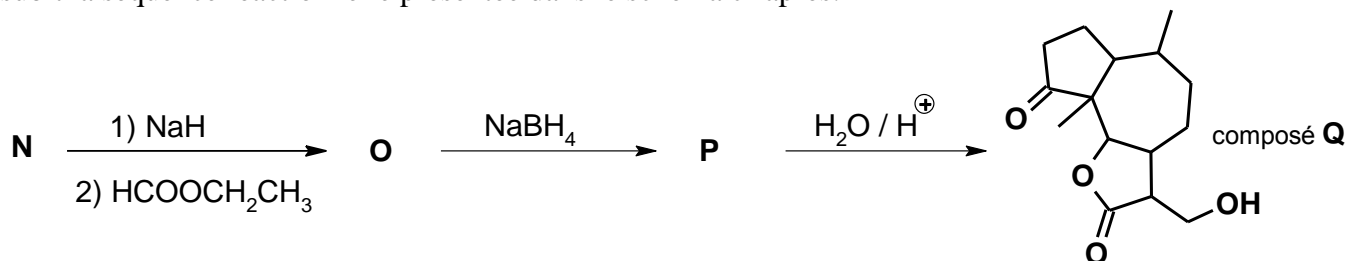
- $\delta = 1,08$ ppm, doublet, intégration 3H ;
- $\delta = 1,18$ ppm, singulet, intégration 3H ;
- $\delta = 4,55$ ppm, doublet, intégration 1H.

Identifier les protons correspondants à ces trois signaux dans la molécule **M** en justifiant brièvement. On donne les déplacements chimiques de divers protons en ppm, le TMS étant pris comme référence.

$\text{CH}_3\text{-C}$	$\text{CH}_3\text{-C-O}$	$\text{CH}_3\text{-CO-R}$	C-CH-O-CO-R	C-CH-O-R	C-CH-OH
0,9	1,4	2,2	4,8	3,7	3,9

R désigne un groupe alkyle.

M est ensuite traité pendant 2,5 heures dans le benzène par l'éthane-1,2-diol en excès en présence d'acide paratoluènesulfonique (APTS) en quantité catalytique. On extrait du milieu le composé **N** qui à son tour subit la séquence réactionnelle présentée dans le schéma ci-après.



VI-44. Donner une représentation de **N** (une écriture topologique est acceptée). Justifier l'emploi d'un excès d'éthane-1,2-diol.

VI-45. Pourquoi est-il préférable d'utiliser l'éthane-1,2-diol plutôt que l'éthanol lors du passage de **M** à **N** ?

VI-46. Sachant que le composé **O** possède une fonction aldéhyde, proposer un mécanisme permettant d'expliquer sa formation.

VI-47. Expliquer clairement l'intérêt de la conversion de **M** en **N**.

La fin de la synthèse consiste à traiter longuement et à chaud le composé **Q** par le chlorure de l'acide paratoluènesulfonique (ou chlorure de tosylole noté TsCl) dans la pyridine. On obtient un pseudoguaianolide **R** utilisé en chimiothérapie.



VI-48. Sachant qu'il se forme un composé intermédiaire appelé tosylate d'alkyle et que son mécanisme de formation est analogue à celui de la réaction des alcools sur les chlorures d'acyle, proposer un mécanisme de formation de ce composé intermédiaire.

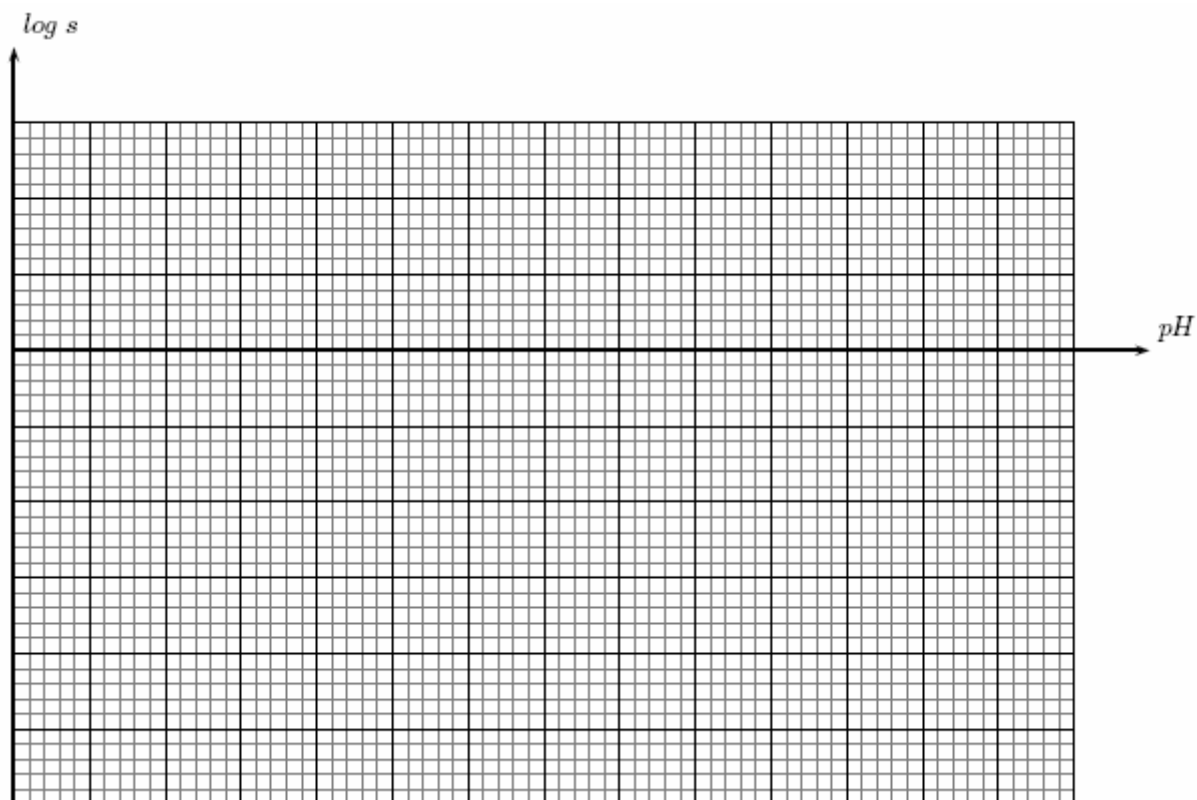
VI-49 Justifier que le groupe tosylate TsO- est un excellent groupe nucléofuge.

VI-50. Préciser les trois rôles joués par la pyridine.

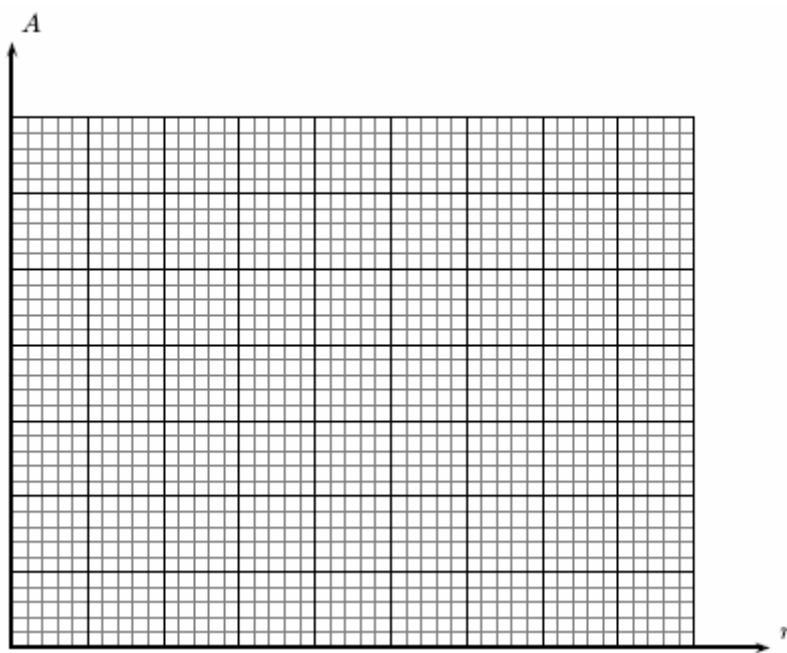
VI-51. Le composé final a pour formule brute $C_{15}H_{20}O_3$: donner sa structure. Quel type de réaction est effectué dans la dernière étape ?

FIN DE L'EPREUVE

ANNEXE 1 CHIMIE A-0309

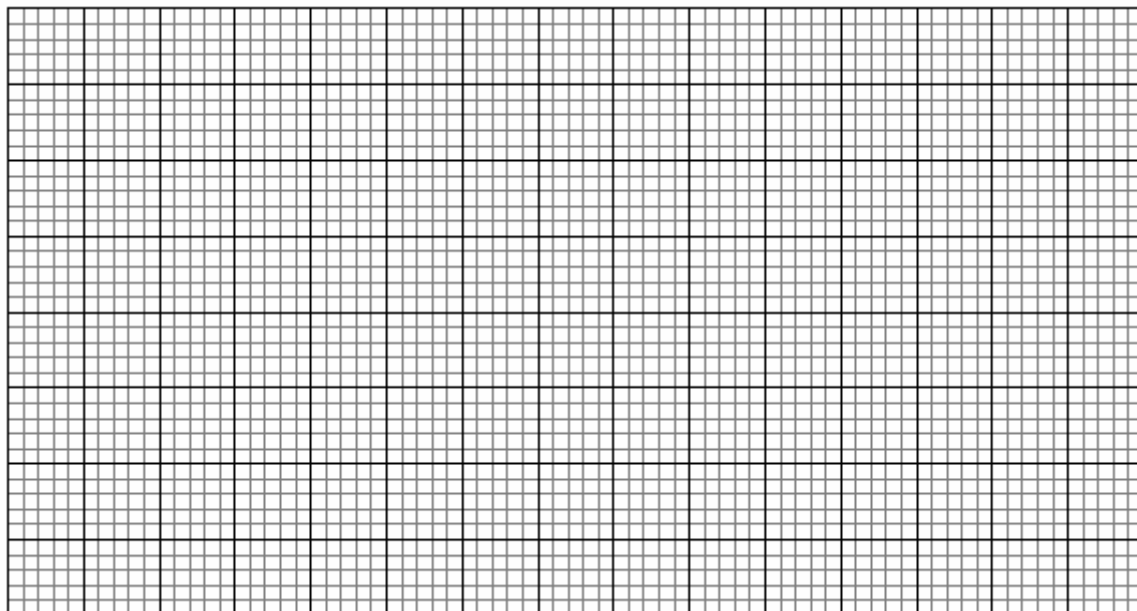


**Diagramme $\log s = f(pH)$ à tracer (question II-10.c-)
à coller sur la copie**



**Représentation graphique de la question III-16.
à coller sur la copie**

ANNEXE 2 CHIMIE A-0309



**Représentation graphique de la question IV-23.
à coller sur la copie**