

PHYSIQUE-CHIMIE
RÉSOLUTION DE PROBLÈME
Durée : 3 heures

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

Chaque candidat est responsable de la vérification de son sujet d'épreuve : pagination et impression de chaque page. Ce contrôle doit être fait en début d'épreuve. En cas de doute, il doit alerter au plus tôt le surveillant qui vérifiera et, éventuellement, remplacera son sujet.

Ce sujet comporte 16 pages numérotées de 1 à 16.

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.

Le dioxyde de carbone est un gaz qui a plutôt mauvaise réputation en raison de son rôle dans l'effet de serre et le réchauffement climatique.

Néanmoins, il présente aussi quelques aspects utiles comme témoin d'une bonne aération des pièces ou bien comme matière première en synthèse organique ou encore comme fluide caloporteur.

Ce problème va aborder ces différents aspects dans cinq parties indépendantes :

Partie A : Les détecteurs NDIR

Partie B : Modélisation mécanique des modes de vibration de la molécule de CO_2

Partie C : Les détecteurs électrochimiques

Partie D : Un exemple de valorisation du dioxyde de carbone en chimie organique

Partie E : L'utilisation du CO_2 comme fluide pour les machines frigorifiques

Les données numériques utiles à chaque partie sont regroupées à la fin de chacune d'entre elles.

Partie A : Les détecteurs NDIR

Renouveler l'air dans un milieu clos s'avère crucial en ces temps de pandémie. Pour cela, la mesure du taux de dioxyde de carbone dans l'air est un bon indicateur de la qualité d'une aération. Les détecteurs de dioxyde de carbone les plus répandus sont les détecteurs NDIR qui reposent sur la mesure de l'absorption du rayonnement infrarouge par les molécules de dioxyde de carbone.

Document 1 : La concentration en ppm

Extrait de l'article : <https://www.pourlascience.fr/sr/idees-physique/comment-bien-aerer-les-pieces-20353.php>

Dans l'air extérieur, la concentration moyenne de CO_2 est d'environ 0,04 %, c'est-à-dire que 1 molécule sur 2500 est une molécule de CO_2 . Pour éviter d'avoir à manipuler des chiffres décimaux, on utilise plutôt la « partie par million », ou ppm en abrégé. On a donc ici une concentration d'environ 400 ppm.

A1. En assimilant le dioxyde de carbone atmosphérique à un gaz parfait, montrer que la concentration en CO_2 notée $t(\text{CO}_2)$ et s'exprimant en ppm telle que définie dans le document 1 s'exprime en fonction de la concentration molaire en CO_2 notée $c(\text{CO}_2)$ et s'exprimant en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ par la relation :

$$t(\text{CO}_2) = \frac{c(\text{CO}_2) \times R \times T}{P} \times 10^9 \quad \text{relation (1)}$$

où T est la température de l'atmosphère en K, P la pression de l'atmosphère en Pa.

A2. Calculer la concentration molaire en CO_2 pour une atmosphère ($P = 1,013$ bar et $T = 25$ °C) à 400 ppm de CO_2 .

Document 2 : L'absorption du rayonnement infrarouge par le dioxyde de carbone

Extrait de l'article : <https://www.pourlascience.fr/sr/idees-physique/comment-bien-aerer-les-pieces-20353.php>

À 400 ppm de CO_2 , l'intensité d'un rayonnement vers 4 micromètres de longueur d'onde diminue de 2 % au bout de 5 centimètres. Cela semble peu, mais il faut s'en contenter si l'on veut un dispositif de mesure de petite taille.

L'absorbance est définie par $A = \log(I_0/I)$.

I_0 représente l'intensité du rayonnement initial et I l'intensité du rayonnement après la traversée du milieu.

A3. Rappeler la loi de Beer-Lambert en précisant l'unité de chaque terme, puis à l'aide du document 2, calculer le coefficient d'absorption molaire ϵ du CO_2 à 4 micromètres.

Document 3 : Notice du détecteur NDIR Aranet4

<https://www.co2indicator.nl/documentatie/ARANET4%20manuel%20FR.pdf>

Ce détecteur est muni de capteurs de température et de pression ainsi qu'un capteur à infrarouge qui évalue la concentration molaire en CO_2 . L'appareil affiche la concentration en CO_2 en ppm en utilisant la relation (1).

La notice fournit les informations suivantes :

	concentration en CO_2	température	pression
plage de mesure	0 à 9999 ppm	- 10 à 60 °C	300 à 1100 hPa
résolution	1 ppm	0,1 °C	1 hPa
précision	30 ppm	0,4 °C	1 hPa

La précision indiquée dans la notice sera assimilée à l'incertitude-type.

A4. À l'aide du document 3, calculer l'incertitude-type sur la valeur de la concentration molaire en CO_2 effectuée à la question **A2**. Écrire le résultat de manière appropriée à gardant deux chiffres significatifs pour l'incertitude-type.

Les dispositifs vieillissent au niveau de la source ou encore du capteur. Pour assurer la fiabilité de la mesure, les détecteurs NDIR de CO_2 comportent deux capteurs. L'un, A, opère à la longueur d'onde du pic d'absorption, l'autre, B, opère à une autre longueur d'onde, non absorbée, comme cela est schématisé sur la figure 1.

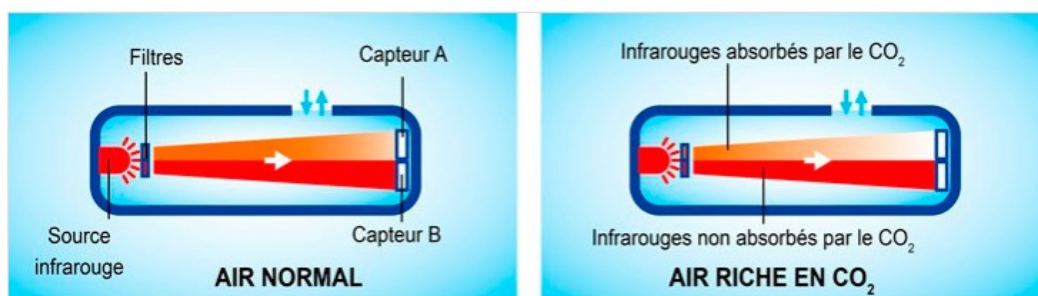


Figure 1 : Schémas d'un détecteur NDIR à double capteur

A5. Expliquer comment ce dispositif permet de s'affranchir d'un recalibrage régulier.

La relation (1) montre que la mesure de la température et de la pression est indispensable pour afficher une mesure correcte.

Certains dispositifs premier prix ne possèdent pas de capteurs de pression et de température et convertissent la concentration molaire mesurée en concentration fictive t_0 (en ppm) en prenant une température T_0 égale à 25 °C et une pression P_0 égale à 1,013 bar.

A6. Exprimer la teneur fictive t_0 en fonction de $c(\text{CO}_2)$, T_0 , P_0 et R , puis faire de même pour la teneur correcte t en fonction de $c(\text{CO}_2)$, T , P et R . En déduire l'expression de t en fonction de t_0 , des températures et des pressions.

A7. Dans le cas où une pièce est à la pression de 990 hPa et à la température de 30 °C, un dispositif à bas prix affiche 780 ppm. Calculer la teneur réelle et commenter le résultat obtenu.

Données utiles à la partie A :

Conversion d'unités :

$$T \text{ (K)} = 273 + T \text{ (°C)}$$

$$P \text{ (bar)} = 10^5 \times P \text{ (Pa)}$$

$$1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$$

Constante des gaz parfaits :

$$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Formule de propagation des incertitudes-types :

Dans le cas où une grandeur A s'exprime en fonction d'autres grandeurs B, C et D selon

$$A = k \times \frac{B \times C}{D}$$

où k est une constante, la formule de propagation des incertitudes-types est :

$$\left(\frac{u(A)}{A} \right)^2 = \left(\frac{u(B)}{B} \right)^2 + \left(\frac{u(C)}{C} \right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D} \right)^2$$

où u(A), u(B), u(C) et u(D) sont les incertitudes-types des grandeurs A, B, C et D respectivement.

Partie B : Modélisation mécanique des modes de vibration de la molécule de CO₂

La configuration électronique de l'atome de carbone dans son état fondamental est $1s^2 2s^2 2p^2$, celle de l'atome d'oxygène est $1s^2 2s^2 2p^4$.

B1. Dédurre de leur configuration électronique la position des éléments carbone et oxygène dans la classification périodique.

B2. Écrire la formule de Lewis du dioxyde de carbone CO₂. Représenter la molécule dans le modèle VSEPR et nommer sa géométrie.

B3. Justifier le caractère polaire de la liaison CO en précisant le sens de ce moment dipolaire de liaison. Conclure sur l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent pour la molécule de CO₂.

Le rayonnement infrarouge est capable d'exciter les modes de vibration des molécules. Pour qu'une molécule absorbe un rayonnement infrarouge, il faut que le moment dipolaire de la molécule varie lors de la vibration. Cette vibration est alors qualifiée d'active en infrarouge.

Dans le cas de la molécule de CO₂, il existe deux modes de vibration d'élongation (on ne s'intéressera pas aux vibrations de déformation) qui sont nommés vibration d'élongation symétrique et antisymétrique.

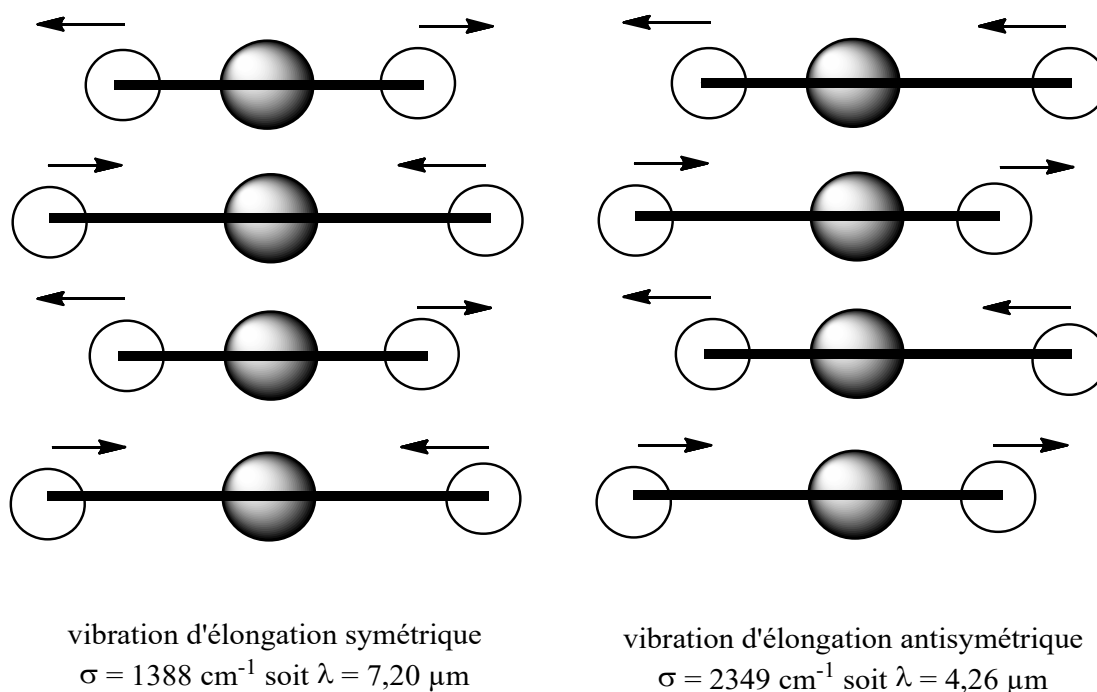


Figure 2 : Schématisation des vibrations d'élongation symétrique et antisymétrique de la molécule de CO₂

B4. Indiquer en le justifiant combien de modes d'élongation sont actifs dans le domaine spectral des infrarouges pour la molécule de CO₂.

Pour étudier les vibrations de la molécule de CO_2 , les atomes sont assimilés à des points matériels de masse m_1 pour l'atome d'oxygène et de masse m_2 pour l'atome de carbone. On suppose que chaque liaison CO est indépendante de l'autre et qu'il n'y a pas d'interaction entre les deux atomes extrêmes d'oxygène de la molécule. De plus, chaque molécule forme un système isolé pour lequel l'action de la pesanteur est négligée.

Les trois atomes se déplacent suivant une direction unique repérée par un vecteur unitaire $\vec{u}_x$. À l'équilibre, les deux liaisons ont la même longueur et l'atome de carbone, noté 2 est au centre d'inertie de la molécule. Hors équilibre, chaque atome est repéré par rapport à sa position d'équilibre par les abscisses x_1, x_2 et x_3 . (Figure 3)

La vibration d'une liaison entre atomes dans une molécule peut être modélisée par celle de masses à l'extrémité d'un ressort.

La force de rappel d'un ressort est de la forme $\vec{f} = \pm k(\ell - \ell_0)\vec{u}_x$ où k est la constante de raideur du ressort, ℓ_0 est sa longueur à l'équilibre et ℓ sa longueur hors équilibre. Le signe + ou – dans la relation dépend du signe de l'élongation ($\ell - \ell_0$) et de la nécessité d'orienter la force dans un sens cohérent par rapport au vecteur unitaire.

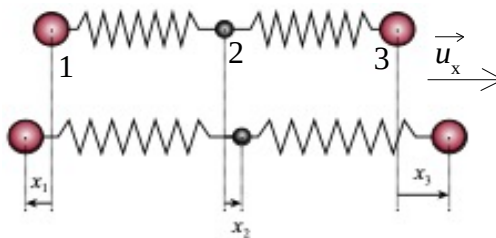


Figure 3 : Vibration de la molécule de dioxyde de carbone
 x_1, x_2, x_3 sont des grandeurs algébriques ($x_1 < 0, x_2 > 0, x_3 > 0$)

B5. À partir des notations de la figure 3, exprimer les forces $\vec{f}_1$ et $\vec{f}_3$ qu'exercent les ressorts sur les atomes d'oxygène 1 et 3 en fonction de k, x_1, x_2, x_3 et $\vec{u}_x$.

Pour appliquer la relation fondamentale de la dynamique ou théorème du centre d'inertie, il faut se placer dans un référentiel galiléen.

B6. Rappeler la définition d'un référentiel galiléen.

B7. Indiquer la raison pour laquelle le référentiel lié au centre de masse, ou centre d'inertie de la molécule est un référentiel galiléen.

B8. On appelle G le centre de masse ou centre d'inertie de la molécule de CO_2 . Ce point est sur l'axe du mouvement.

On appelle M_1, M_2 et M_3 les points de l'espace correspondant aux positions des atomes.

On note $\overrightarrow{M_{\text{éq}} M_1} = x_1 \vec{u}_x$ où $M_{\text{éq}}$ est la position d'équilibre du point M_1 .

Une notation équivalente s'applique aux deux autres atomes.

La relation barycentrique du centre de masse peut s'écrire à chaque instant :

$$m_1 \overrightarrow{GM_1} + m_2 \overrightarrow{GM_2} + m_1 \overrightarrow{GM_3} = \vec{0}$$

Montrer que cette relation de définition du centre de masse en un point G appliquée aussi à la position d'équilibre des trois atomes conduit entre les élongations, à la relation suivante :

$$m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_1 x_3 = 0 \quad (\text{équation 1})$$

Cette relation, même non démontrée, pourra être utilisée pour la suite de cette partie.

B9. En appliquant la deuxième loi de Newton à l'atome 1 d'oxygène et en utilisant l'équation 1 pour éliminer x_2 , établir l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} + \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) k x_1 + \frac{k}{m_2} x_3 = 0 \quad (\text{équation 2})$$

B10. Par la même méthode mais appliquée à l'atome 3 d'oxygène, établir une autre équation différentielle analogue, nommée équation 3.

La résolution du système formé par les équations 2 et 3 conduit à la recherche des solutions harmoniques du système. Pour cela, on pose pour les grandeurs $x_1(t)$ et $x_3(t)$ les expressions suivantes : $x_1(t) = A_1 \sin(\omega t)$ et $x_3(t) = A_3 \sin(\omega t)$ où ω est la pulsation des vibrations et les grandeurs A_1 et A_3 sont les amplitudes des vibrations.

B11. Montrer que l'on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \left(-\omega^2 + \frac{k}{m_1} + \frac{k}{m_2} \right) A_1 + \frac{k}{m_2} A_3 = 0 \\ \frac{k}{m_2} A_1 + \left(-\omega^2 + \frac{k}{m_1} + \frac{k}{m_2} \right) A_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{équation 4})$$

B12. Pour que le système nommé équation 4 admette des solutions non nulles, cela implique une relation entre ω , k , m_1 et m_2 . Établir cette relation.

B13. Exprimer les deux pulsations propres notées ω_1 pour la plus petite et ω_2 pour la plus grande.

B14. Calculer numériquement ω_1 et ω_2 .

B15. En reportant les expressions de ω_1 et ω_2 dans l'équation 4, associer chaque pulsation au mode de vibration symétrique ou antisymétrique.

B16. Pour un rayonnement infrarouge, la pulsation ω , la longueur d'onde λ et la célérité de l'onde c sont reliées par la relation : $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$. Retrouver les deux longueurs d'onde annoncées sur la figure 2.

Données utiles à la partie B :

Numéro atomique : $Z(\text{C}) = 6$; $Z(\text{O}) = 8$

Électronégativité dans l'échelle de Pauling : $\chi(\text{C}) = 2,6$; $\chi(\text{O}) = 3,4$

Masse des atomes : $m_1 = 2,66 \times 10^{-26} \text{ kg}$; $m_2 = 1,99 \times 10^{-26} \text{ kg}$

Constante de raideur : $k = 1,42 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

Célérité des ondes électromagnétiques dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Partie C : Les détecteurs électrochimiques

Il existe une autre catégorie de détecteurs de dioxyde de carbone qui repose sur une détection électrochimique.

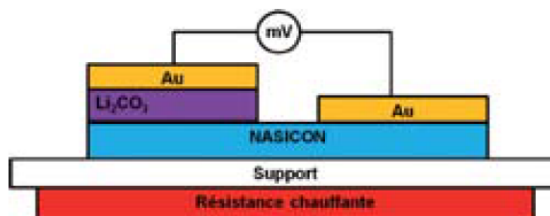
Document 5 : Le capteur électrochimique TGS 4160

Extrait de https://www.mediachimie.org/sites/default/files/techno-inf_p217.pdf

Les capteurs électrochimiques sont en fait des piles, dont un exemple est représenté sur la figure suivante.



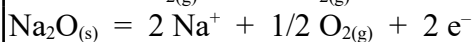
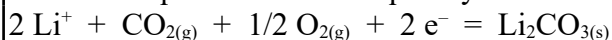
capteur électrochimique (TGS4160)



modélisation du capteur électrochimique

Les électrodes sont en or, le NASICON ($\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$) est utilisé comme électrolyte.

Les demi-équations électroniques ayant lieu aux électrodes sont les suivantes :



Les espèces Li_2CO_3 et Na_2O sont des solides ioniques constitués respectivement d'ions Li^+ et CO_3^{2-} , et d'ions Na^+ et O^{2-} .

Ces capteurs fonctionnent à une température relativement élevée de l'ordre de plusieurs centaines de degrés grâce à une plateforme chauffante. Les capteurs industriels de ce type fonctionnent bien et sont peu onéreux (de l'ordre de 10 €), mais leur durée de vie est moyenne, de deux à cinq ans.

C1. Indiquer dans chaque demi-équation électronique l'élément oxydé ou réduit en calculant son nombre d'oxydation dans les espèces où il apparaît.

C2. Préciser sur quelle électrode a lieu chaque demi-équation électronique.

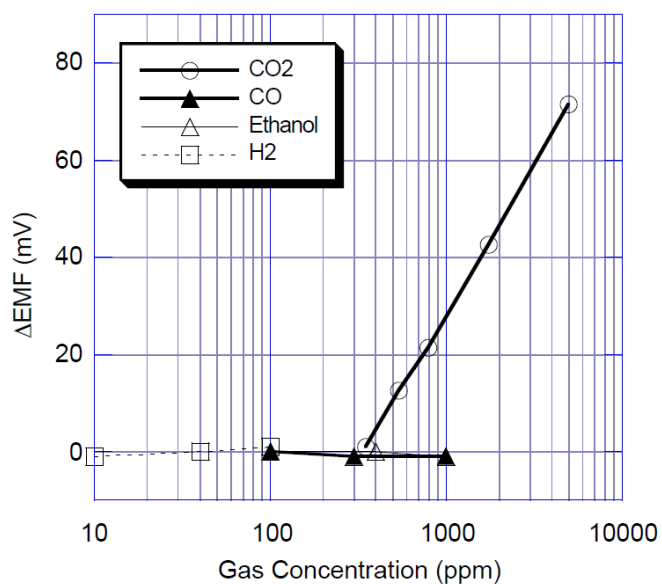
C3. Écrire l'équation de la réaction d'oxydo-réduction qui modélise le fonctionnement de la pile.

Les solides $\text{Li}_2\text{CO}_{3(\text{s})}$ et $\text{Na}_2\text{O}_{(\text{s})}$ seront considérés seuls dans leur phase. Par ailleurs on notera $a(\text{Li}^+)$ et $a(\text{Na}^+)$ les activités des ions Li^+ et Na^+ dans l'électrolyte.

C4. Exprimer le potentiel de chacune des deux électrodes puis en déduire la force électromotrice de la pile. Montrer alors que ce dispositif peut servir de capteur de $\text{CO}_{2(\text{g})}$.

C5. D'après le document 6, préciser un avantage de ce dispositif.

Document 6 : Extrait de la notice du capteur TGS 4161



$$\Delta\text{EMF} = \text{EMF1} - \text{EMF2}$$

EMF1 correspond à la force électromotrice du capteur dans une atmosphère contenant 350 ppm de CO_{2(g)}

EMF2 correspond à la force électromotrice du capteur dans une atmosphère contenant les différents gaz en légende à une concentration donnée en abscisse.

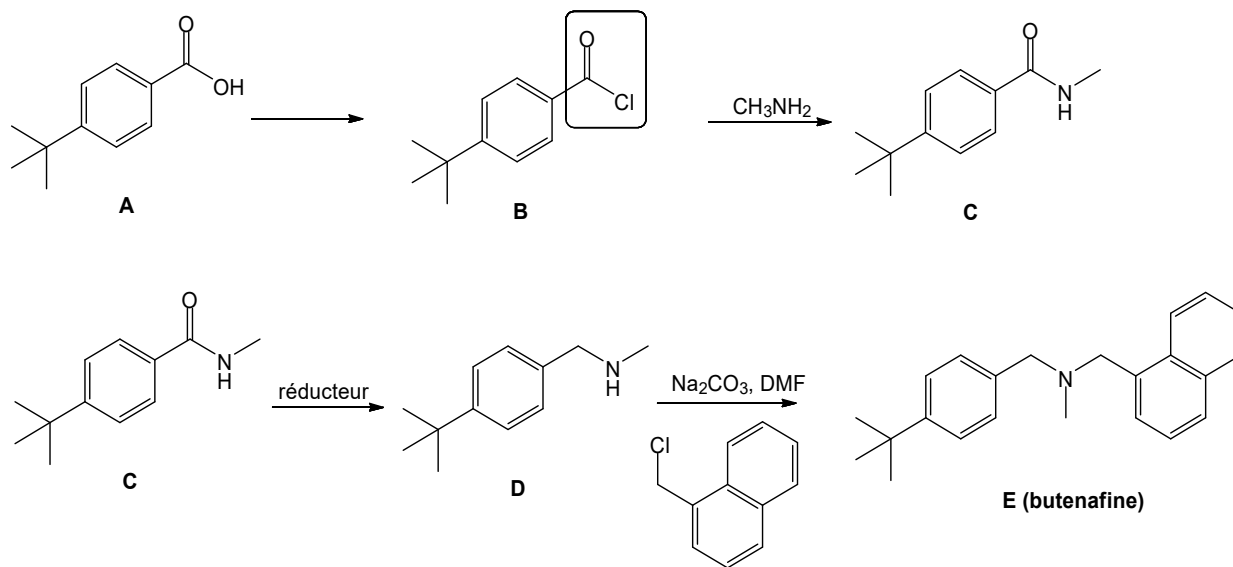
Partie D : Un exemple de valorisation du dioxyde de carbone en chimie organique

Le dioxyde de carbone est trop souvent vu comme un déchet. Il peut pourtant être utilisé comme réactif dans de nombreuses réactions.

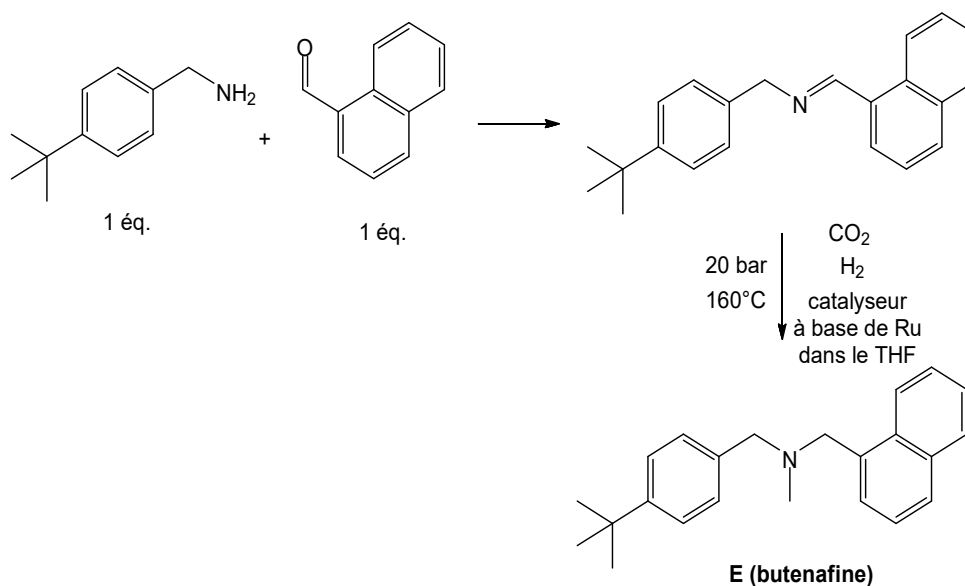
Le groupe de Walter Leitner a travaillé sur l'utilisation du dioxyde de carbone dans des réactions utilisant des catalyseurs à base de ruthénium et a mis à profit cette réaction pour la synthèse de la butenafine qui est une molécule utilisée en dermatologie comme fongicide antimucosique.

Document 7 : Deux approches synthétiques de la butenafine

Les informations sont tirées de la publication suivante : *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, 53, 11010 – 11014.



Synthèse classique dite voie A



Synthèse catalytique : voie B

D1. Donner le nom de la fonction entourée de **B**. Proposer un réactif permettant le passage de **A** à **B** et indiquer l'intérêt de la transformation de **A** en **B**.

D2. Écrire le mécanisme de passage de **B** à **C**. Expliquer pourquoi la méthanimine, CH_3NH_2 , est introduit en excès.

D3. L'étape suivante de **C** à **D** consiste en une réduction. À l'aide du document 8, proposer un réducteur utilisable.

Document 8 : Réducteurs en chimie organique

Conversion de fonctions	Réducteurs
cétone $\rightarrow$ alcool	NaBH_4 dans l'éthanol
ester $\rightarrow$ alcool	1/ LiAlH_4 dans le diéther 2/ H_2O , H^+
ester $\rightarrow$ aldéhyde	1/ DIBAL-H dans l'hexane 2/ H_2O , H^+
amide $\rightarrow$ aldéhyde	1/ DIBAL-H dans l'hexane 2/ H_2O , H^+
amide $\rightarrow$ amine	1/ LiAlH_4 dans le diéther 2/ H_2O , H^+
alcène $\rightarrow$ alcane	H_2 avec $\text{Ni}_{(s)}$

Lors du passage de **E** à **D**, le DMF est un solvant qui permet la dissolution du carbonate de sodium Na_2CO_3 .

D4. Justifier la nature du mécanisme limite de formation de **E** à partir de **D**, puis l'écrire. Préciser le rôle des ions carbonate.

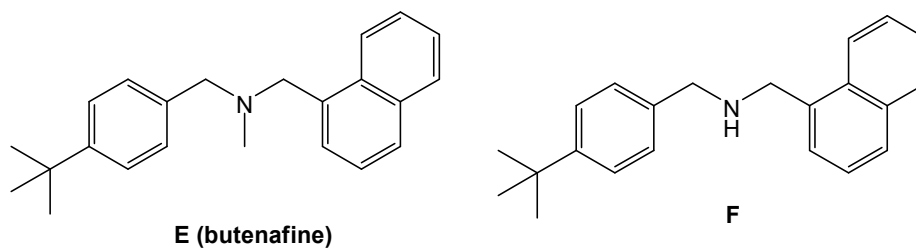
D5. À l'aide du document 9, expliquer en une vingtaine de lignes l'intérêt en terme de stratégie de synthèse de la voie B à l'aide du catalyseur par rapport à la voie A classique.

Document 9 : Les 12 principes de la chimie verte

<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/introduction-a-la-chimie-verte>



Lors de l'utilisation du catalyseur au ruthénium, le sous-produit **F** est fréquemment formé. L'optimisation des conditions expérimentales permet de minimiser sa formation.



Les spectres infrarouge, RMN ^1H et de masse effectués sur le produit obtenu par la voie B sont donnés dans le document 10.

D6. Exploiter les données de chacune des trois analyses du document 10 afin de valider la formation de la butenafine **E** et non du sous-produit **F**.

Document 10 : Analyse du produit obtenu par la voie B

Nombres d'ondes en cm^{-1} des principales bandes visibles sur le spectre infrarouge :

3048 – 2960 – 2868 – 1597 – 1511 – 1395 – 1363 – 1336

Pics visibles sur le spectre RMN ^1H :

Valeurs des déplacements chimiques en ppm des pics avec entre parenthèses l'intégration suivie de la multiplicité.

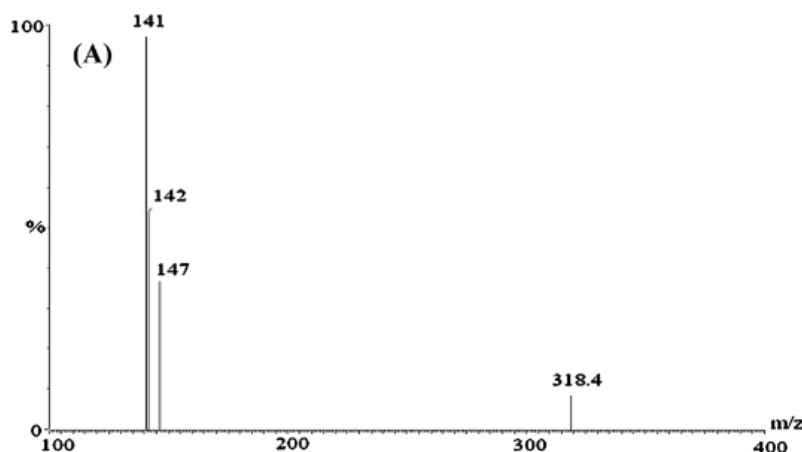
s : singulet ; d : doublet ; m : massif

8,25 (1H, m) ; 7,82 (1H, m) ; 7,75 (1H, d) ; 7,45 (3H, m) ; 7,30 (5H, m) ; 3,98 (2H, s) ;

3,57 (2H, s) ; 2,20 (3H, s) ; 1,31 (9H, s)

Spectre de masse :

Lors de la réalisation des spectres de masse, les amines sont protonées.



Données utiles à la partie D :

Masses molaires ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$) :

H	C	N	O
1,01	12,01	14,01	16,00

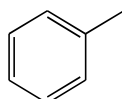
Tables de nombres d'onde de quelques vibrations d'élongation en infrarouge :

liaison	N-H (amine)	C-H	C=C	C-N	C-C
nombre d'onde (cm^{-1})	3300 – 3400	2850 – 3100	1620 – 1690	1250 – 1350	1000 – 1250

Déplacements chimiques de quelques protons en RMN ^1H :

environnement	Ar-H	-CH ₃	-CH ₂ -	N-CH ₂ -Ar	N-CH ₃	N-H
déplacement chimique (ppm)	7,0 – 9,0	0,8 – 1,6	1,2 – 1,4	3,5 – 4,1	2,2 – 3,0	0,5 – 3,0

où Ar est un groupe aromatique :



Partie E : L'utilisation du CO₂ comme fluide pour les machines frigorifiques

Le dioxyde de carbone (CO₂) peut être utilisé comme fluide thermodynamique, en particulier pour les groupes froids des supermarchés. On représente le cycle d'une machine thermique ditherme sur le diagramme du CO₂. Pour obtenir une efficacité importante le cycle utilisé est le cycle 1-2-3-4-1 tracé sur le diagramme du document 11. On parle de cycle transcritique.

Le tableau suivant précise les points importants de ce cycle et les associe aux organes principaux de la machine frigorifique :

point du cycle	1		2		3		4		1
organe traversé		compresseur		refroidisseur		détendeur		évaporateur	
température (°C)	-30		145		?		-30		-30
pression (bar)	14,3		100		100		14,3		14,3
enthalpie massique (kJ·kg ⁻¹)	448		566		240		240		448

E1. Indiquer l'état physique du fluide au point 1 du cycle.

E2. Déterminer la composition du fluide au point 4.

E3. Déterminer la pression dans l'évaporateur, notée $P_{\text{évap}}$.

E4. La compression adiabatique du dioxyde de carbone s'effectue dans un compresseur au cours de la transformation 1 → 2. En justifiant la réponse, indiquer si cette transformation est réversible.

E5. Dans le domaine gazeux, les courbes d'entropie massique constante présentent une pente toujours positive dans le diagramme pression – enthalpie massique. Justifier cette propriété.

E6. Cette machine frigorifique fonctionne sous une haute pression, notée P_h , préciser la valeur de cette pression maximale.

E7. Le circuit du fluide ne contient pas de condenseur (plus précisément un liquéfacteur) mais un refroidisseur nommé « gas cooler ». Déterminer températures θ_e et θ_s respectivement à l'entrée et à la sortie du « gas cooler ».

E8. Le dioxyde de carbone subit une détente au cours du cycle. Préciser entre quels points cette détente s'effectue et la caractéristique de cette détente.

E9. Le point de coordonnées $h = 334 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $P = 74 \text{ bar}$ est un point remarquable. Indiquer son nom et sa température.

E10. On voudrait savoir si au point G , représenté sur le diagramme fourni du document 11, le CO_2 obéit à l'équation du gaz parfait. Donner les valeurs de la pression, notée P_G , de la température, notée T_G et du volume massique, noté v_G en ce point G . On donne la constante massique du CO_2 : $r = R/M = 1,89 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ où R est la constante des gaz parfaits et M la masse molaire du dioxyde de carbone. Conclure.

E11. Expliquer comment il est possible par la simple observation des courbes isothermes et isenthalpiques dans le domaine gazeux de déterminer le caractère parfait ou non du gaz étudié.

E12. En supposant que les échanges thermiques du CO_2 avec les sources atteignent l'équilibre thermique en fin de transformation, calculer les valeurs de la température T_F de la source froide et de la température T_C de la source chaude pour cette machine.

E13. Établir l'expression de l'efficacité maximale, notée $e_{\max}$ d'un groupe réfrigérant en fonction des températures des sources. Calculer numériquement cette efficacité maximale dans le cas de la machine étudiée.

E14. Rappeler l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un système en écoulement en utilisant les grandeurs énergétiques massiques.

E15. En déduire l'expression puis la valeur de l'échange thermique massique avec la source froide.

E16. Exprimer puis calculer la valeur de l'échange thermique massique avec la source chaude

E17. Exprimer l'efficacité réelle, notée e_F de cette machine frigorifique et calculer sa valeur numérique.

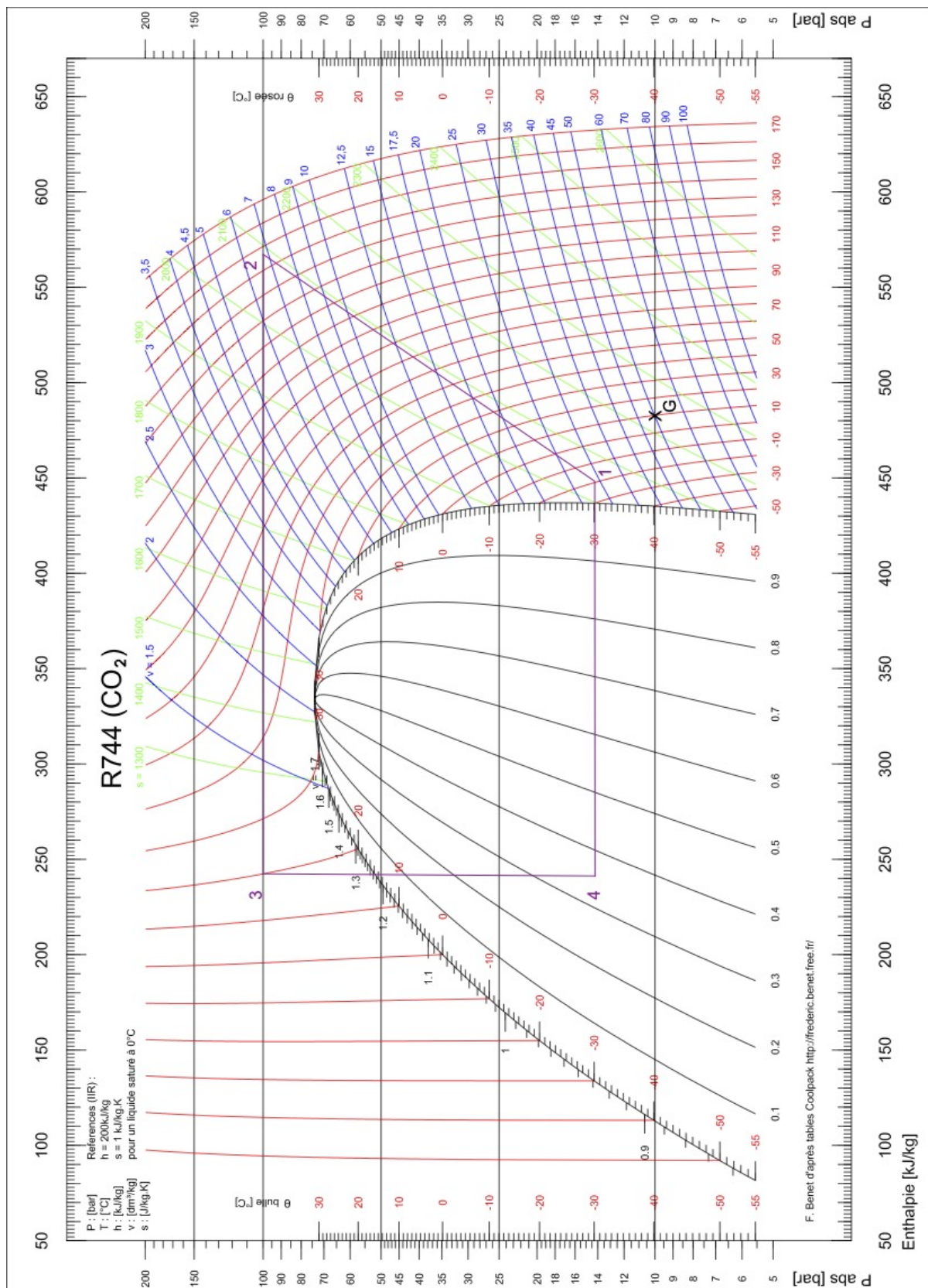
Données utiles à la partie E :

Conversion d'unités :

$$T (\text{K}) = 273 + T (^\circ\text{C})$$

$$P (\text{bar}) = 10^5 \times P (\text{Pa})$$

Document 11 : Cycle du CO₂ sur un diagramme pression enthalpie massique



FIN DU SUJET