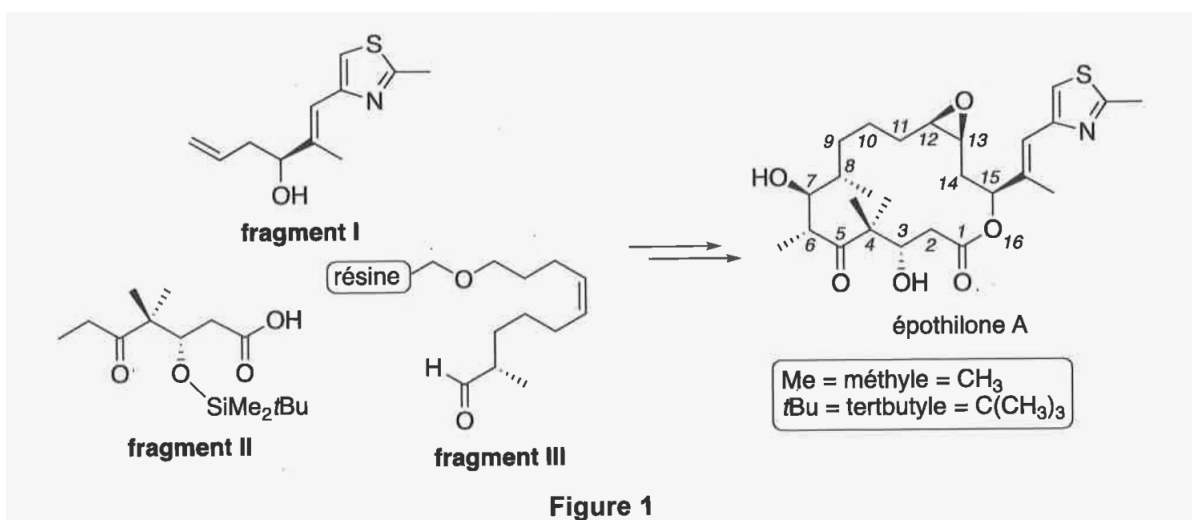


Le sujet comporte 26 questions pour un total de 75 points. Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

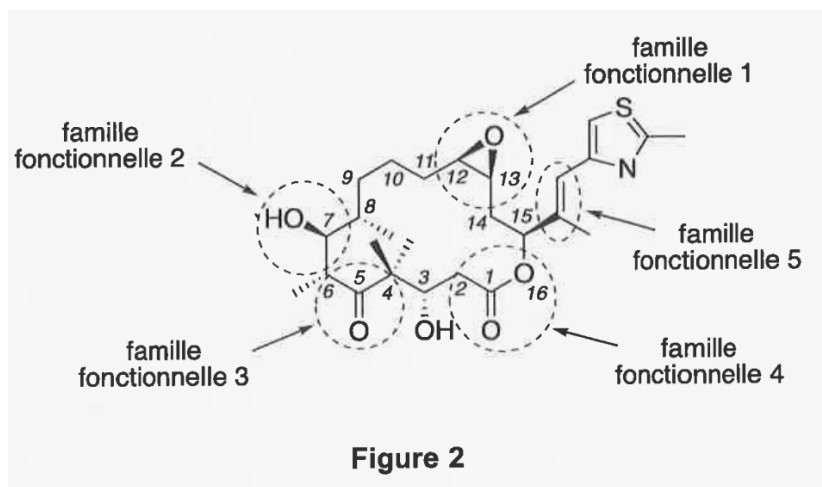
### I ) Synthèse de l'épothilone A [CCINP PC 2023]

Les épothilones constituent une nouvelle classe de molécules macrocycliques cytotoxiques à 16 chaînons au fort potentiel en chimiothérapie. Plusieurs épothilones sont actuellement en cours de développement clinique pour le traitement de divers cancers. Ce problème s'intéresse plus particulièrement à la synthèse supportée sur résine de l'épothilone A à partir des fragments suivants (figure 1):



#### Partie I - L'épothilone A

- Nommer les cinq familles fonctionnelles entourées dans la structure de l'épothilone A (figure 2).



(5)

**Solution:**

Famille	Nom
1	epoxyde
2	alcool
3	cétone
4	ester
5	alcène

2. Attribuer le descripteur stéréochimique R ou S à l'atome de carbone asymétrique repéré par l'indice de position 7 sur la structure de l'épothilone A (figure 2). Justifier la réponse. (2)

**Solution:** Il s'agit d'un alcène E (groupements majoritaires de deux côtés différents).

3. Attribuer le descripteur stéréochimique E ou Z à la double liaison carbone-carbone hors du cycle de l'épothilone A. Justifier la réponse. (2)

**Solution:** Il s'agit d'un carbone S ( $O > C6 > C8 > H$ ).

4. Identifier tous les éléments stéréogènes de l'épothilone A et déterminer le nombre de stéréoisomères de configuration différents de l'épothilone A. Justifier la réponse. (2)

**Solution:** Il y a 7 carbones asymétriques et une C=C : cela fait donc  $2^8$  stéréoisomères possibles.

## Partie II - Synthèse du fragment I

La synthèse du fragment I peut être réalisée à partir du 2-méthyl-4-éthoxycarbonylthiazole 1 comme substrat de départ et débute ainsi (schéma 1):

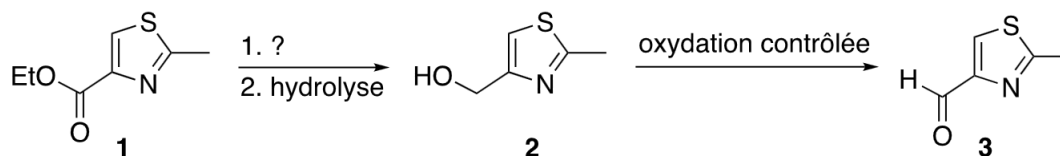


Schéma 1

5. Proposer un réactif pour la transformation 1 → 2. Expliquer pourquoi une oxydation contrôlée est nécessaire pour la transformation 2 → 3. (2)

**Solution:** Pour la transformation 1 → 2, on peut proposer comme réactif le tétrahydroaluminat de lithium  $\text{LiAlH}_4$ .

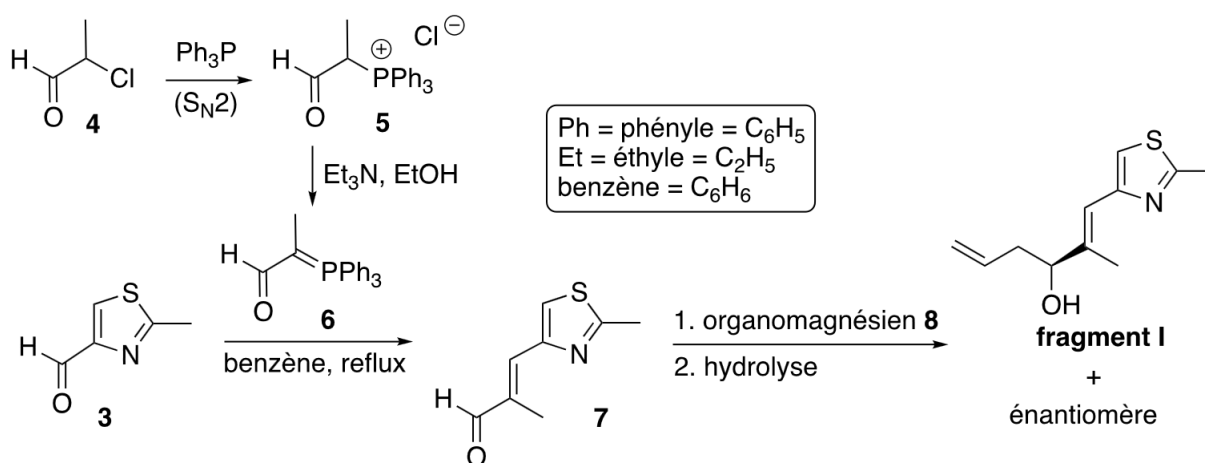
Une oxydation contrôlée est nécessaire pour la transformation 2 → 3 afin d'éviter la formation d'un acide carboxylique.

Le spectre infrarouge (IR) de l'espèce 3 présente, entre autres, une bande d'absorption de forte intensité au nombre d'onde  $1695\text{ cm}^{-1}$ .

6. Proposer une attribution pour cette bande. (1)

**Solution:** Q6. La bande à  $1695\text{ cm}^{-1}$  correspond à la vibration d'élongation de la double liaison  $\text{C}=\text{O}$  conjuguée de l'aldéhyde.

Le composé 3 permet d'accéder au fragment I à l'aide de la suite réactionnelle suivante (schéma 2) :



**Schéma 2**

7. Repérer le(s) site(s) électrophile(s) de l'espèce 4. Justifier la réponse. Donner le type VSEPR ( $\text{AX}_p\text{E}_q$ ) de l'atome de phosphore de la triphénylphosphine ( $\text{Ph}_3\text{P}$ ). Justifier le caractère nucléophile de cet atome. (4)

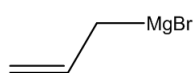
**Solution:** Pour l'espèce **4**, on peut proposer deux sites électrophiles : le carbone de l'aldéhyde et le carbone de l'halogénoalcane.

La triphénylphosphine possède une géométrie de type  $AX_3E_1$ , l'atome de phosphore est nucléophile car il présente un doublet non liant. De plus, sa polarisabilité le rend d'autant meilleur nucléophile.

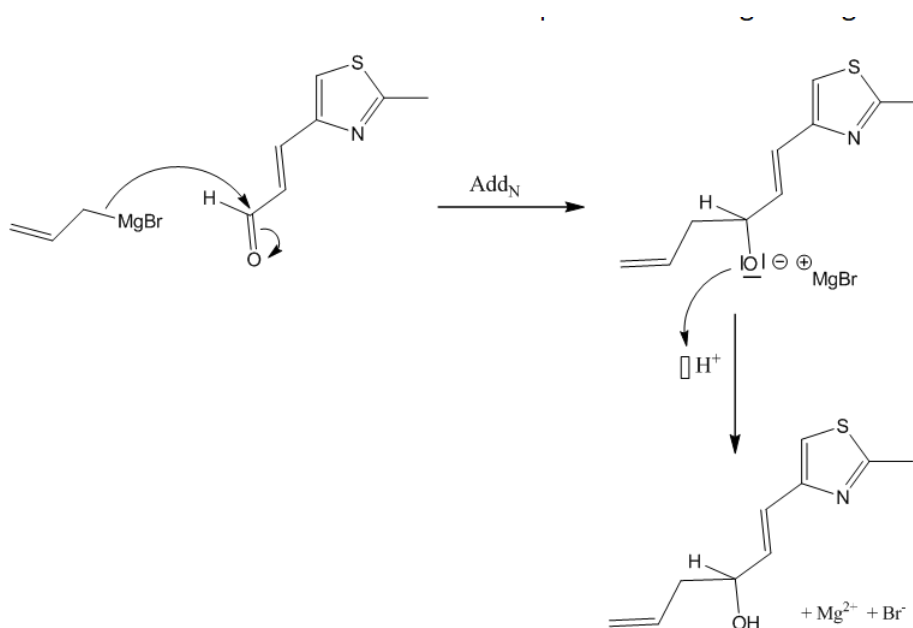
8. Proposer une structure pour l'organomagnésien **8**. Proposer un mécanisme modélisant la réaction de l'espèce **7** avec l'organomagnésien **8**. On ne s'intéressera pas à la stéréosélectivité de la réaction.

(5)

**Solution:** Structure de l'organomagnésien **8** :



Le mécanisme est :



Lors de l'étude de la transformation de l'espèce **7** avec l'organomagnésien **8**, des prélèvements du milieu réactionnel sont effectués, à intervalles de temps réguliers, à l'aide d'une seringue. Après traitement, les prélèvements sont analysés par résonance magnétique nucléaire du proton (RMN  $^1\text{H}$ ) à 500 MHz dans le chloroforme deutérié ( $\text{CDCl}_3$ ). Au cours du temps, on observe, entre autres :

- un signal disparaissant à 9,57 ppm (singulet, 1H) ;
  - des signaux apparaissant à 5,79 – 5,87 ppm (multiplet, 1H), 5,02 ppm (doublet,  $J = 17,1$  Hz, 1H) et 4,97 ppm (doublet,  $J = 10,3$  Hz, 1H).
9. Montrer que les prélèvements permettent de suivre l'avancement de la réaction en attribuant chacun des signaux à un ou des atomes d'hydrogène caractéristiques. Justifier la réponse. On utilisera les notations de la figure 3.

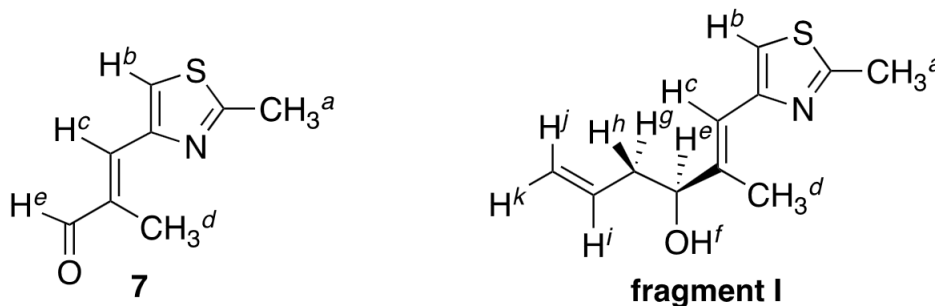
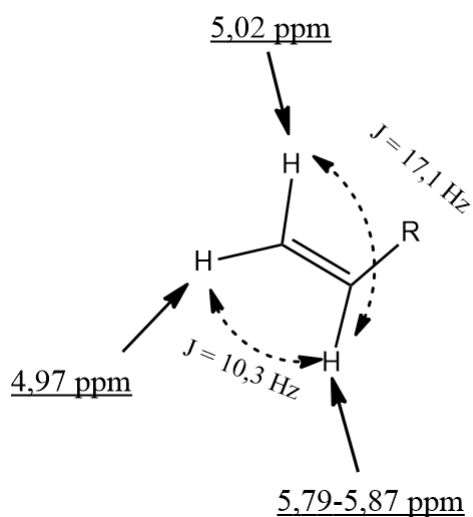


Figure 3

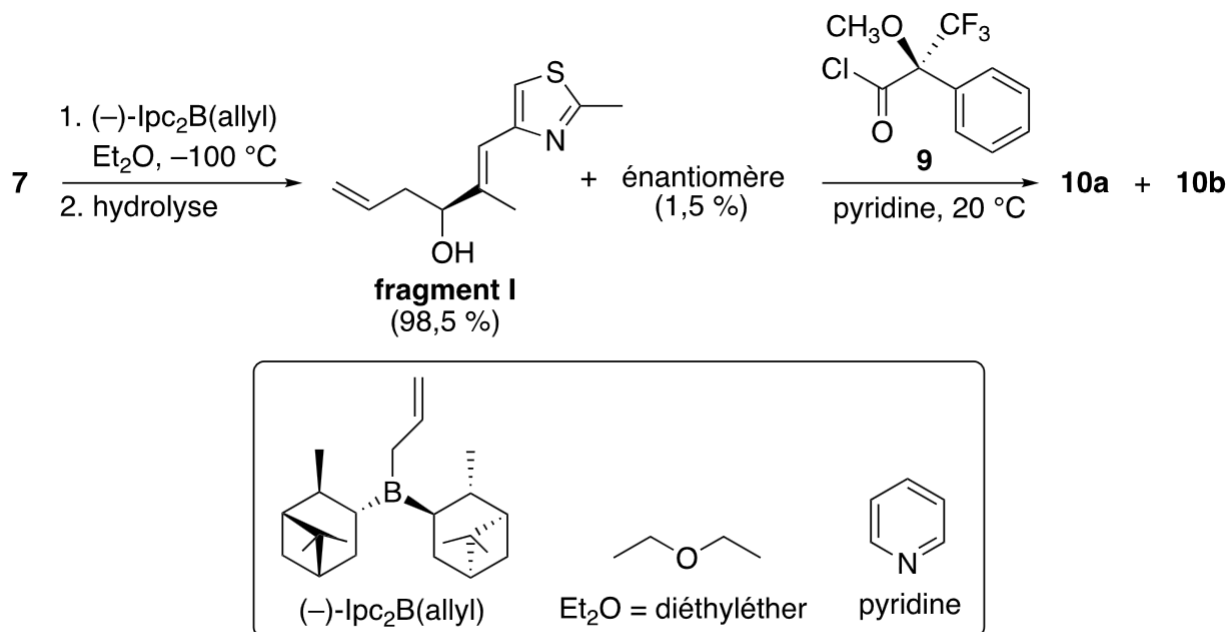
(4)

**Solution:** Le signal à 9,57 ppm correspond au H de l'aldéhyde. Il disparaît car le réactif 7 est consommé.

Pour les autres signaux :



L'allylborane chiral  $(-)\text{-Ipc}_2\text{B(allyl)}$  réagit comme un organomagnésien. En l'additionnant à basse température sur le composé **7**, les auteurs sont parvenus à obtenir très majoritairement le fragment I. Ils ont pu déterminer les proportions du fragment I et de son énantiomère à l'aide de la méthode de dérivation de Mosher consistant à faire réagir quantitativement le mélange obtenu avec le chlorure d'acide chiral **9**. Dans le schéma 3, l'espèce **10a** provient de la réaction entre le chlorure d'acide **9** et le fragment I et l'espèce **10b** de la réaction entre le chlorure d'acide **9** et l'énantiomère du fragment I :

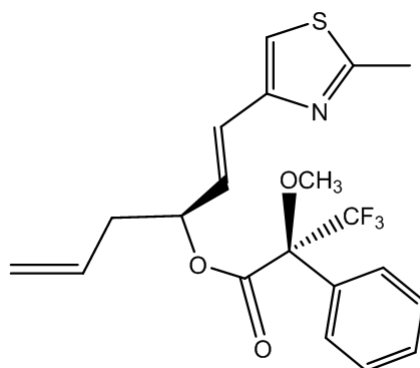


Source : J. A. Dale, D. L. Dull, H. S. Mosher, *The Journal of Organic Chemistry*, **1969**, 34, 2543.

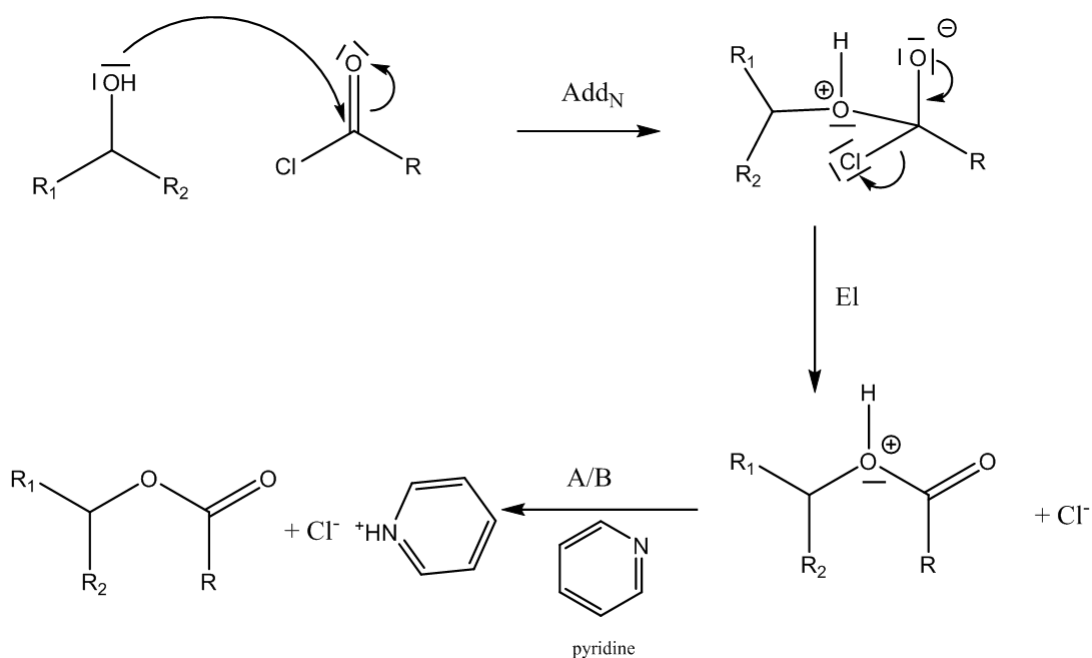
### Schéma 3

10. Représenter l'espèce **10a** et proposer un mécanisme rendant compte de sa formation. (6)

**Solution:** Représentation de **10a** :



Mécanisme d'addition d'un alcool sur un chlorure d'acyle :



11. Indiquer la relation d'isomérisie qui lie les composés **10a** et **10b**.

Expliquer pourquoi la réaction quantitative avec le chlorure d'acide **9** permet a priori de déterminer les proportions du fragment I et de son énantiomère par analyse en résonance magnétique nucléaire du proton (RMN  $^1\text{H}$ ).

(2)

**Solution:** L'espèce **10a** est diastéréoisomère de **10b**.

Deux diastéréoisomères n'ont pas a priori les mêmes propriétés physico-chimiques, ils peuvent donc présenter des spectres RMN différents.

Le pouvoir rotatoire  $\alpha$  du mélange obtenu lors de la réaction de l'espèce chimique **7** avec l'allylborane (-)-Ipc<sub>2</sub>B(allyl), composé de 98,5% de fragment I et 1,5% de son énantiomère, mesuré à 22 °C à une concentration de  $10^{-2}$  g/mL dans le chloroforme (CHCl<sub>3</sub>) avec une cuve de 1,00 dm en utilisant la raie D du sodium, est égal à  $-0,202^\circ$ .

12. Déterminer le pouvoir rotatoire spécifique  $[\alpha]_D^{22}$  du fragment I dans les mêmes conditions. (4)

**Solution:** On mesure le pouvoir rotatoire d'un mélange d'énantiomères. Leurs pouvoirs rotatoires spécifiques sont opposés, l'expression de la loi de Biot donne, avec  $c_0$  la concentration totale :

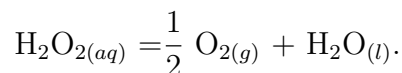
$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = (0,985 \cdot c_0 \cdot [\alpha]_D^{22} - 0,015 \cdot c_0 \cdot [\alpha]_D^{22}) \cdot l = 0,97 \cdot l \cdot c_0 \cdot [\alpha]_D^{22}$$

On trouve  $[\alpha]_D^{22} = -20,8^\circ \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$



## II ) Décomposition de l'eau oxygénée [E3A PC 2017]

On s'intéresse à la réaction spontanée de la décomposition du peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) selon l'équation :



Cette réaction est quantitative mais très lente. Elle peut être accélérée par le dioxyde de manganèse  $\text{MnO}_2$ . Le dioxyde de manganèse solide a des applications aussi bien ancestrales (les peintures rupestres de Lascaux) que contemporaines car utilisé comme oxydant dans la pile Leclanché (pile alcaline).

Lorsqu'une pincée de ce solide est utilisée pour la décomposition de l'eau oxygénée concentrée, une réaction assez vive, avec dégagement de dioxygène accompagné de fortes vapeurs, se produit et sert d'effet de scène dans les films fantastiques. On réalise la décomposition catalysée d'une quantité connue de  $\text{H}_2\text{O}_2$  dans un calorimètre pour obtenir expérimentalement la valeur de l'enthalpie standard de la réaction.

Dans un premier temps, on détermine expérimentalement la capacité thermique du calorimètre, grâce à la méthode des mélanges :

- une masse  $m_1 = 300$  g d'eau est placée dans le calorimètre, et après équilibre thermique, on mesure une température  $T_1 = 20,8$  °C ;
- on ajoute alors une masse  $m_2 = 200$  g d'eau à  $T_2 = 28,9$  °C et on mesure, après agitation une température finale  $T_3 = 23,8$  °C.

13. Déterminer la capacité thermique  $C_{cal}$  du calorimètre vide.

(4)

**Solution:** Le calorimètre étant une enceinte adiabatique et le mélange se faisant à pression constante, la transformation est isenthalpique :

$$\Delta H = 0 = (m_1 \cdot c_P(\text{H}_2\text{O}) + C_{cal})(T_3 - T_1) + m_2 \cdot c_P(\text{H}_2\text{O})(T_3 - T_2).$$

On trouve finalement :  $C_{cal} = 167 \text{ J.K}^{-1}$ .

Dans un second temps, on verse dans le calorimètre, un volume  $V = 500$  mL d'une solution aqueuse d'eau oxygénée à la concentration molaire  $c = 9,55 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ . Après équilibre thermique on relève une température  $T_i = 22,7$  °C. On ajoute alors une masse  $m = 20,0$  g de dioxyde de manganèse  $\text{MnO}_2$  (pris à la même température) à la date  $t = 0$ .

On relève la température toutes les minutes : celle-ci atteint une valeur maximale  $T_f = 24,8$  °C avant de décroître lentement.

On supposera que la solution aqueuse d'eau oxygénée a une masse volumique et une capacité calorifique massique égales à celles de l'eau ; on négligera de plus les pertes thermiques dues au dégagement gazeux de dioxygène.

14. À l'aide des résultats de l'expérience décrite ci-avant, déterminer la valeur expérimentale de l'enthalpie standard  $\Delta_r H^\circ$  de la réaction de décomposition de l'eau oxygénée. (4)

**Solution:** On a toujours une transformation isenthalpique ; compte tenu des approximations proposées, on a :

$$\Delta H = 0 = \xi \cdot \Delta_r H^\circ + (m_{liq} \cdot c_P(H_2O) + m_{MnO_2} \cdot c_P(MnO_2) + C_{cal})(T_f - T_i),$$

avec  $\xi = n(H_2O_2) = C \cdot V = 4,775 \cdot 10^{-2}$  mol et  $m_{liq} = \rho \cdot V = 500,0$  g.

On trouve finalement  $\Delta_r H^\circ = -99,9$  kJ.mol<sup>-1</sup>.

15. Comparer à la valeur théorique calculée avec les valeurs des enthalpies standard de formation. (2)

**Solution:** On utilise la loi de Hess :

$$\Delta_r H^\circ = \Delta_f H^\circ(H_2O) + \frac{1}{2} \Delta_f H^\circ(O_2) - \Delta_f H^\circ(H_2O_2).$$

L'application numérique donne  $\Delta_r H^\circ = -98,4$  kJ.mol<sup>-1</sup>.

Les valeurs sont bien en accord.

16. Déterminer la valeur théorique de l'entropie standard  $\Delta_r S^\circ$  de la réaction. Quelle justification donner au signe de cette variation ? (2)

**Solution:** On utilise la loi de Hess :

$$\Delta_r S^\circ = S^\circ(H_2O) + \frac{1}{2} S^\circ(O_2) - S^\circ(H_2O_2).$$

L'application numérique donne  $\Delta_r S^\circ = 62,8$  J.K<sup>-1</sup> .mol<sup>-1</sup>.

$\Delta_r S^\circ > 0$ , en accord avec l'accroissement du désordre lié à l'augmentation de la quantité de matière gazeuse.

17. Dédire des résultats précédents la valeur théorique de l'enthalpie libre standard  $\Delta_r G^\circ$  de la réaction à 298 K. (1)

**Solution:**  $\Delta_r G^\circ = \Delta_r H^\circ - T \cdot \Delta_r S^\circ = -98,4 \cdot 10^3 - 298,15 \cdot 8 = -117 \text{ kJ/mol}$ .

18. En déduire la valeur à 298 K de la constante d'équilibre  $K^\circ$  de la réaction. Le résultat justifie-t-il le terme "quantitative" utilisé en introduction ci-dessus. (2)

**Solution:** La constante d'équilibre s'écrit :

$$K^\circ = e^{-\frac{\Delta_r G^\circ}{R \cdot T}}$$

L'application numérique donne :  $K^\circ = 3,4 \cdot 10^{20}$ .

La réaction est quantitative.

## DONNEES NUMERIQUES

### Données numériques générales

Numéros atomiques : Z (Mn) = 25 ; Z(O) : 8

Masses molaires atomiques ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) : M(Mn) : 54,9 ; M(O) : 16,0

Constante des gaz parfaits :  $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

### Données électrochimiques : Potentiels standard

$E^\circ (\text{MnO}_2 / \text{Mn}^{2+}) = 1,23 \text{ V}$

$E^\circ (\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}) = 1,51 \text{ V}$

$E^\circ (\text{MnO}_4^- / \text{MnO}_2) = 1,68 \text{ V}$

$E^\circ (\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}_2) = 0,69 \text{ V}$

$E^\circ (\text{H}_2\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}) = 1,77 \text{ V}$

$E^\circ (\text{Cl}_2 / \text{Cl}^-) = 1,36 \text{ V}$

### Données thermodynamiques

	Enthalpie standard de formation $\Delta_f H^\circ$ à 298K en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	Entropie molaire standard absolue $S^\circ$ à 298K en $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
$\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	- 285,8	69,9
$\text{H}_2\text{O}_2 (\text{l})$	-187,4	109,6
$\text{O}_2 (\text{g})$	0	205

Capacités thermiques massiques à pression constante en  $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  :

$c_p (\text{H}_2\text{O}(\text{l})) : 4,18$

$c_p (\text{MnO}_2(\text{s})) : 0,75$

### III ) Bulles de méthane [CCINP MP 2022]

L'hydrate de méthane ( $\text{CH}_4$ )<sub>8</sub>,46 H<sub>2</sub>O, naturellement présent dans le sol, est un composé d'origine organique, constitué d'une fine cage de glace dans laquelle le méthane CH<sub>4</sub> est piégé : le sol gelé constitue une sorte d'éponge qui stabilise le méthane sous forme solide. L'hydrate de méthane est stable à des basses températures et de fortes pressions. À une profondeur donnée, un réchauffement peut le rendre instable, donnant naissance à de l'eau liquide et à du gaz méthane. Les bulles de méthane forment une sorte de nasse qui vient éclater à la surface, engendrant le thermokarst. On voit des cratères gigantesques se former comme sur la photo ci-après. Ce cratère a une profondeur  $H = 50$  m et un rayon  $R = 40$  m.

En Sibérie, le réchauffement climatique est 2,5 fois plus important qu'ailleurs et certains biologistes craignent que des virus vieux de plusieurs milliers d'années soient ainsi réactivés et créent des situations sanitaires à très haut risque.



La taïga peut avoir l'aspect d'un véritable brasier pendant les mois d'été. Le départ des feux peut être d'origine humaine mais ils sont entretenus par la grande quantité de méthane qui vient en surface. Le méthane est auto-inflammable comme le montre l'existence des feu-follets au-dessus des marécages.

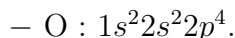
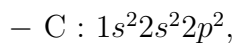
19. Indiquer les configurations électroniques des atomes H, C et O.

Proposer des formules de Lewis pour les molécules d'eau H<sub>2</sub>O, de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, de monoxyde de carbone CO et de méthane CH<sub>4</sub>.

(5)

**Solution:** Les configurations électroniques sont :

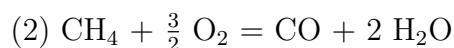
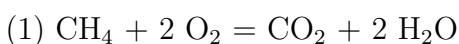
– H :  $1s^1$ ,



Les formules de Lewis sont :

20. Écrire les réactions de combustion complète (réaction 1) ou incomplète (réaction 2) du méthane  $\text{CH}_4$ . Une combustion complète donne naissance à la forme oxydée du carbone  $\text{CO}_2$  tandis qu'une combustion incomplète donne naissance à la forme oxydée  $\text{CO}$ . (2)

**Solution:** Les réactions sont :



21. Calculer les enthalpies standards de ces deux réactions, supposées indépendantes de la température. (2)

**Solution:** Avec la loi de Hess :

$$\Delta_r H_1^\circ = -891 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta_r H_2^\circ = -607 \text{ kJ/mol}$$

22. En assimilant les bulles de méthane à des sphères, de rayon de 40  $\mu\text{m}$  à 273 K et 1 bar, calculer l'énergie maximale libérée par l'oxydation de la bulle. Évaluer le volume d'air nécessaire. On considère les gaz parfaits et l'air comme un mélange parfait contenant 20% de dioxygène et du diazote. (4)

**Solution:** L'énergie maximale correspondrait à la combustion complète donc

$$E = -n \cdot \Delta_r H_1^\circ = -\frac{P \cdot V}{R \cdot T} \cdot \Delta_r H_1^\circ = 10,5 \cdot 10^9 \text{ kJ}.$$

Le bilan nécessite deux volumes d'oxygène pour un volume de méthane donc 10 volumes d'air. Ce qui donne pour le volume d'air :

$$V = \frac{40 \cdot \pi \cdot R^3}{3} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3.$$

## IV ) Calcination du carbonate de calcium [CCP PC 2015]

23. Ecrire l'équation de la réaction de calcination du carbonate de calcium en oxyde de calcium présentée dans le document. (1)

**Solution:** La réaction de calcination s'écrit :  $\text{CaCO}_{3(s)} = \text{CaO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$ .

24. Calculer la variance d'un système pour lequel la réaction de calcination du carbonate de calcium conduirait à un état d'équilibre. Conclure. (2)

**Solution:** La variance du système s'exprime selon  $v = X - Y$  avec  $X$  le nombre de paramètres intensifs, et  $Y$  le nombre de relations entre ces paramètres. Vu que tous les corps sont seuls dans leur phase, on compte  $X = 2$  (pression et température), et  $Y = 1$  (un équilibre). Ce qui donne un équilibre de variance  $v = 1$ .

On en déduit que la pression et la température du système sont liées, et d'autre part on peut craindre une rupture d'équilibre dans le sens direct.

25. Calculer, à l'aide des grandeurs fournies dans les données numériques, l'enthalpie standard ainsi que l'entropie standard de la réaction de calcination du carbonate de calcium à 1000 K. Commenter le signe de ces grandeurs et proposer une optimisation des conditions de calcination du carbonate de calcium. (4)

**Solution:** D'après la loi de Hess, on peut calculer  $\Delta_r H^\circ = 150 \text{ kJ/mol}$ . La réaction est endothermique, elle sera donc favorisée par une augmentation de la température (loi de Van't Hoff).

D'après la loi de Hess également, on peut calculer  $\Delta_r S^\circ = 150 \text{ J/mol/K}$ . La production de gaz augmente le désordre. Optimiser le processus consiste à forcer une évolution dans le sens direct, on doit donc travailler à basse pression pour favoriser la formation de  $\text{CO}_{2(g)}$ .

26. Si le carbonate de calcium solide est introduit à 300 K dans un réacteur fonctionnant en mode adiabatique, est-il possible d'envisager que la réaction de calcination du carbonate de calcium soit thermiquement auto-entretenu à 1000 K ? (1)

**Solution:** La réaction est endothermique donc il faut l'entretenir pour que la température soit maintenue à 1000K.

**Document 3 - Le four à chaux**

L'oxyde de calcium  $\text{CaO}$  ou « chaux vive » et l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou « chaux éteinte » sont utilisés depuis l'Antiquité en construction pour réaliser des mortiers, des enduits ou des badigeons de mur. La chaux est également utilisée dans l'agriculture pour assécher et détruire des matières organiques riches en eau ou comme protection des arbres fruitiers.

L'oxyde de calcium  $\text{CaO}$  est obtenu par calcination du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  solide réalisée à température élevée dans des fours à chaux. Cette transformation s'accompagne d'un dégagement gazeux. Les anciens fours à chaux ou chaufour étaient d'imposantes constructions, de forme cylindrique et avaient une large paroi intérieure le plus souvent revêtue de briques. Grâce à la pierre calcaire qui était réduite en petits morceaux, on pouvait obtenir de la chaux. Le four était alimenté par son ouverture située en haut (appelée le *gueulard*) dont une rampe permettait le plus souvent l'accès.

Les chaufourniers alternaient les lits de pierre et de charbon pour le remplir au maximum. Du bois était apporté au pied du bâtiment pour assurer la mise à feu. Le chaufournier devait alors maintenir une température supérieure à 1 000 K, tout en alimentant le four en pierre calcaire et en entretenant le feu.

Une fois la cuisson faite, la chaux était récupérée grâce à une ouverture basse du four appelée l'*ébrasoir*. La chaux vive était alors éteinte dans une fosse adjacente à l'aide d'une grande quantité d'eau, le plus souvent à l'aide de canalisations provenant d'une rivière voisine. La chaux éteinte était par la suite placée dans des barils avant d'être utilisée en maçonnerie.

Extraits de l'article Wikipédia *Four à chaux* (décembre 2014)  
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Four%C3%A0%20chaux?oldid=111638372>



**Données numériques**

<b>Rayon métallique en pm :</b>	$R(\text{Mg}) \approx 150$ ; $R(\text{Ca}) \approx 200$
<b>Paramètre de maille :</b>	$a = 560$ pm pour la structure $\text{Ca}_\alpha$
<b>Masse molaire en <math>\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}</math> :</b>	C : 12 ; O : 16 ; Mg : 24 ; Ca : 40
<b>Nombre d'Avogadro :</b>	$N_a \approx 6,0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
<b>Constante des gaz parfaits :</b>	$R \approx 8,3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
<b>Température de fusion :</b>	$T_{\text{fus}}(\text{CaCO}_3) \approx 1\,100 \text{ K}$ ; $T_{\text{fus}}(\text{CaO}) \approx 2\,850 \text{ K}$

**Enthalpies standards de formation  $\Delta_f H^\circ$  et entropies molaires standards  $S_m^\circ$  à 1 000 K :**

Composé	$\Delta_f H^\circ$ (en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$S_m^\circ$ (en $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
CaO(s)	- 600	105
CaCO <sub>3</sub> (s)	- 1 100	225
CO <sub>2</sub> (g)	- 350	270
O <sub>2</sub> (g)	0	205

Table 1 - Tableau d'enthalpies standards de formation et d'entropies molaires standards

**Valeurs numériques :**

$$\ln 2 \approx 0,7 \ ; \ \ln 1,4 \approx 0,3 \ ; \ \sqrt{2} \approx 1,4 \ ; \ \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 1,2 \ ; \ \sqrt{3} \approx 1,7 \ ; \ 10^{-0,2} = 0,63$$

**Constante de solubilité du carbonate de calcium à 298 K :**

$$K_s = 10^{-8,4}$$

**Constantes d'acidité des couples acido-basiques de l'acide carbonique [H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>] à 298 K :**

$$K_{a1} = 10^{-6,4} \ \text{et} \ K_{a2} = 10^{-10,3}$$

**Constante d'équilibre d'autoprotolyse de l'eau à 298 K :**

$$K_e = 10^{-14}$$