

*L'utilisation de la calculatrice est AUTORISÉE pour cette épreuve.*

★ ★ ★

*Toute affirmation doit être rigoureusement justifiée. La précision, la clarté et la concision des réponses seront particulièrement appréciées.*

*Tous les résultats littéraux doivent être encadrés; les applications numériques, les phrases conclusives et les mots clés soulignés.*

★ ★ ★

*Ce sujet comporte 13 pages et quatre problèmes indépendants.*

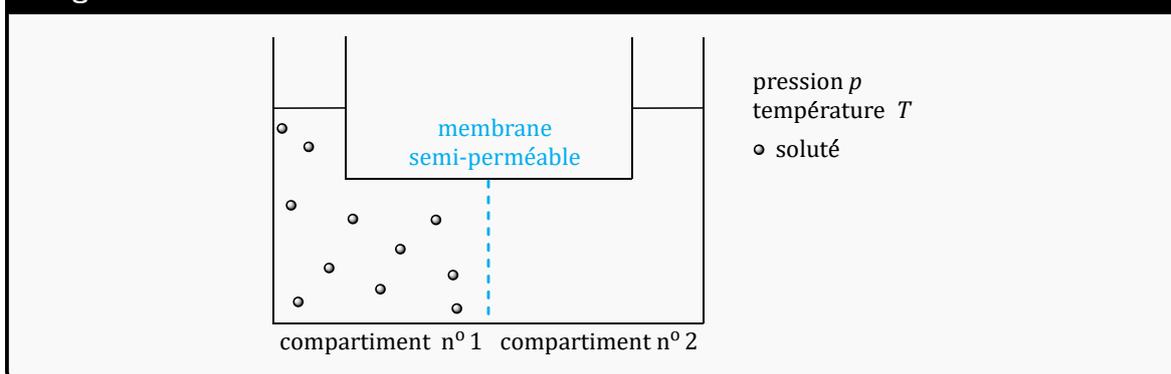
### Problème I : désalement de l'eau de mer

L'osmose est un phénomène de diffusion de la matière mis en évidence lorsque des molécules de solvant traversent une membrane semi-perméable séparant deux solutions dont les concentrations en soluté sont différentes. Le transfert de solvant se fait alors de la solution la moins concentrée en soluté vers la solution la plus concentrée jusqu'à l'équilibre.

Dans l'état initial schématisé sur la figure I.1, deux compartiments sont séparés par une membrane semi-perméable, le compartiment n° 1 contient de l'eau ainsi qu'un soluté et le compartiment n° 2 contient de l'eau pure.

L'eau peut traverser la membrane, contrairement au soluté.  $x_{\text{H}_2\text{O}(l)}$  représente la fraction molaire de l'eau dans le compartiment n° 1.

**Figure I.1 : état initial**



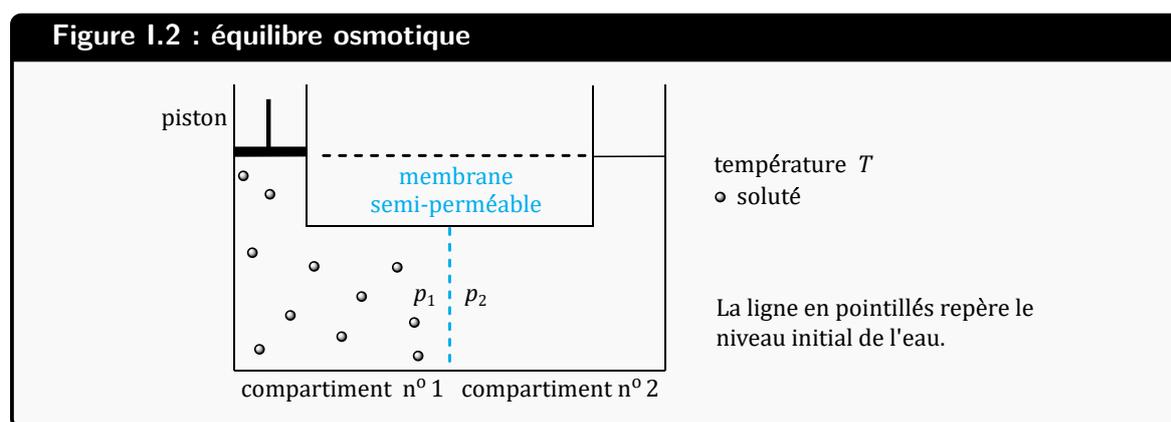
**I.1. Définir** le potentiel chimique  $\mu_i$  d'une espèce chimique  $i$ . **Établir** la relation suivante, où  $V_{m,i}^*$  est le volume molaire de l'espèce  $i$  pure et  $\mu_i^*$  le potentiel chimique de cette espèce pure.

$$V_{m,i}^* = \left. \frac{\partial \mu_i^*}{\partial p} \right|_T$$

**I.2. Exprimer** le potentiel chimique de l'eau du compartiment n° 1 noté  $\mu_{\text{H}_2\text{O}(l)}$  en fonction, entre autres de  $\mu_{\text{H}_2\text{O}(l)}^\circ(T, p^\circ)$ ,  $V_{m, \text{H}_2\text{O}}^*$  et  $x_{\text{H}_2\text{O}(l)}$ .

**I.3.** Par comparaison des potentiels chimiques, **prévoir** dans quel sens l'eau va passer au travers de la membrane.

De l'eau traverse la membrane semi-perméable jusqu'à ce que le système atteigne l'équilibre osmotique, schématisé sur le schéma de la figure I.2.



La pression osmotique  $\Pi$  est définie comme la différence de pression de part et d'autre de la membrane lorsque le système est à l'équilibre :  $\Pi = p_1 - p_2$ .

**I.4. Démontrer** la relation suivante, à l'équilibre entre les deux compartiments :

$$V_{m, \text{H}_2\text{O}}^* \Pi = -RT \ln(x_{\text{H}_2\text{O}(l), \text{éq}})$$

**I.5.** Dans le cas d'un soluté, **montrer**, en réalisant un développement limité à l'ordre 1 de la fonction logarithme népérien, que la pression osmotique  $\Pi$  s'exprime selon la relation  $\Pi = cRT$ . Dans cette relation,  $c$  est la concentration molaire du soluté en  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $T$  la température en K.

Cette expression peut être généralisée au cas où la solution contient plusieurs solutés à la concentration molaire  $c_i$ , la pression osmotique se mettant alors sous la forme :

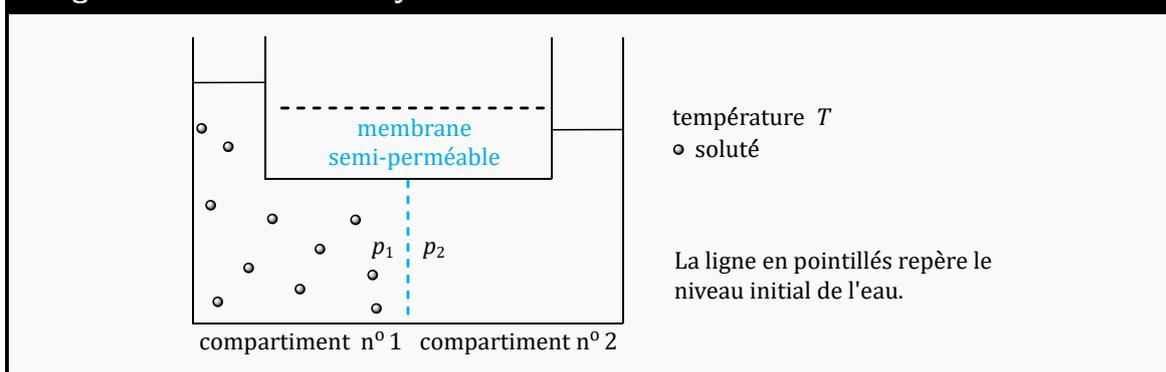
$$\Pi = \sum_i c_i RT$$

où  $p' = p_1 - p_2$ .

**I.6. Calculer** la pression osmotique dans le cas de l'eau de mer assimilée à une solution aqueuse de chlorure de sodium de concentration massique égale à  $35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  pour une température de  $25^\circ\text{C}$ .

Partant de l'état d'équilibre, on impose désormais à l'aide d'un dispositif externe une pression  $p'$  sur le compartiment n° 1 telle que  $p_1 = p_2 + p'$ . Cet état est schématisé sur la figure I.3.

Figure I.3 : évolution du système



**I.7. Exprimer** les potentiels chimiques  $\mu_{\text{H}_2\text{O}(1)}$  et  $\mu_{\text{H}_2\text{O}(2)}$  de l'eau dans les deux compartiments quand la surpression est appliquée mais avant tout transfert de matière.

**I.8. En déduire** la relation :

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}(1)} - \mu_{\text{H}_2\text{O}(2)} = V_{m,\text{H}_2\text{O}}^* (p' - \Pi)$$

**I.9. Indiquer** le sens du transfert de matière qui doit s'effectuer pour permettre le dessalement de l'eau de mer.

**I.10. Exprimer** la condition sur  $p'$  afin de pouvoir réaliser ce transfert de matière.

## Problème II : production d'acide sulfurique

Le procédé de contact est le mode de production industrielle d'acide sulfurique concentré actuellement le plus employé dans le monde. Il consiste en l'oxydation en phase gazeuse sous l'effet du dioxygène du dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  par le dioxygène en trioxyde de soufre  $\text{SO}_3$ . Ce dernier est récupéré dans l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . La réaction est catalysée par du pentaoxyde de vanadium  $\text{V}_2\text{O}_5$ .

Ce problème s'intéresse aux paramètres influençant la réaction d'oxydation.

**II.1. Écrire** la réaction modélisant la transformation, avec un nombre stœchiométrique de 1 pour le dioxygène.

**II.2. Calculer** le nombre de degrés de liberté de cet équilibre :

- dans le cas général;
- lorsque le dioxyde de soufre et le dioxygène sont introduits en proportions stœchiométriques;
- lorsque l'oxydation se fait avec de l'air.

**II.3. Calculer** l'enthalpie standard de réaction et l'entropie standard de réaction. **Commenter** ces deux valeurs.

**II.4.** En **déduire** l'expression de l'enthalpie libre standard de réaction en fonction de la température en précisant les approximations effectuées.

**II.5.** **Exprimer** puis **calculer** la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à 740 K notée  $K^\circ$ .

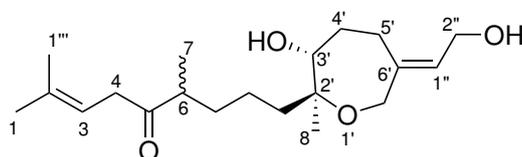
**II.6.** **Indiquer** si la température  $T$  est un facteur d'équilibre. Décrire l'influence d'une élévation isobare de température.

**II.7.** **Indiquer** si la pression  $p$  est un facteur d'équilibre. Décrire l'influence d'une élévation de pression isotherme.

**II.8.** **Exprimer** puis **calculer** la température atteinte lors de la réaction, initialement à 298 K, d'un mélange stœchiométrique d'air et de dioxyde de soufre gazeux menant à la formation du trioxyde de soufre. La réaction est supposée quantitative et l'évolution adiabatique.

### Problème III : le (+)-zoapatanol

Le (+)-zoapatanol est isolé des feuilles de la plante mexicaine zoapatle (*montanoa tomentosa*), que les femmes mexicaines utilisent depuis des siècles en décoction pour provoquer les règles, faciliter l'accouchement ou mettre fin à une grossesse précoce. Des études récentes confirment que le zoapatanol et ses métabolites pourraient être responsables de l'activité antifertile observée. En 1979, l'isolement et la structure (ci-dessous) du (+)-zoapatanol ont été décrits.



Représentation du (+)-zoapatanol

En raison de son profil biologique et de sa structure complexe, plusieurs approches synthétiques ont été envisagées pour sa préparation. Au total, sept synthèses du zoapatanol ont été publiées parmi lesquelles deux sont énantiosélectives. Ce problème se focalise sur une synthèse racémique décrite par l'équipe de R. CHEN (CHEN, R.; ROWAND, D. A., J. Am. Chem. Soc. 1980, 102, 6609-6611).

#### Partie A : questions préliminaires

**III.A.1.** **Déterminer** le stéréodescripteur des centres stéréogènes 2' et 3' du (+)-zoapatanol en justifiant la réponse.

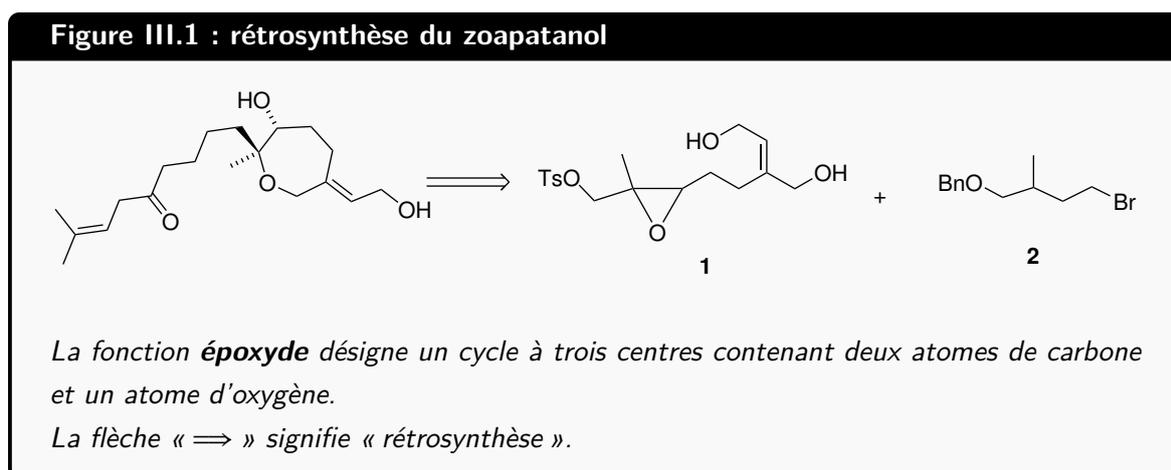
Le spectre de résonance magnétique nucléaire du proton (RMN  $^1\text{H}$ ) à 300 MHz dans le chloroforme deutéré ( $\text{CDCl}_3$ ) du (+)-zoapatanol comporte, entre autres, les signaux suivants :

$\delta$ / ppm	intégration	multiplicité
5,47	1	t, $^3J = 6,1$ Hz
5,30	1	t, $^3J = 6,4$ Hz
4,20	2	d, $^3J = 6,4$ Hz
3,16	2	d, $^3J = 6,1$ Hz
1,22	3	s
1,06	3	d, $^3J = 7,0$ Hz

**III.A.2.** Sous la forme d'un tableau, **attribuer** les différents signaux ci-dessus à un ou des atomes d'hydrogène du (+)-zoapatanol, en justifiant les multiplicités observées (voir les déplacements chimiques tabulés RMN dans les données).

### Partie B : synthèse de R. Chen (1980)

La première synthèse totale du zoapatanol décrite par l'équipe nécessite de préparer à la fois l'époxy-diol **1** et le bromure aliphatique **2**, comme le suggère le plan rétrosynthétique de la figure III.1.

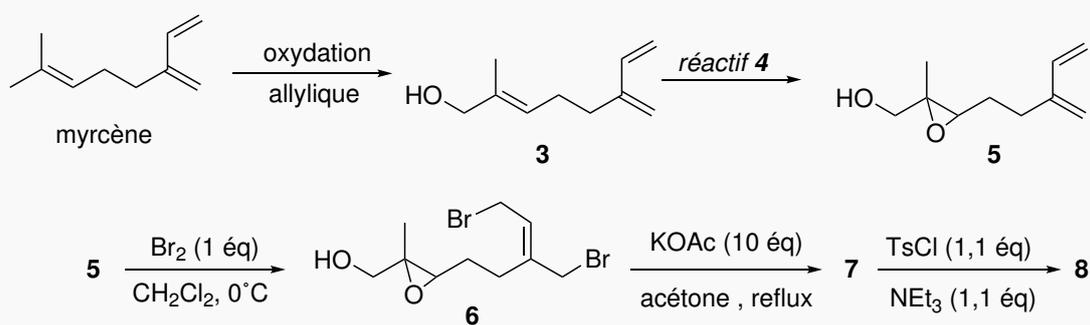


Une fois ces deux précurseurs obtenus, ils sont assemblés, puis quelques transformations supplémentaires permettent d'aboutir à la molécule de ( $\pm$ )-zoapatanol.

#### III.B.1. Synthèse du synthon 1

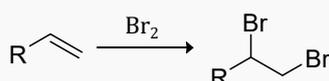
Le synthon **1** est obtenu par la séquence réactionnelle présentée en figure III.2.

Figure III.2 : synthèse du synthon 1

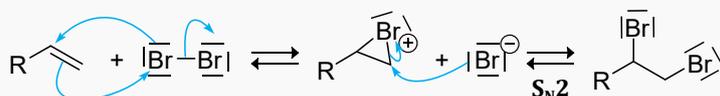


Document III.1 : bromation des alcènes

La réaction de bromation des alcènes permet d'accéder à des alcanes 1,2-dibromés (ces derniers pouvant, entre autres, être utilisés pour la formation d'alcynes). La réaction s'effectue par traitement d'un alcène par du dibrome, dans un solvant inerte et à l'abri de la lumière pour éviter des réactions radicalaires parasites.



D'un point de vue mécanistique, il y a, dans une première étape, formation d'un ion bromonium ponté, issu de l'attaque de la double liaison sur le dibrome. Il s'ensuit une attaque nucléophile du bromure formé ( $\text{Br}^-$ ) sur l'ion bromonium via un mécanisme  $\text{S}_{\text{N}}2$ .



**III.B.1.a.** Mis en présence d'un équivalent de dibrome  $\text{Br}_2$ , le composé **5** donne le composé dibromé **6**. **Proposer** un mécanisme réactionnel à l'aide du document III.1 pour la formation de **6**.

**III.B.1.b.** Le composé **6** mis en présence d'éthanoate de potassium  $\text{KOAc}$  conduit au composé **7** par deux réactions de substitutions nucléophiles. **Proposer** un schéma de LEWIS représentatif de l'ion éthanoate  $\text{AcO}^-$  (ou  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ ) et **identifier** le site nucléophile.

**III.B.1.c.** **Représenter** la structure du composé **7**, sachant que le spectre IR du composé **7** présente une bande fine et intense à  $1750\text{ cm}^{-1}$ .

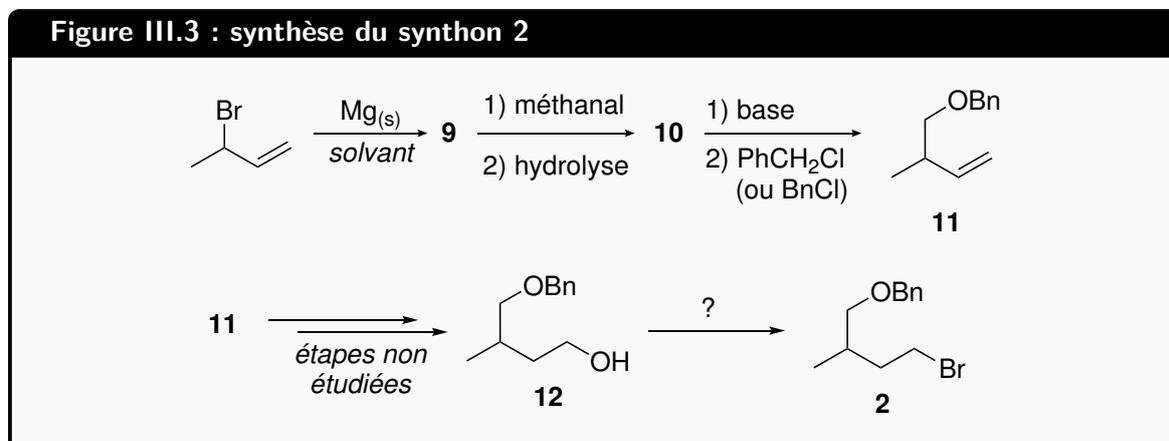
**III.B.1.d.** **Écrire** le mécanisme correspondant à une seule de ces substitutions nucléophiles, sachant que la vitesse de réaction est proportionnelle à  $[\text{OAc}^-]$ , la concentration en quantité de matière de l'ion éthanoate.

**III.B.1.e.** **Représenter** la structure du composé **8** obtenu par traitement du composé **7** par

du chlorure de tosyl (TsCl) en présence de triéthylamine. Préciser l'intérêt de cette étape.

### III.B.2. Synthèse du synthon 2

Le synthon 2 est obtenu par la séquence réactionnel présenté en figure III.3.



**III.B.2.a. Représenter** le composé **9**.

**III.B.2.b. Indiquer** pourquoi la présence d'eau est à proscrire lors de la synthèse de **9**, en écrivant l'équation de la réaction parasite.

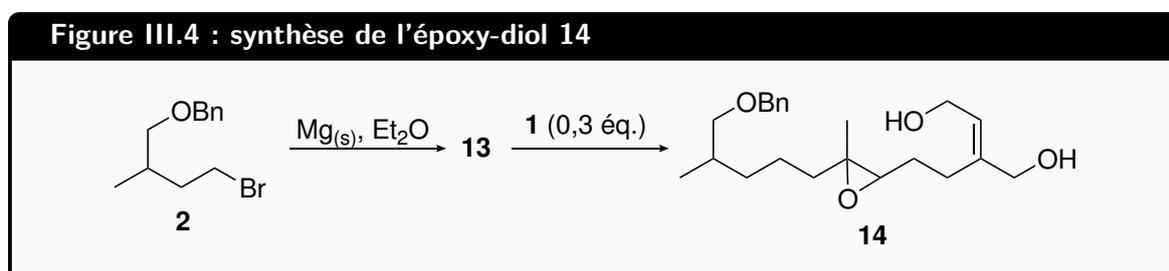
**III.B.2.c. Donner** le mécanisme de formation de **10** à partir de **9**.

**III.B.2.d. Proposer** une base pour l'obtention de **11**. Justifier l'intérêt de cette étape **10**  $\rightarrow$  **11** vu la suite de la synthèse vers le synthon **2**.

**III.B.2.e. Proposer** des conditions opératoires pour l'obtention de **2** à partir de **12**. Écrire le mécanisme correspondant.

### III.B.3. Assemblage des synthons

Les fragments **1** et **2** sont ensuite assemblés pour mener au composé époxy-diol **14** (figure III.4).

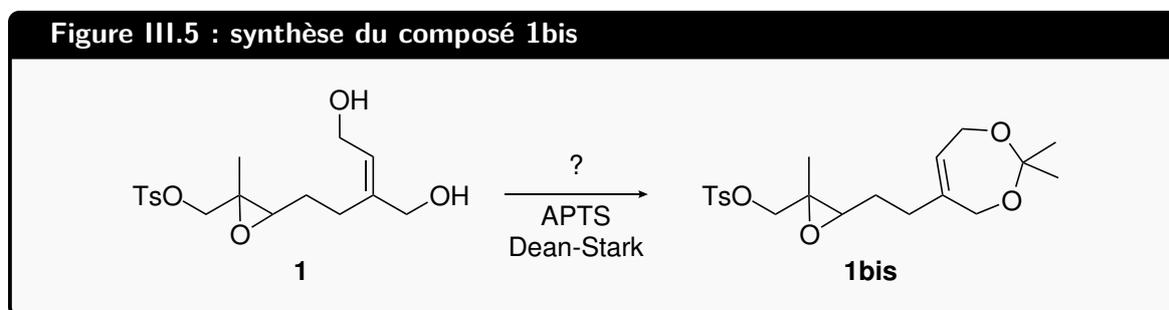


**III.B.3.a. Représenter** la structure du composé **13**.

**III.B.3.b. Représenter** le mécanisme mis en jeu dans la formation de l'époxy-diol **14** à partir de **13**.

**III.B.3.c. Expliquer** la nécessité d'utiliser un excès de composé **13** lors de sa réaction sur le composé **1**. **Préciser** quelle(s) réaction(s) parasite(s) pourrait(aient) se produire. Les formules des produits parasites obtenus ne sont pas exigées.

Une voie alternative consiste à transformer le composé **1** en composé **1bis** avant sa réaction sur le composé **13**, selon le schéma de synthèse de la figure III.5.



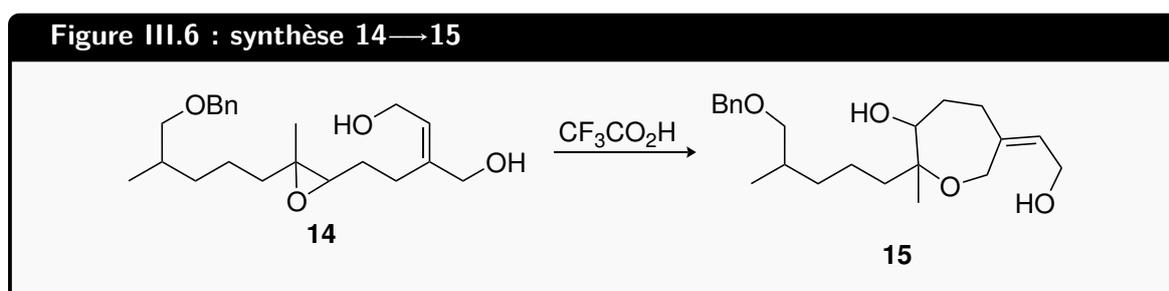
**III.B.3.d. Représenter et nommer** le réactif utilisé pour la transformation **1** → **1bis**.

**III.B.3.e. Représenter** le mécanisme de la transformation **1** → **1bis**. La molécule **1** peut être représentée de façon simplifiée en posant R<sup>-</sup> une partie de la molécule.

**III.B.3.f. Préciser** le rôle de l'appareil de DEAN-STARK.

**III.B.3.g. Justifier** l'utilisation de l'APTS et **préciser** ses avantages par rapport, par exemple, à l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique.

En présence d'une quantité catalytique d'acide 2,2,2-trifluoroéthanoïque (CF<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>H), l'époxycyclitol **14** est cyclisé pour mener au composé **15** III.6.



Cette cyclisation commence par la protonation de la fonction époxyde qui aboutit à la formation de deux carbocations possibles par l'ouverture de l'époxyde.

**III.B.3.h. Écrire** le mécanisme de formation de ces deux carbocations. **Justifier** que l'un d'entre eux soit formé préférentiellement.

**III.B.3.i. Proposer** un mécanisme permettant d'aboutir au cycle souhaité dans le composé **15**.

Après quelques fonctionnalisations, le composé **15** conduit finalement au (±)-zoapatanol.

## Problème IV : contrôle de la qualité de l'eau d'un aquarium

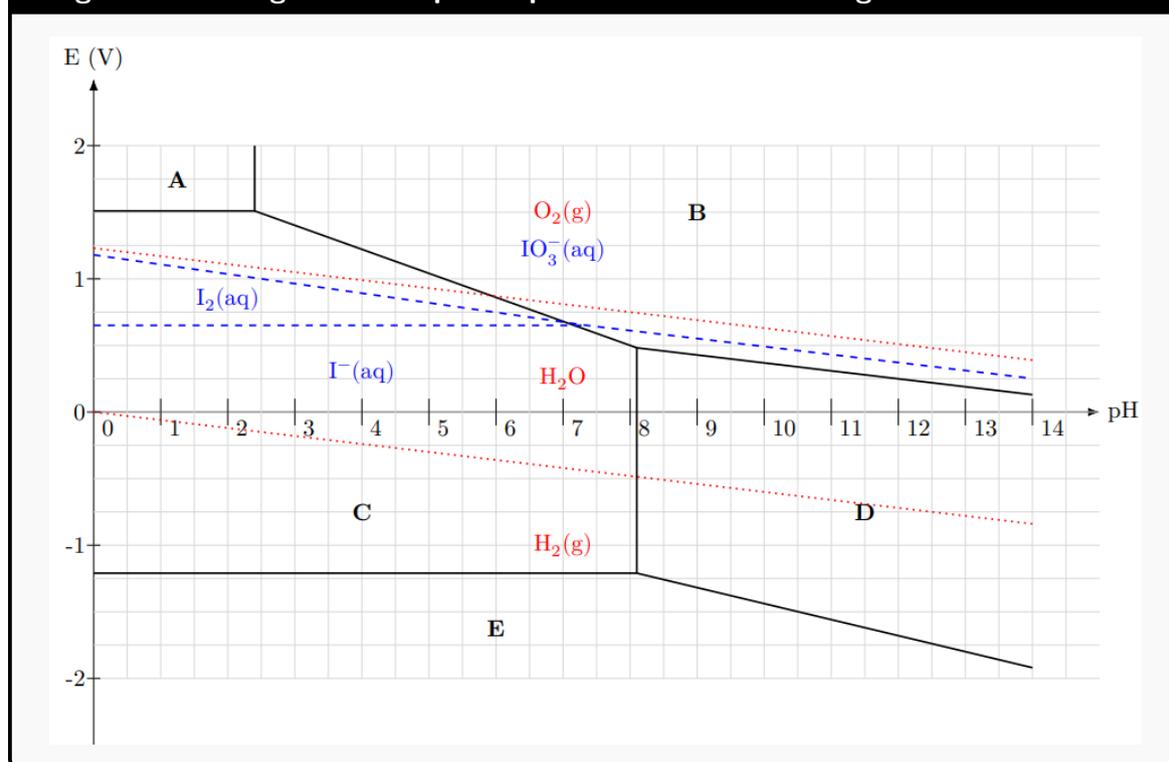
### IV.1. Étude préliminaire de diagrammes $E$ -pH

La figure IV.1 représente plusieurs diagrammes  $E$ -pH superposés.

- Le diagramme  $E$ -pH de l'élément manganèse (représenté en ligne pleine) dont les espèces sont  $\text{Mn}_{(s)}$ ,  $\text{Mn}_{(aq)}^{2+}$ ,  $\text{Mn}_{(aq)}^{3+}$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_{2(s)}$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_{3(s)}$ .
- Le diagramme  $E$ -pH simplifié de l'élément iode (représenté en tirets) dont les espèces sont  $\text{I}_{2(aq)}$ ,  $\text{IO}_{3(aq)}^-$  et  $\text{I}_{(aq)}^-$ .
- Le diagramme  $E$ -pH de l'eau (représenté en pointillés).

Pour les diagramme  $E$ -pH des éléments manganèse et iode, la convention de tracé utilisée est la suivante : sur une frontière, seules les deux formes du couple oxydant-réducteur sont considérées et chaque espèce dissoute contenant le manganèse (ou l'iode) a une concentration de valeur égale à  $0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Figure IV.1 : diagrammes  $E$ -pH simplifiés des éléments manganèse iode et eau



**IV.1.a. Attribuer**, en justifiant la réponse, les différents domaines du diagramme  $E$ -pH de l'élément manganèse repérés par les lettres **A**, **B**, **C**, **D** et **E** (voir figure IV.1), aux différentes espèces considérées contenant l'élément manganèse.

**IV.1.b.** En utilisant les diagramme  $E$ -pH de la figure IV.1, **identifier** quelles sont les espèces contenant l'élément manganèse, stables dans l'eau en présence de dioxygène dissous.

## IV.2. Dosage du dioxygène dissous dans l'eau

Pour déterminer la concentration en dioxygène dissous dans l'eau, la méthode utilisée propose le protocole décrit dans le document IV.1.

### Document IV.1 : protocole du dosage du dioxygène dissous

- *Étape n° 1* : placer 2,1 g de chlorure de manganèse (II), de la soude en excès sous forme de pastilles solides et un barreau aimanté dans un erlenmeyer de 250 mL. Dans un grand cristalliseur, remplir l'erlenmeyer à ras bord avec l'eau à analyser (le cristalliseur permet de prévenir tout débordement de la solution). Boucher rapidement l'erlenmeyer et éviter de maintenir de l'air à l'intérieur.
- *Étape n° 2* : agiter jusqu'à dissolution complète des réactifs et attendre environ trente minutes. La formation d'un précipité brun est observée.
- *Étape n° 3* : peser 3 g d'iodure de potassium. Verser le contenu de l'erlenmeyer dans un grand béccher contenant de l'acide sulfurique concentré et ajouter très rapidement les 3 g d'iodure de potassium (l'ajout d'acide sulfurique permet de ramener le pH de la solution à une valeur voisine de 1). Homogénéiser et agiter jusqu'à disparition totale du précipité brun et persistance d'une couleur jaune limpide.
- *Étape n° 4* : prélever un volume  $V_0 = 50 \text{ mL}$  de la solution et la doser avec une solution de thiosulfate de sodium de concentration  $c_1 = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . Un indicateur coloré indique la fin du titrage, pour un volume versé  $V_1 = 8,3 \text{ mL}$ .

**IV.2.a. Expliquer** pourquoi il est nécessaire de se placer initialement (étapes 1 et 2 du protocole) en milieu fortement basique.

**IV.2.b. Identifier** la nature du précipité brun formé et écrire l'équation qui modélise sa formation (étape 2 du protocole). **Proposer** une explication à la nécessité d'attendre trente minutes.

**IV.2.c. Écrire** les équations qui modélisent les transformations chimiques qui interviennent lors du passage en milieu acide et de l'ajout d'iodure de potassium (*étape n° 3* du protocole).

**IV.2.d. Expliquer** pourquoi l'iodure de potassium est ajouté en large excès.

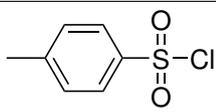
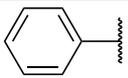
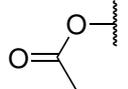
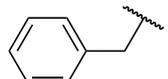
**IV.2.e. Écrire** l'équation de la réaction support du titrage (*étape n° 4*).

**IV.2.f.** En **déduire** l'expression de la concentration en dioxygène dissous en fonction de  $c_1$ ,  $V_1$  et  $V_0$ . **Effectuer** l'application numérique.

**Fin de l'énoncé**

## Données

- Espèces chimiques organiques utiles :

APTS	acide paratoluènesulfonique	$\text{CH}_3 - (\text{C}_6\text{H}_4) - \text{SO}_3\text{H}$
TsCl	chlorure de 4-toluènesulfonyle	
THF	tétrahydrofurane	
TBSCl	chlorotertiobutyldiméthylsilane	$(\text{CH}_3)_3\text{CSi}(\text{CH}_3)_2\text{Cl}$
Ph-	phényl-	
Ac-		
Bn-	benzyl-	

- Constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $\frac{RT}{F} \ln(10) \approx 0,06 \text{ V}$
- Potentiels rédox standard à 25 °C et pH nul :

couple	$\text{H}^+_{(\text{aq})}/\text{H}_2(\text{g})$	$\text{S}_4\text{O}_6^{2-}_{(\text{aq})}/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}_{(\text{aq})}$	$\text{I}_2(\text{aq})/\text{I}^-_{(\text{aq})}$	$\text{O}_2(\text{g})/\text{H}_2\text{O}(\ell)$
$E^\circ / \text{V}$	0,00	0,10	0,50	1,23

- Données thermodynamiques molaires à 25 °C :

espèce	$\text{O}_2(\text{g})$	$\text{SO}_2(\text{g})$	$\text{SO}_3(\text{g})$	$\text{N}_2(\text{g})$
$\Delta_f H^\circ / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	0	-296,8	-395,8	191
$S_m^\circ / \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	205,2	248,2	256,8	0
$c_{p,m,i}^\circ / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	29,4	39,9	24,0	29,1

- Électronégativités (échelle de PAULING) :

H							He
2,1							0
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,5	0
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	3,0	0

- *Masses molaires atomiques et numéro atomiques :*

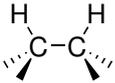
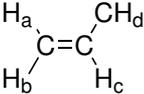
élément ou espèce	symbole	Z	M / g · mol <sup>-1</sup>
hydrogène	H	1	1,00
carbone	C	6	12,0
azote	N	7	14,0
oxygène	O	8	16,0
sodium	Na	11	23
silicium	Si	14	28,0
phosphore	P	15	31,0
soufre	S	16	37,1
chlore	Cl	17	35,5
zinc	Zn	30	65,4
fer	Fe	26	55,8
iode	I	53	126,9

- *Données de spectroscopies RMN <sup>1</sup>H :*

**Domaines de déplacements chimiques pour quelques types de protons par rapport au signal de référence des protons du tétraméthylsilane (CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>Si**

type de proton	δ / ppm	type de proton	δ / ppm
-CH-C	0,8 à 1	-CH-X	2,5 à 4
-CH-C-C-X	0,8 à 1,2	-CH-O-C=O	3,7 à 4,8
-CH-C=C-	1,6 à 2,2	H <sub>2</sub> C=C <sup>-</sup>	4,5 à 5,3
-CH-C-X	1 à 1,8	Ar-H	6 à 8
-CH-C-CN	2 à 3	R-NH <sup>-</sup>	1 à 5
HC≡C <sup>-</sup>	2,3 à 3,2	R-OH	1 à 6
-CH-C=O	2 à 2,7	CO-NH <sup>-</sup>	5,5 à 8,5
-CH-Ar	2,3 à 3	H-CO-N	8
-CH-O	3 à 4	R-CHO	9,5 à 9,9
-CH-O-Ar	3,7 à 4,3	R-COOH	10 à 13

**Constantes de couplage**

type de proton	constante de couplage
	<sup>1</sup> J = 6 – 8 Hz
	<sup>2</sup> J <sub>ab</sub> = 0 – 3 Hz
	<sup>3</sup> J <sub>ac</sub> = 12 – 18 Hz
	<sup>3</sup> J <sub>bc</sub> = 6 – 12 Hz
	<sup>3</sup> J <sub>cd</sub> = 5 – 10 Hz

• *Données de spectroscopies infrarouge :*

<b>liaison</b>	<b>nature</b>	<b>nombre d'onde / cm<sup>-1</sup></b>	<b>intensité</b>
O–H alcool libre	élongation	3580-3670	forte (fine)
O–H alcool lié	élongation	3200-3600	forte (large)
N–H amine	élongation	3300-3500	moyenne
N–H amide	élongation	3100-3500	forte
C <sub>di</sub> –H	élongation	≈3300	forte
C <sub>tri</sub> –H	élongation	3030-3100	moyenne
C <sub>tri</sub> –H aromatique	élongation	3000-3100	moyenne
C <sub>tet</sub> –H	élongation	2850-2970	forte
C <sub>tri</sub> –H aldéhyde	élongation	2700-2900	moyenne ; 2 bandes
O–H acide carboxylique	élongation	2500-3200	moyenne
C≡C ; C≡N	élongation	2100-2250	forte à moyenne (large)
C=O anhydride	élongation	1700-1840	forte ou moyenne
C=O chlorure d'acyle	élongation	1770-1820	forte ; 2 bandes
C=O ester	élongation	1700-1740	forte
C=O aldéhyde ou cétone	élongation	1650-1730	forte
C=O acide	élongation	1680-1710	forte
C=C	élongation	1625-1685	forte
C=C aromatique	élongation	1450-1600	moyenne ; 3 ou 4 bandes
N=O	élongation	1510-1580	forte ; 2 bandes
N–H amine ou amide	déformation	1560-1640	forte ou moyenne
C <sub>tet</sub> –Cl	élongation	600-800	forte
C <sub>tet</sub> –Br	élongation	500-750	forte
C <sub>tet</sub> –I	élongation	≈500	forte