

SCIENCES PHYSIQUES

Durée : 3 heures

L'usage d'une calculatrice est autorisé 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.

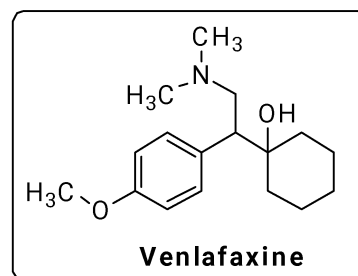
Chaque candidat est responsable de la vérification de son sujet d'épreuve : pagination et impression de chaque page. Ce contrôle doit être fait en début d'épreuve. En cas de doute, il doit alerter au plus tôt le chef de centre qui vérifiera et éventuellement remplacera son sujet.

CHIMIE

Les parties A et B sont indépendantes. La partie A est elle-même constituée de deux parties I et II indépendantes.

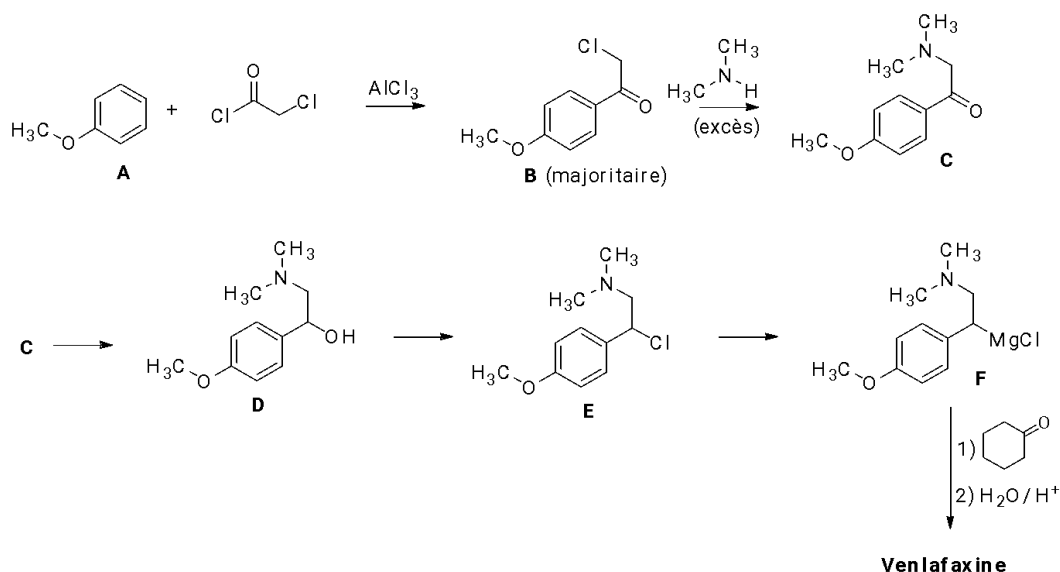
A. Synthèse de la Venlafaxine

La Venlafaxine est le nom courant du 1-[2-(diméthylamino)-1-(4-méthoxyphényl)éthyl]cyclohexanol. Il s'agit d'un antidépresseur-anxiolytique apparu au milieu des années 90 et prescrit contre la dépression et le trouble panique.



I. Première synthèse

Une première synthèse de la Venlafaxine est proposée ci-après :

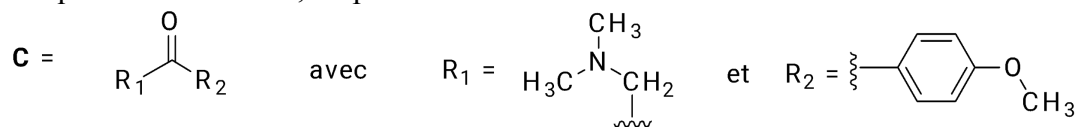


1. Justifier succinctement la régio-sélectivité de la réaction **A** $\square$ **B**. Aucune écriture de formules n'est demandée pour répondre à cette question.

2. Quel est le rôle du chlorure d'aluminium AlCl_3 ?

3. Proposer (en le justifiant) un mécanisme pour la réaction **B** $\square$ **C**. Pourquoi cette réaction est-elle menée avec un large excès de diméthylamine ?

Pour les questions suivantes, on pourra écrire :



4. Proposer un réactif permettant la réaction **C** $\square$ **D**. Écrire l'équation de la réaction.

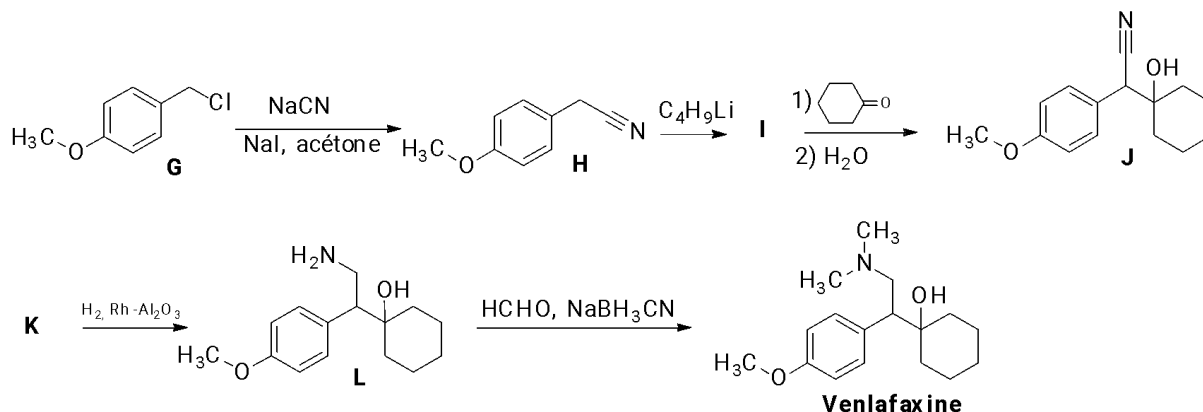
5. Proposer un réactif permettant la réaction **D** $\square$ **E**. Écrire l'équation de la réaction.

6. Détailler les conditions opératoires permettant de transformer **E** en **F**.

7. Proposer un schéma réactionnel (ou mécanisme simplifié) de la réaction de **F** avec la cyclohexanone.

II. Une voie de synthèse alternative

La voie de synthèse la plus couramment utilisée passe par un nitrile **D** qui est par la suite hydrogéné puis méthylé.



1. Obtention du *para*-methoxyphenylacétonitrile **H**

Le protocole est le suivant :

a) À une solution de *para*-(chlorométhyl)anisole **G** dans de l'acétone est ajouté par petites portions du cyanure de sodium (NaCN) puis de l'iodure de sodium (NaI). Le mélange est chauffé à reflux pendant 16 heures.

b) Le mélange réactionnel est filtré. La phase solide (essentiellement composée de chlorure de sodium NaCl) est jetée.

c) La phase liquide est évaporée sous pression réduite de façon à éliminer l'acétone.

d) L'huile obtenue est diluée dans un mélange bi-phasique benzène/eau. La phase organique est isolée, séchée et évaporée sous pression réduite.

e) Le brut réactionnel est alors purifié par distillation sous pression réduite ($T_{éb} = 94-97^{\circ}\text{C}$ sous une pression de 40 Pa). On mesure alors un indice de réfraction pour le produit de $n_D = 1,588$.

8. L'iodure de sodium (NaI) permet d'augmenter sensiblement la vitesse de la réaction. Comment appelle-t-on un tel composé ? Donner la structure de l'intermédiaire réactionnel faisant intervenir NaI et expliquant l'accroissement de la vitesse de réaction.

9. Pourquoi est-il indispensable d'évaporer l'acétone avant d'effectuer la séparation liquide-liquide ?

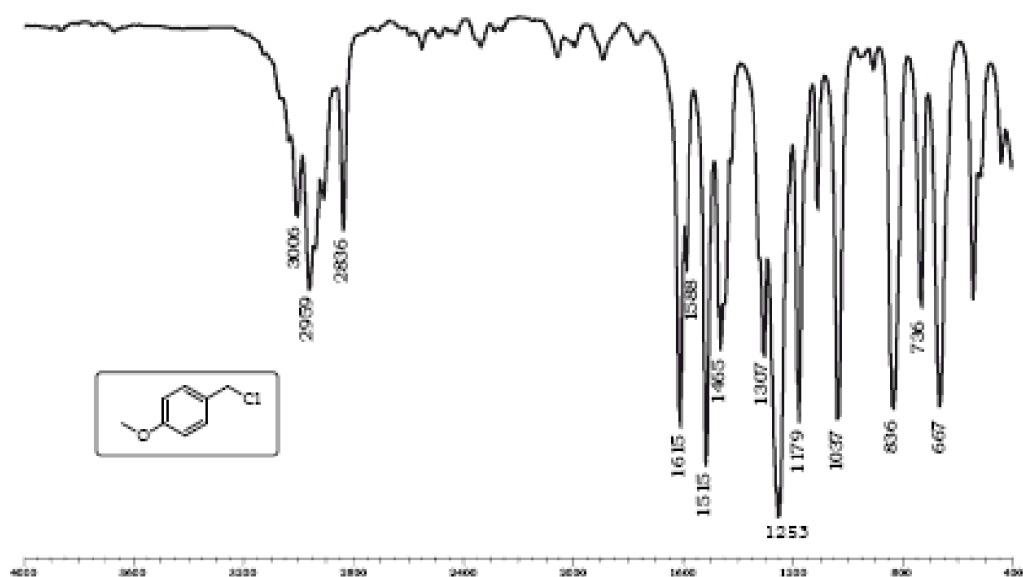
10. Que contiennent la phase organique et la phase aqueuse dans la partie d) du protocole ?

11. Donner une méthode permettant d'assécher la phase organique.

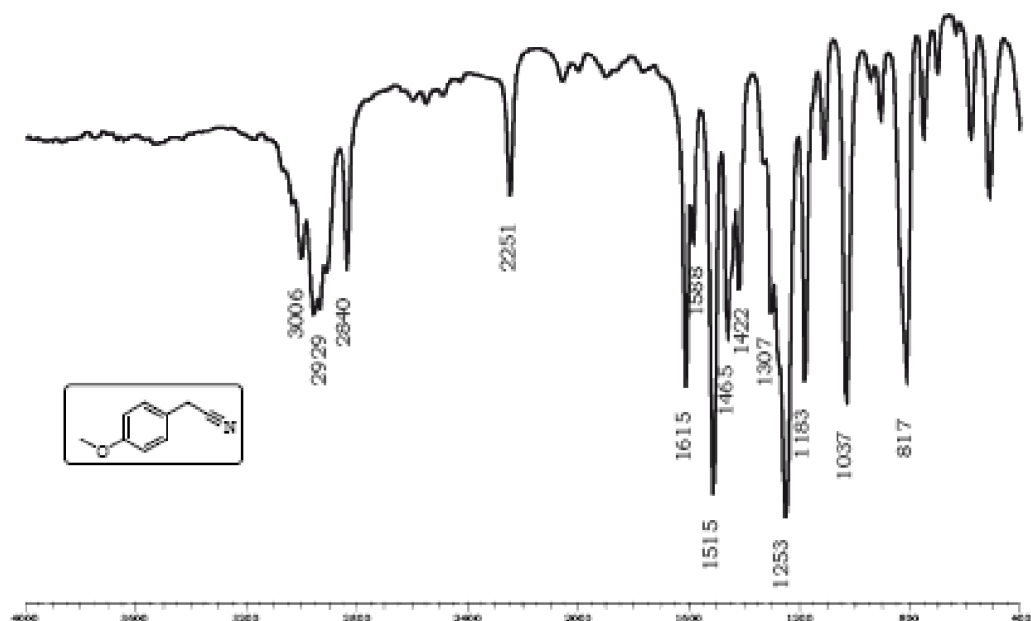
12. Proposer un schéma détaillé d'un montage de purification par distillation sous pression atmosphérique.

13. Quel est l'appareil permettant de mesurer l'indice de réfraction d'un liquide ? Que permet cette mesure quant à la caractérisation du produit ?

On donne les spectres IR des molécules **G** et **H** ainsi que le spectre RMN de **H**. (Les tables et RMN et IR sont en annexes en fin de sujet, pages 12 et 13).



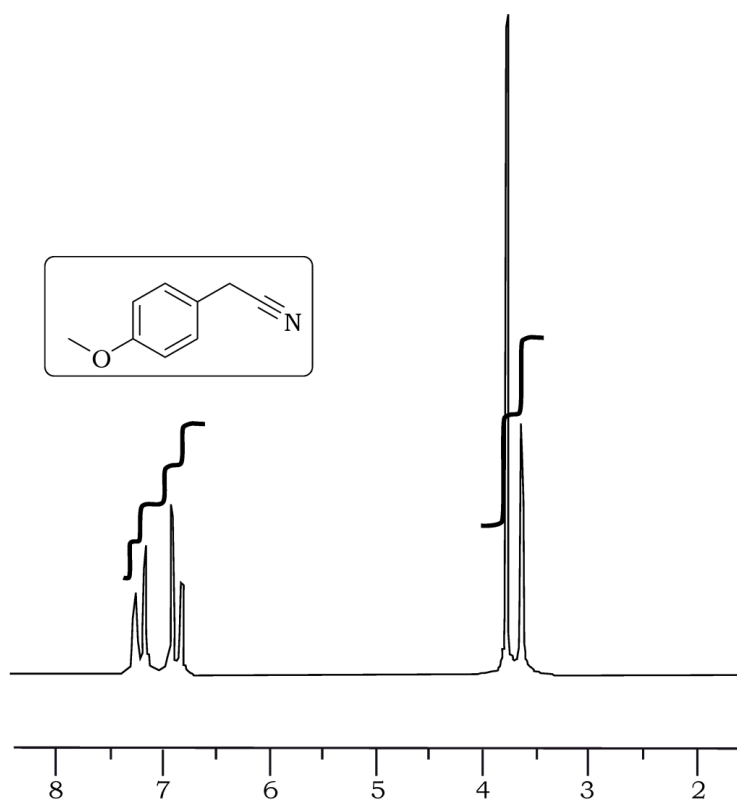
Spectre infrarouge du composé **G**
(abscisse : nombre d'onde en cm^{-1} / ordonnée : transmittance)



Spectre infrarouge du composé **H** synthétisé
(abscisse : nombre d'onde en cm^{-1} / ordonnée : transmittance)

14. La réalisation de ces deux spectres nous permet-elle d'affirmer que la réaction s'est correctement produite (du *para*-methoxyphenylacetonitrile a bien été obtenu à partir de *para*-(chloromethyl)anisole) ?

15. Donner la (les) valeur(s) des nombres d'onde correspondant à la liaison C–Cl pour le composé **G**.



Spectre RMN du composé **H** (abscisse : déplacement chimique en ppm)

16. Interpréter le spectre RMN obtenu pour le composé **H**.

2. Obtention de **J**

Une solution de **H** est refroidie à la température de -78°C . Une solution de *n*-butyllithium est ajoutée goutte à goutte. Le produit **I** obtenu n'est pas isolé, mais mis à réagir directement avec une solution de cyclohexanone qui est elle aussi ajoutée goutte à goutte au mélange réactionnel. L'ensemble est mis au contact de l'eau puis le produit **J** est isolé.

Le *n*-butyllithium joue ici le rôle de base forte selon l'équation suivante :



17. Écrire la structure de l'anion **I** en justifiant précisément sa stabilité particulière.

18. La cyclohexanone possède-t-elle un ou des sites électrophiles ? On peut s'appuyer sur l'écriture de formules mésomères pour répondre à la question.

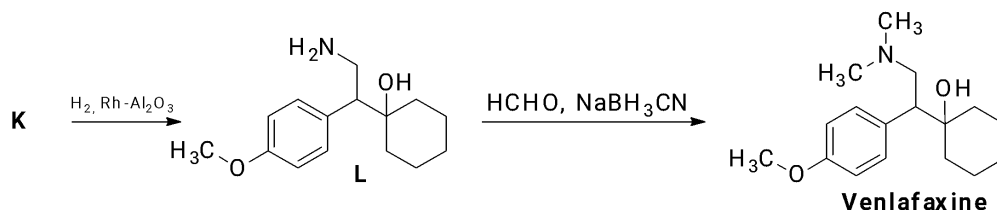
19. Proposer un mécanisme de la réaction de **I** avec la cyclohexanone conduisant à l'obtention de **J**.

20. Pourquoi est-il indispensable de respecter l'ordre d'introduction : **H** puis *n*-butyllithium puis cyclohexanone ? Donner la structure du produit secondaire obtenu si cet ordre n'est pas suivi.

3. Obtention de la (-)-Venlafaxine.

Données : Numéros atomiques : H : 1 ; C : 6 ; N : 7 ; O : 8

La fin de la synthèse est rappelée ci-dessous :



21. Quel nom peut-on donner à la réaction **K** $\rightarrow$ **L** ?

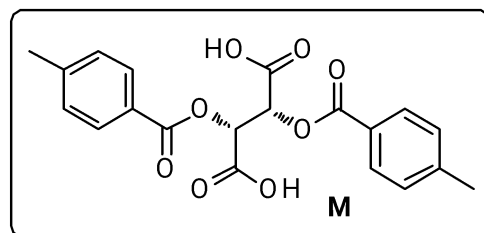
22. Localiser le (les) centre(s) stéréogène(s) du composé **L** obtenu. Ce dernier possède-t-il des propriétés optiques ?

23. Le composé NaBH_3CN a une réactivité similaire (mais beaucoup moins forte) à celle de NaBH_4 . Pour transformer une mole de **L** en Venlafaxine, quelle quantité de méthanal doit on ajouter ?

Par cristallisation en présence d'un dérivé (noté **M**) de l'acide tartrique, il est possible d'isoler la (-)-Venlafaxine avec un excès énantiomérique : $ee = 98\%$.

24. Donner la configuration absolue des atomes de carbone asymétriques de **M**. Justifier brièvement.

25. Que signifie le (-) dans le nom (-)-Venlafaxine ? Avec quel appareil peut-on déterminer ce signe ?



26. Le carbone asymétrique de la (–)-Venlafaxine est de configuration (*R*). Dessiner la (–)-Venlafaxine en utilisant la représentation de Cram et en justifiant brièvement.

27. Un excès énantiomérique est défini par la relation suivante :

$$ee = \frac{(\text{concentration de (–)-Venlafaxine}) - (\text{concentration de (+)-Venlafaxine})}{(\text{concentration de (–)-Venlafaxine}) + (\text{concentration de (+)-Venlafaxine})}$$

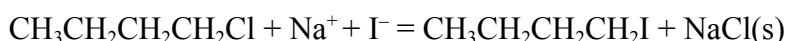
Donner alors la fraction molaire de (–)-Venlafaxine du mélange obtenu.

B. Étude cinétique de la réaction de FINKELSTEIN

Données : $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

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

La synthèse de la Venlafaxine fait intervenir une variante de la réaction de FINKELSTEIN. Cette dernière réaction est une substitution nucléophile permettant de passer d'un chloroalcane à un iodoalcane. Le but de cette partie est l'étude cinétique de cette réaction sur le cas du 1-chlorobutane ce qui est décrit par l'équation :



Le chlorure de sodium (NaCl) est insoluble dans le solvant de cette réaction (l'acétone). La conséquence de cette précipitation est double : d'une part la réaction ne peut se produire que dans le sens de formation du 1-iodobutane ; d'autre part la concentration en ion dans le milieu diminue au fur et à mesure que la réaction se produit.

La réaction est menée à 20°C, les réactifs étant initialement introduits en proportions stœchiométriques avec une concentration $C_0 = 330 \text{ mmol.L}^{-1}$. On obtient alors les résultats expérimentaux suivant :

$[\text{Na}^+]$ (mmol.L ⁻¹)	322	316	308	301	281	262	246	230	217	195	175
t (s)	50	120	230	350	600	900	1200	1500	1800	2400	3000

28. Par quelle méthode physico-chimique est-il possible de suivre l'avancement de la réaction ?

29. Donner la configuration électronique du sodium Na ($Z = 11$) à l'état fondamental et justifier que son ion le plus couramment rencontré soit Na^+ .

On émet l'hypothèse que la réaction de FINKELSTEIN est une $\text{S}_{\text{N}}2$ impliquant le 1-chlorobutane et l'ion iodure I^- .

30. Écrire l'expression de la vitesse de la réaction en fonction des concentrations des réactifs et de la constante de vitesse k de la réaction.

31. Écrire le tableau d'avancement de la réaction.

32. Exprimer à nouveau la vitesse de la réaction uniquement en fonction de l'avancement volumique x de la réaction, de k et de la concentration initiale C_0 en iodure de sodium.

33. Écrire l'équation différentielle relative à x puis donner une relation liant x , t , k et C_0 .

34. Vérifier que les résultats expérimentaux sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle la réaction de FINKELSTEIN est une S_N2 . Pour ce faire, on peut, au choix, procéder par une méthode graphique ou par une régression linéaire à la calculatrice.

35. Donner la valeur de k .

D'autres expériences menées à 30°C et 40°C ont permis de déterminer les valeurs de k :

$\theta (^{\circ}\text{C})$	30	40
$k \times 10^4 \text{ (L.mol}^{-1}.\text{s}^{-1}\text{)}$	23,2	50,9

36. Calculer la valeur de l'énergie d'activation de la réaction.

PHYSIQUE

Les parties A et B sont indépendantes.

La séquestration du dioxyde de carbone

Les activités humaines ont accru sensiblement le taux de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère : autour de 280 ppm il y a 250 ans, il est actuellement de 387 ppm (soit une augmentation de 38 %). Afin de ne pas dépasser la limite de 450 ppm au-delà de laquelle les conséquences les plus dramatiques du réchauffement climatique seront inévitables de nombreuses options sont envisagées afin de limiter les rejets de CO_2 dans l'atmosphère.

Données :

masse volumique de l'océan : $\rho_o = 1,03 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

température de l'océan : $T_o = 280 \text{ K}$

masse volumique du CO_2 solide : $\rho = 1,50 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

pression à la surface de l'océan : $P^o = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

Le référentiel terrestre est supposé galiléen et le champ de pesanteur

est : $\vec{g} = g_o \vec{u}_z$, supposé constant ; $g_o = 9,80 \text{ m.s}^{-2}$

$\vec{u}_z$ est orienté selon la verticale descendante

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

Masse molaire de CO_2 : $M_{\text{CO}_2} = 44,0 \text{ g.mol}^{-1}$

$\gamma(\text{CO}_2) = C_p/C_v = 1,32$ ($P = 1,013 \text{ bar}$ et $T = 25^\circ\text{C}$)

Chaleur latente de vaporisation du CO_2 : $\ell_{\text{vap}} = 25,2 \text{ kJ.mol}^{-1}$

A. Stockage au fond des océans

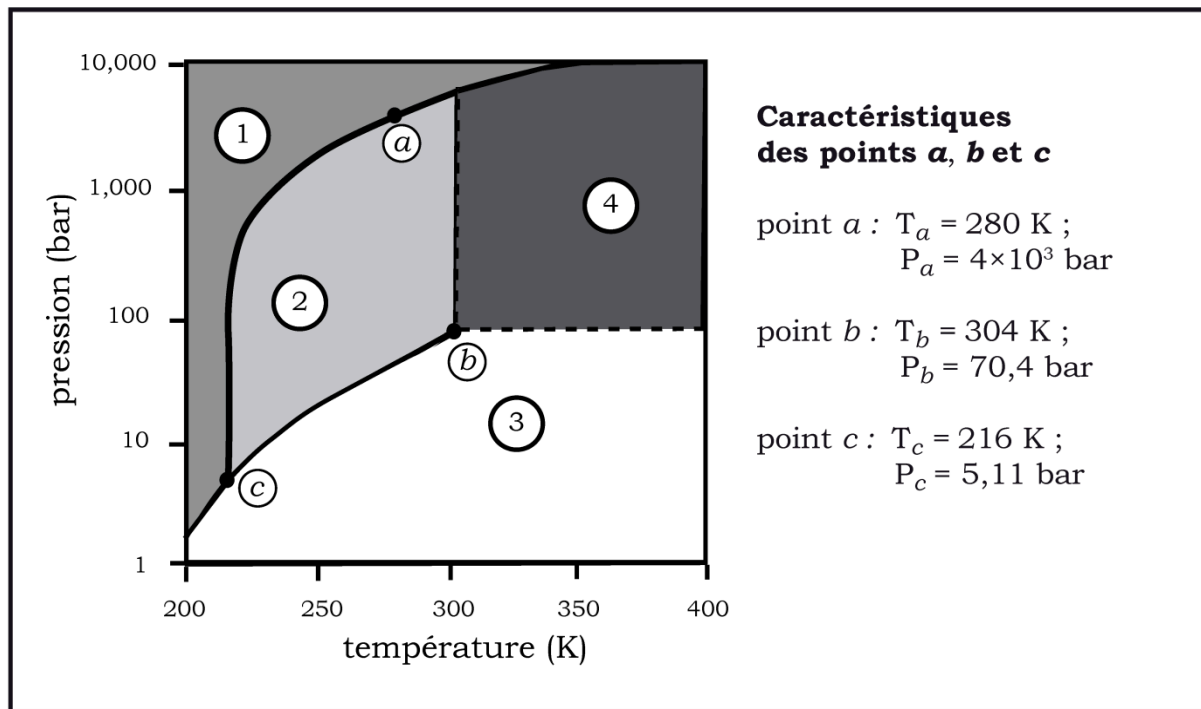
Une première proposition un peu simple (simpliste ?) consiste à former des blocs de CO_2 solide à l'aide d'installations frigorifiques puis de les laisser tomber dans des fosses marines.

On effectue les approximations suivantes :

- L'océan est un fluide homogène au repos, de température constante, incompressible et indilatable.
- Les blocs de CO_2 sont incompressibles et indilatables. Ils ont de plus une masse constante tout au long de la descente dans la fosse (approximation forte).

1. Condition de séquestration du CO_2 solide.

Page suivante, on propose le diagramme de phases du CO_2 :



37. Donner le nom de l'état physique dans chacune des quatre zones 1, 2, 3 et 4.
38. Donner les noms des points b et c et préciser leur particularité.
39. Un morceau de dioxyde de carbone solide est laissé sur une paillasse dans un laboratoire. Ce solide est-il stable ou au contraire observe-t-on un changement d'état (préciser alors son nom) ?
40. Quelle doit être la pression minimale de l'eau pour que le CO_2 reste solide dans son emplacement de stockage ?
41. On note z la profondeur du point considéré avec $z = 0$ correspondant à la surface de l'océan. Après avoir rappelé l'équation de la statique des fluides, démontrer l'expression de $P(z)$ dans l'océan en fonction de P^0 , g_0 et ρ_0 .
42. Quelle doit être la profondeur minimale de la fosse marine pour que le bloc de CO_2 solide soit dans un état stable ? Commenter le résultat.

2. Étude dynamique du bloc.

Un bloc de CO_2 solide de volume $V = 650 \text{ m}^3$ est lâché à la surface de l'océan à l'instant $t = 0$. Lors de sa chute dans l'eau, il subit, entre autres, une force de frottement fluide dont l'expression est la suivante :

$$\vec{f} = -k \vec{v} \quad \text{avec } k = 8,0 \times 10^4 \text{ kg.s}^{-1}$$

43. Faire un bilan complet des forces appliquées au solide.
44. Préciser, en le justifiant, si ces forces sont conservatives ou non.
45. Que peut-on en déduire concernant l'énergie mécanique du système ?
46. Établir l'équation différentielle vérifiée par la vitesse du bloc.
47. Donner l'expression de la vitesse limite v_{lim} du solide. Calculer v_{lim} .

48. Donner l'expression de la vitesse $v(t)$ du bloc en fonction de v_{lim} et d'une constante τ

$$\tau = \frac{\rho V}{k}$$

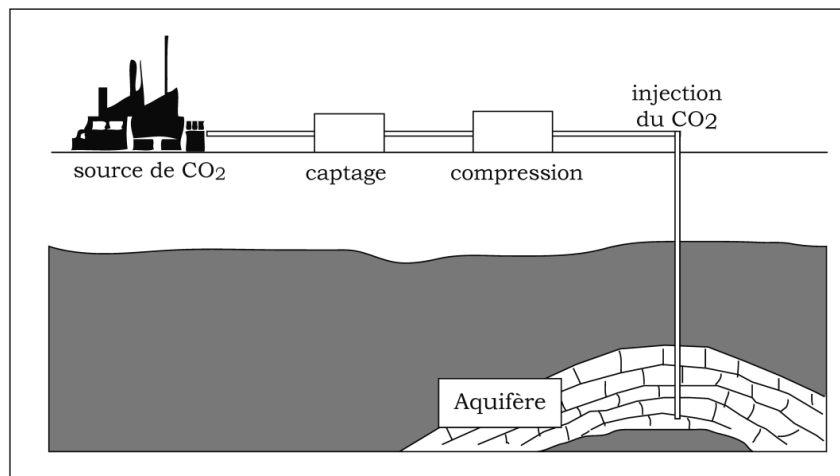
homogène à un temps :

49. En déduire l'expression de la profondeur $z(t)$ du bloc.

B. Stockage du CO₂ dans des aquifères salins

La méthode précédente de séquestration présente de nombreux inconvénients : perte partielle du CO₂ lors de la chute du bloc, dissolution du CO₂ dans l'eau de mer (et donc modification de son pH) et risque de libération brutale du CO₂ piégé.

Une solution plus raisonnable est de réinjecter le CO₂ dans le sous sol et de le piéger dans un aquifère salin.



Le CO₂ gazeux est capté à la sortie, par exemple, d'une usine. Il subit alors une série de compressions successives jusqu'à obtention d'un fluide. Ce dernier est ensuite injecté dans un aquifère salin dont la profondeur est nécessairement supérieure à 800 m. Dans de telles conditions de température et de pression le CO₂ est supercritique. Moins dense que la saumure de l'aquifère, il monte puis s'accumule sous un piège structural (une roche composée par exemple d'argile).

1. Première compression du dioxyde de carbone gazeux.

On considère une quantité n_0 de CO₂ occupant un volume $V_0 = 10 \text{ m}^3$ à une température $T_0 = 298 \text{ K}$ et une pression $P^0 = 1 \text{ bar}$. Ce gaz, que l'on considérera comme parfait, est :

- 1- mis au contact d'un thermostat à la température $T_f = 280 \text{ K}$ et à volume constant
- 2- comprimé très lentement (tout en restant au contact du thermostat) de façon à réduire son volume à $V_f = 2,5 \text{ m}^3$.

50. Représenter schématiquement sur un diagramme de Clapeyron ces deux transformations.

51. Pour la première transformation, calculer le travail et le transfert thermique reçu par le gaz.

52. Pour la première transformation, calculer l'entropie échangée par le gaz.

53. Calculer l'entropie créée lors de la première transformation. Commenter brièvement les signes des valeurs trouvées aux questions 52 et 53.

54. Pour la deuxième transformation, calculer le travail et le transfert thermique reçus par le gaz.
55. Pour la deuxième transformation, calculer l'entropie échangée par le gaz.
56. Calculer l'entropie créée lors de la deuxième transformation. Commenter brièvement.

2. Équation d'état du dioxyde de carbone gazeux.

On désire vérifier la validité du modèle de JOULE appliqué au CO_2 gazeux. L'équation d'état s'écrit alors :

$$P \times (V - n.b) = nRT \quad (b \text{ est une constante positive et } n \text{ est la quantité de matière}).$$

57. Rappeler la définition du coefficient de dilatation isobare et du coefficient de compressibilité isotherme pour un fluide.
58. Donner les expressions, en fonction de R , T , P et b , de ces deux coefficients obtenus avec l'équation d'état du modèle de JOULE.
59. Comparer ces expressions à celles obtenues pour le gaz parfait.

Pour un kilogramme de CO_2 gazeux à une température de 280 K, on obtient les résultats suivant :

P (bar)	0,804	0,868	0,968	1,060	1,130	1,179
V (m^3)	0,658	0,610	0,547	0,499	0,468	0,449
$P.V$ (bar. m^3)	0,529	0,529	0,529	0,529	0,529	0,529

60. Dans le modèle de JOULE, exprimer le produit PV en fonction de n , R , T , b et P . Cette relation est-elle compatible avec les résultats expérimentaux ?

3. Compressions suivantes du CO_2

Le diagramme de CLAPEYRON et des données thermodynamiques sont disponibles en annexes.

61. Compléter ce diagramme (températures) et tracer l'isotherme à $T = 295$ K. *Découper le diagramme fourni en annexe (page 15), le compléter et le coller sur la copie.* On pourra s'aider du diagramme des phases (p. 9) et des données thermodynamiques (p. 14).

62. À cette température, et à la pression de 59 bar, le gaz peut-il être considéré comme parfait ?

La quantité n_0 de CO_2 gazeux (du B.1) est à présent soumise à diverses transformations la faisant passer par les états **A**, **B**, **C** et **D** caractérisés par leur température et leur volume :

$$T_A = 280 \text{ K} ; V_A = 120 \text{ L}$$

$$T_B = 280 \text{ K} ; V_B = 53 \text{ L}$$

$$T_C = 295 \text{ K} ; V_C = 53 \text{ L}$$

$$T_D = 310 \text{ K} ; V_D = 53 \text{ L}$$

63. Placer les points **A**, **B**, **C** et **D** sur le diagramme de CLAPEYRON et préciser l'état physique du CO_2 pour chacun de ces états.
64. Préciser la pression pour chacun des états **A**, **B**, **C** et **D**.
65. Dans le cas de systèmes biphasiques, préciser la composition massique du mélange.
66. Calculer l'entropie échangée et l'entropie créée pour une transformation isotherme de **A** vers **B**.

FIN DE L'ÉPREUVE

Annexes

Table de valeurs de déplacements chimiques en RMN ^1H

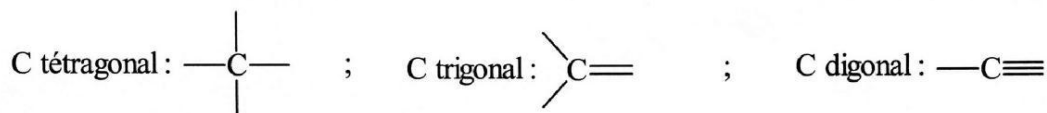
Protons CH_3	δ	Protons CH_2	δ	Protons CH	δ
Lié à un C AX_3 :		Lié à un C AX_3 :		Lié à un C AX_3 :	
$\text{CH}_3\text{-C}$	0,9	$\text{CH}_2\text{-C}$	1,3	CH-C	1,5
$\text{CH}_3\text{-C-NH}_2$ (ou NR_2)	1,15	$\text{CH}_2\text{-C-NH}_2$ (ou NR_2)	1,3	CH-C-OH (ou OR)	1,6-2
$\text{CH}_3\text{-C-Ar}$	1,25	$\text{CH}_2\text{-C-Ar}$	1,6	CH-C-Cl	1,6
$\text{CH}_3\text{-C-OH}$ (ou OR)	1,15-1,3	$\text{CH}_2\text{-C-OH}$ (ou OR)	1,8		
En α d'une insaturation:		En α d'une insaturation:		En α d'une insaturation:	
$\text{CH}_3\text{-C=C}$	1,6	$\text{CH}_2\text{-C=C}$	2,1-2,3	CH-C=C	2,5
$\text{CH}_3\text{-CO-OR}$	2,0	$\text{CH}_2\text{-C}\equiv\text{C}$	2,6	$\text{CH-C}\equiv\text{N}$	2,7
$\text{CH}_3\text{-CO-OH}$	2,1	$\text{CH}_2\text{-CO-OR}$	2,2	CH-CO-OH	2,6
$\text{CH}_3\text{-CO-NH}_2$ (ou NR_2)	2-2,1	$\text{CH}_2\text{-CO-OH}$	2,35	CH-CO-R	2,5-2,7
$\text{CH}_3\text{-C=C-C=O}$		$\text{CH}_2\text{-CO-NH}_2$ (ou NR_2)	2,1-2,2	CH-Ar	3,0
$\text{CH}_3\text{-CO-R}$	2,0	$\text{CH}_2\text{-C=C-C=O}$		CH-CO-Ar	3,3
$\text{CH}_3\text{-Ar}$	2,1-2,2	$\text{CH}_2\text{-CO-R}$	2,4		
$\text{CH}_3\text{-CO-Ar}$	2,3-2,4	$\text{CH}_2\text{-Ar}$	2,4		
	2,6	$\text{CH}_2\text{-CO-Ar}$	2,7		
			2,9		
Lié à un hétéroatome		Lié à un hétéroatome		Lié à un hétéroatome	
$\text{CH}_3\text{-NH}_2$ (ou NR_2)	2,1-2,3	$\text{CH}_2\text{-NH}_2$ (ou NR_2)	2,5	CH-NH_2 (ou NR_2)	2,9
$\text{CH}_3\text{-NH-COR}$	2,8-2,9	$\text{CH}_2\text{-NH-COR}$	3,3	CH-NH-COR	3,8-4,1
$\text{CH}_3\text{-OR}$	3,3	$\text{CH}_2\text{-OR}$	3,4	CH-OR	3,7
$\text{CH}_3\text{-OH}$	3,4	$\text{CH}_2\text{-OH}$	3,6	CH-OH	3,9
$\text{CH}_3\text{-OCOR}$	3,7	$\text{CH}_2\text{-OCOR}$	4,2	CH-OCOR	4,8-5,1
$\text{CH}_3\text{-OAr}$	3,8	$\text{CH}_2\text{-OAr}$	4,0	CH-OAr	4,0
$\text{CH}_3\text{-NO}_2$	4,3	$\text{CH}_2\text{-NO}_2$	4,4	CH-NO_2	4,5-4,7
Protons liés à un C insaturé:	δ	Protons portés par un hétéroatome. Leur position dépend considérablement du solvant et de la concentration.			
$\text{-C}\equiv\text{CH}$	1,8-3,1	OH NH			
-C=CH-	4,5-6,0	Alcool (ROH) : 0,7-5,5 Amine aliphatique (RNH_2 , RNH-) : 0,6-5,0			
ArH	6,5-8,2	Phénol (ArOH) : 4,5-7,1 Amine aromatique (ArNH_2 , ArNH-) : 2,9-4,7			
	(benzène : 7,27)	Amides (-CO-NH_2 , CO-NH-) : 6,0-8,5			
		Acide (R-CO-OH) : 10,5-12,5			
RCH=O	9,5-10,0				
ArCH=O	9,7-10,5				

SPECTROSCOPIE INFRAROUGE

Table des nombres d'onde des vibrations de valence et de déformation.

Liaison	Nature	Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Intensité
O-H alcool libre	Valence	3590-3650	F ; fine
O-H alcool lié	Valence	3200-3600	F ; large
N-H amine primaire : 2 bandes secondaire: 1 bande	Valence	3300-3500	m
N-H amide	Valence	3100-3500	F
C _{di} -H	Valence	≈ 3300	m ou f
C _{tri} -H	Valence	3030-3100	m
C _{tri} -H aromatique	Valence	3000-3100	m
C _{tet} -H	Valence	2850-2970	F
C _{tri} -H aldéhyde	Valence	2700-2900	m
O-H acide carboxylique	Valence	2500-3200	F à m ; large
C≡C	Valence	2100-2260	f
C≡N nitriles	Valence	2200-2260	F ou m
C=O anhydride	Valence	1800-1850	F ; 2 bandes
		1740-1790	
C=O chlorure d'acide	Valence	1790-1815	F
C=O ester	Valence	1735-1750	F
C=O aldéhyde et cétone	Valence	1700-1740	F
		abaissement de 20 à 30 cm ⁻¹ si conjugaison	
C=O acide carboxylique	Valence	1700-1725	F
C=O amide	Valence	1650-1700	F
C=C	Valence	1620-1690	m
C=C aromatique	Valence	1450-1600	Variable ; 3 ou 4 bandes
N=O (de -NO ₂) conjugué	Valence	1500-1550	F ; 2 bandes
		1290-1360	
N=N	Valence	1400-1500	f ; parfois invisible
C=N	Valence	1640-1690	F ou m
N-H amine ou amide	Déformation	1560-1640	F ou m
C _{tet} -H	Déformation	1430-1470	F
C _{tet} -H (CH ₃)	Déformation	1370-1390	F ; 2 bandes
O-H	Déformation	1260-1410	F
C _{tet} -O-C _{tet} (étheroxydes)	Valence	1070-1150	F
C _{tet} -OH (alcools)	Valence	1010-1200	
C _{tet} -O-C _{tri} (esters)	Valence	1050-1300	F ; 1 ou 2 bandes
C _{tri} -O-C _{tri} (anhydrides)			
C-N	Valence	1020-1220	m
C-C	Valence	1000-1250	F
C _{tri} -H de -HC=CH- (E)	Déformation	960-970	F
(Z)	Déformation	670-730	m
C _{tri} -H aromatique monosubstitué	Déformation	730-770 et 680-720	F ; 2 bandes
C _{tri} -H aromatique o-disubstitué	Déformation	735-770	F
m-disubstitué	Déformation	750-800 et 680-720	F et m ; 2 bandes
p-disubstitué	Déformation	800-860	F
C _{tet} -Cl	Valence	600-800	F
C _{tet} -Br	Valence	500-750	F
C _{tet} -I	Valence	≈ 500	F

F : fort ; m : moyen ;
f : faible

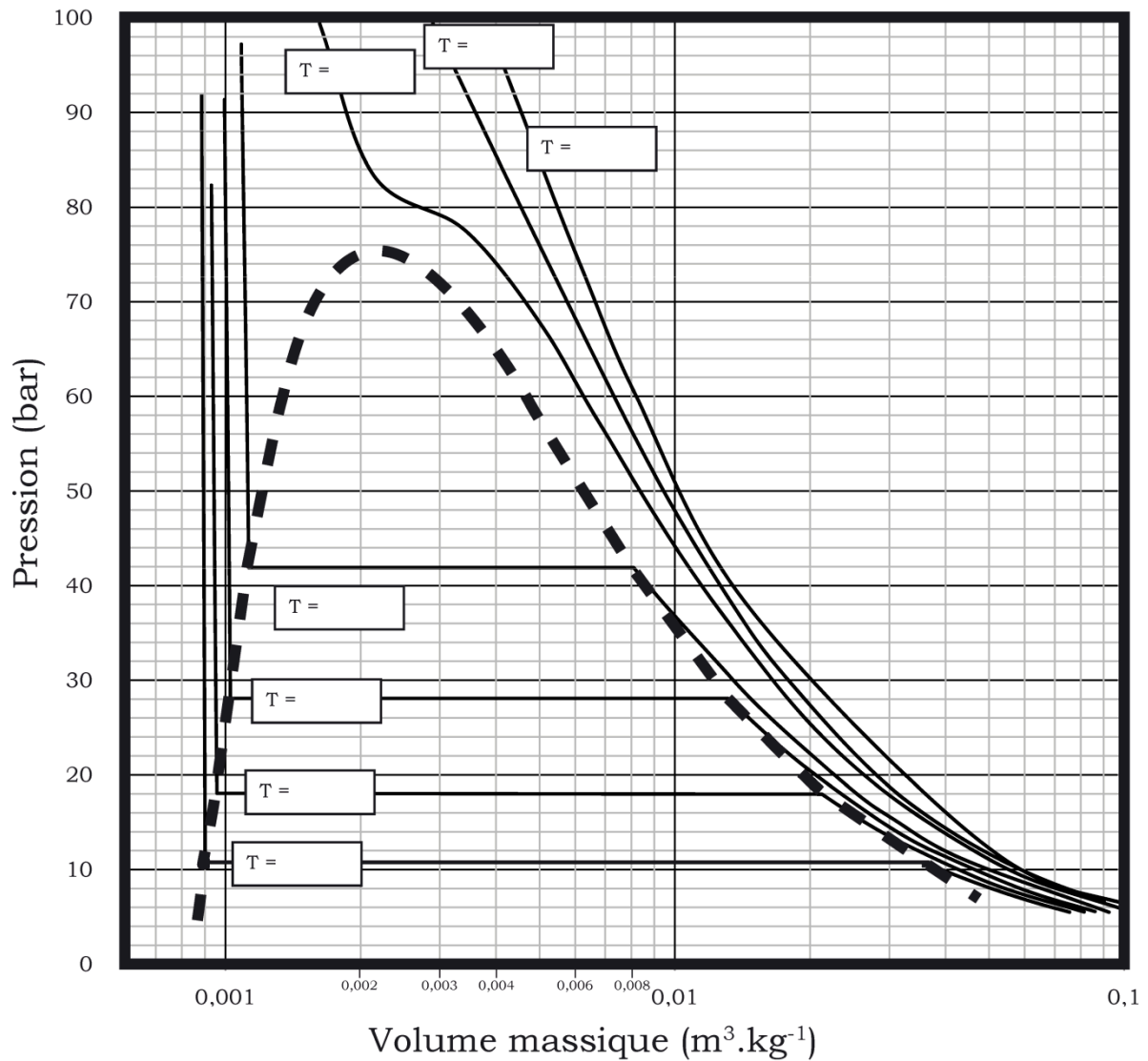


Données thermodynamiques relatives au dioxyde de carbone

T (K)	235	250	265	280	295
P_{sat} (pression de vapeur saturante en bar)	10,7	18,0	28,1	41,9	59,5
v_l (volume massique du liquide saturant en $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)	$9,0 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$
v_v (volume massique de la vapeur saturante en $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)	$3,6 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-3}$

Diagramme de CLAPEYRON du CO₂

Découper et coller



L'abscisse est logarithmique : la pression est tracée en fonction de $\log(V_{\text{massique}})$

Sont représentées les isothermes pour les températures suivantes :

340 K ; 325 K ; 310 K ; 280 K ; 265K ; 250 K et 235 K