

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2024

—

SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN LABORATOIRE

(Classes de terminale série STL)

EPREUVE D'ADMISSIBILITE

Durée : 5 heures

—

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire « type collège » est autorisé.

Consignes aux candidats

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Ne joindre aucun brouillon
- Ne pas composer dans la marge
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL Epreuve : admissibilité Matière : SPCL Session : 2024

Tournez la page S.V.P.

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

Le sujet comporte 2 parties présentées sur 20 pages, y compris celle-ci.

Il est souhaitable qu'un futur lauréat du concours général montre sa maîtrise dans les différents domaines de la chimie et de la physique. Il lui est donc fortement conseillé d'aborder toutes les parties.

Le sujet comporte un document annexe page 20 à rendre avec la copie.

Thème général : Le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone représente environ les deux tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine. Si l'effet de serre est indispensable pour maintenir une température moyenne suffisamment élevée à la surface de la terre afin d'y permettre le développement de la vie, une trop grande concentration de GES dans l'atmosphère induit une augmentation de cette température, avec des conséquences néfastes sur le climat.

Afin de limiter le réchauffement climatique, il convient donc de réduire les émissions de GES liées aux activités humaines. Quant aux émissions inévitables de dioxyde de carbone, l'accent est mis sur le développement de techniques de captage et stockage (CCS) ou captage et utilisation (CCU) afin d'en limiter les effets sur l'atmosphère.

Les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et aux procédés industriels ont atteint 36,8 milliards de tonnes (Gt) en 2022, ce qui constitue un nouveau record historique. La production d'électricité reste le premier secteur émetteur de CO₂ dans le monde, avec 41 % du total des émissions (chiffre 2018). Plus de 70 % de ces émissions proviennent des centrales thermiques à charbon.

Ce sujet sera l'occasion d'aborder la problématique de la mesure et de la capture du dioxyde de carbone dans les fumées des centrales thermiques, puis de s'intéresser à quelques voies de valorisation de ce dioxyde de carbone capturé.

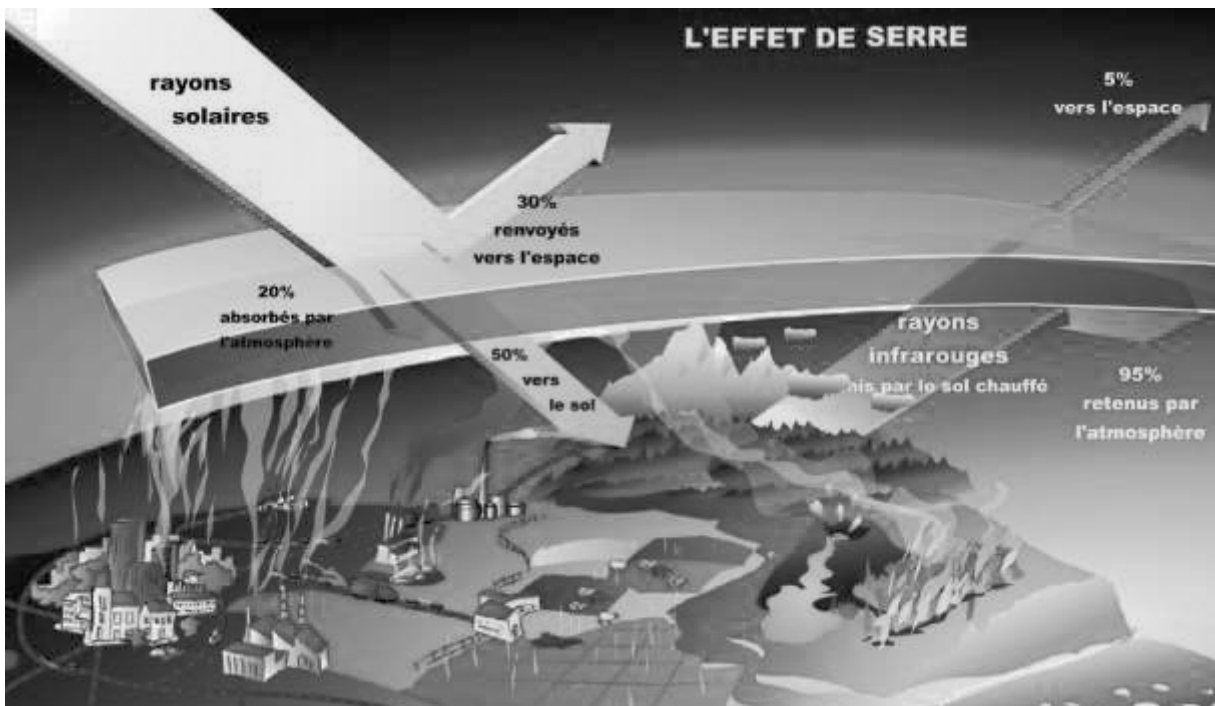


Figure 1 : effet de serre

Source : CEA/DCOM - www.cea.fr – Les défis du CEA

Table des matières

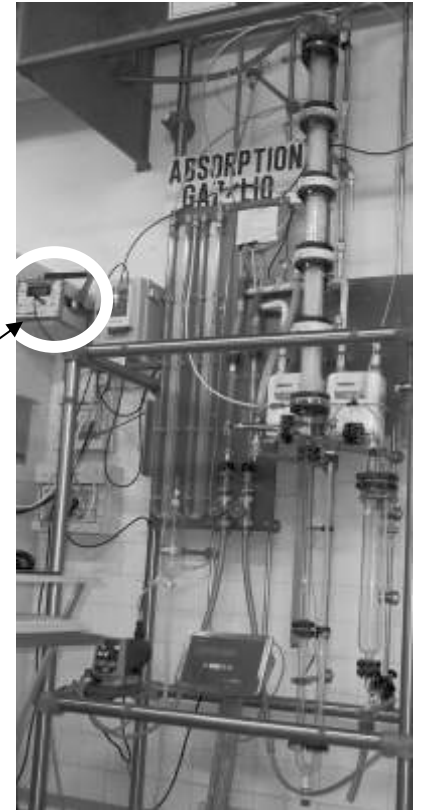
A.	Capture du dioxyde de carbone dans les fumées des centrales thermiques	4
	A.1 Etude d'un capteur de dioxyde de carbone -----	4
	A.2 Etude de la capture du dioxyde de carbone -----	6
B.	Valorisation du dioxyde de carbone	10
	B.1 Valorisation chimique en acide salicylique -----	10
	B.1.1 Production de l'acide salicylique-----	10
	B.1.2 Acide salicylique, composant d'un antalgique-----	11
	B.2 Valorisation en polycarbonate -----	15
	B.2.1 Résistance aux chocs lors d'une chute libre sans frottements-----	15
	B.2.2 Amélioration du modèle de la chute -----	15
	B.3 Valorisation sans transformation : utilisation comme fluide réfrigérant -----	18

A. Capture du dioxyde de carbone dans les fumées des centrales thermiques

Afin de limiter l'émission de dioxyde de carbone dans l'air par les fumées des centrales thermiques, il est possible de le capturer par dissolution dans un liquide circulant dans une colonne. Cette partie A présente une installation pilote de laboratoire (photo ci-contre) permettant d'étudier quantitativement ce procédé.

La partie A1 étudie un capteur de dioxyde de carbone, tel que celui indiqué sur la photo de droite. La partie A2 étudie la dissolution du CO₂ dans une solution aqueuse dans une colonne.

Capteur de dioxyde de carbone



A.1 Etude d'un capteur de dioxyde de carbone

Pour mesurer avec précision le taux de CO₂ dans l'air, un des instruments les plus utilisés est un capteur NDIR (« Non Dispersive Infra Red »). C'est cette technologie de capteur qui est utilisée sur l'installation pilote.

L'objectif de cette partie est d'étudier le principe de fonctionnement de ce capteur et de déterminer le résultat d'une mesure et la résolution du capteur à partir des acquisitions de signaux réalisés en laboratoire.

La **Figure 2** ci-dessous représente le schéma d'un capteur à deux canaux :

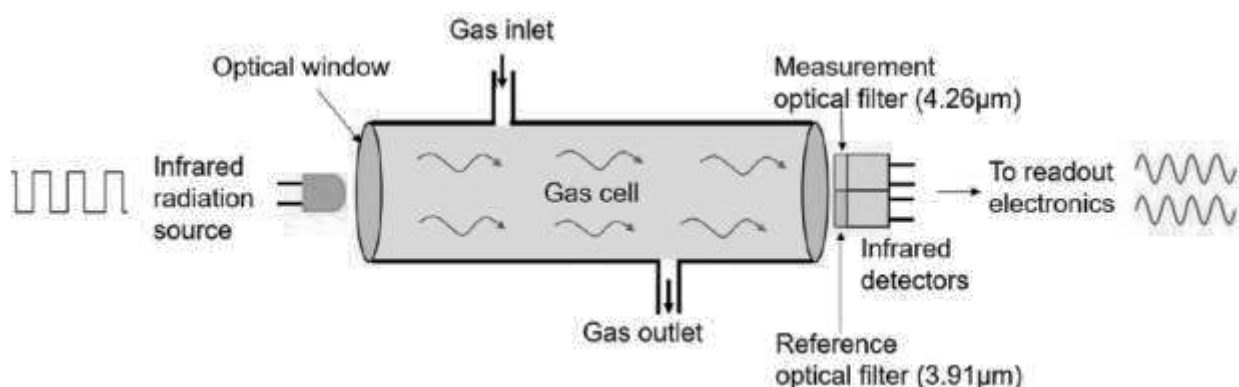


Figure 2 : schéma d'un capteur NDIR
D'après trinamix_white-paper_ndir-co2_sensing

L'air circule dans une **chambre de mesure** en aluminium poli pour limiter l'absorption des rayonnements par les parois. Une partie du rayonnement émis par la **source infrarouge** est absorbée par les gaz. Le rayonnement émis par la **source infrarouge** qui traverse le gaz est mesuré à la sortie de la chambre de mesure par un **détecteur**.

La **source infrarouge** est une lampe à incandescence contenant un filament de tungstène chauffé par effet Joule à une température d'environ 3 000 K. Elle émet un rayonnement avec un large spectre dont le maximum d'émission se situe à une longueur d'onde dépendant de la température selon la loi de Wien : $\lambda \times T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ avec λ , la longueur d'onde en m, et T , la température en K.

1. Déterminer la longueur d'onde du maximum d'émission de la source et vérifier qu'il se situe dans l'infrarouge.

Le **détecteur** comporte :

- une thermopile 1 munie d'un filtre à bande très étroite, centrée autour de 4,26 μm , donnant après amplification le signal de mesure, correspondant à une tension U_m ;
- une thermopile 2 munie d'un filtre centré autour de 3,91 μm , donnant après amplification un signal de référence, correspondant à une tension U_r .

Une **thermopile** est un composant complexe fournissant une tension proportionnelle à la température du détecteur, chauffé par le rayonnement reçu.

La **Figure 3** ci-dessous donne le spectre d'absorbance de quelques gaz pouvant se trouver en sortie d'une cheminée.

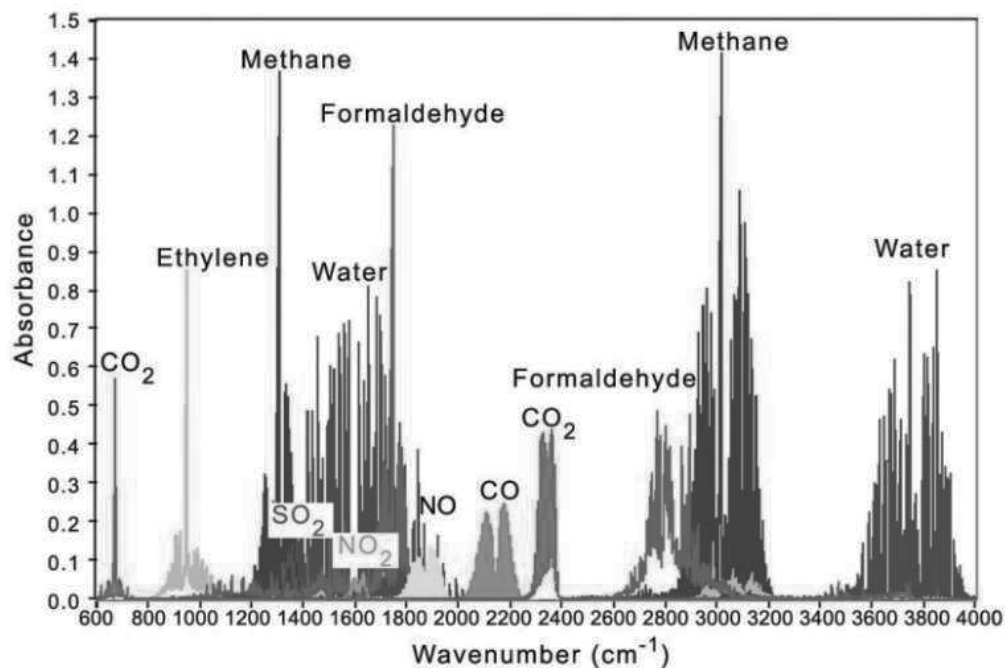


Figure 3 : spectre d'absorbance de différents gaz

<https://www.newport.com/n/ir-absorption-spectroscopy>

2. Justifier à partir de la **Figure 3** que le rayonnement émis par la source autour d'une longueur d'onde de 3,91 μm est intégralement reçu par la thermopile 2. Expliquer en quoi le signal U_r est alors une référence.
3. Vérifier que le filtre de la thermopile 1 est adapté à la mesure du dioxyde de carbone.
4. Expliquer comment évolue le signal U_m lorsque la concentration en CO_2 augmente.

Afin de compenser la dérive due au vieillissement différent des deux thermopiles, la source infrarouge est alimentée par une tension alternative. Lors d'un essai en laboratoire, les signaux alternatifs ont été obtenus, $u_m(t)$ et $u_r(t)$, de même fréquence que la source, reproduits sur la **Figure 4** suivante :

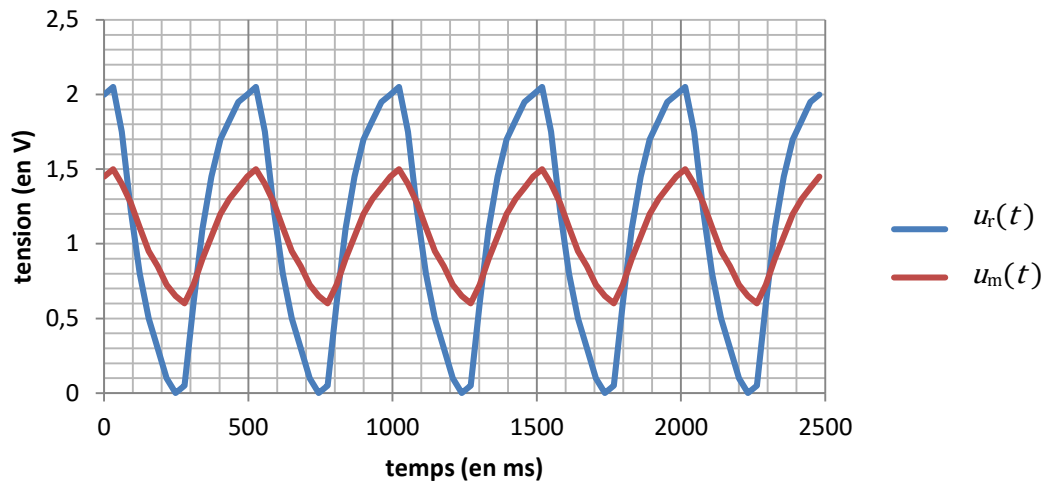


Figure 4 : tensions obtenues aux bornes des deux thermopiles

D'après R. G. Yan *et al.* / J. Biomedical Science and Engineering 2 (2009) 20-23

Le conditionneur de signal mesure les tensions *crête à crête* U_m et U_r (entre minimum et maximum) de chaque signal $u_m(t)$ et $u_r(t)$ et les convertit en données numériques par un convertisseur analogique-numérique à 10 bits pour une tension pleine échelle de 3,00 V.

La concentration en CO_2 est calculée ensuite par la relation suivante :

$$c = 4,04 \ln \left(\frac{U_r}{U_m} \right)$$

c = concentration en quantité de matière de CO_2 en pour cent

U_r = signal de référence en volts

U_m = signal de mesure en volts

5. Déterminer la fréquence de la tension alimentant la source, ainsi que les tensions crête à crête des signaux des deux thermopiles.
6. En déduire la concentration correspondant à cette mesure.

On étudie maintenant l'évolution de la résolution du capteur (c'est-à-dire la faculté du capteur à distinguer deux valeurs de concentration proches) en fonction de la valeur de la mesure.

7. Déterminer le quantum de tension correspondant au convertisseur analogique-numérique.
8. Déterminer la différence de concentration obtenue si la tension U_m augmente d'un quantum par rapport à la valeur initiale de 0,850 V.
9. Déterminer la différence de concentration obtenue si la tension U_m augmente d'un quantum par rapport à une valeur initiale de 0,020 V.
10. Conclure sur l'évolution de la résolution en concentration du capteur lorsque la concentration augmente.

A.2 Etude de la capture du dioxyde de carbone

Afin de capturer le dioxyde de carbone émis par les centrales thermiques, les gaz sortant des cheminées passent dans une colonne à garnissage dans laquelle circule à contre-courant une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium, schématisée sur la **Figure 5** ci-dessous.

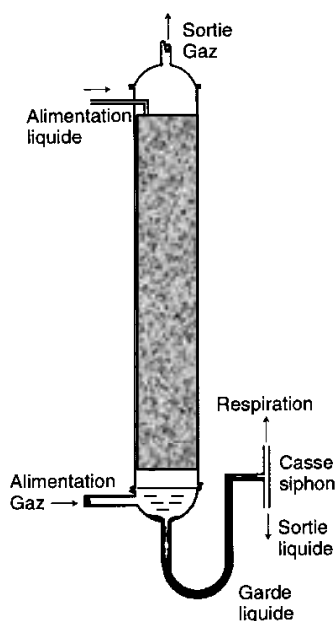


Figure 5 : schéma d'une colonne à garnissage utilisée pour capturer le CO₂
 D'après Anglaret, Filippi, Kazmierczak, *Technologie Génie chimique*, tome 1, CRDP Amiens

Le gaz sortant des cheminées, composé d'air et de dioxyde de carbone, entre dans la colonne par le bas (pied de colonne). La solution aqueuse d'hydroxyde de sodium est envoyée par le haut (tête de colonne). Une partie du dioxyde de carbone se dissout dans le liquide. Il sort alors de la colonne un gaz constitué d'air épuré par en haut et une solution aqueuse chargée en CO₂ par en bas.

L'efficacité de la capture est d'autant plus forte que :

- la fraction molaire de CO₂ dans le gaz sortant est faible ;
- la quantité de CO₂ dissous dans le liquide est grande.

Caractéristiques de l'installation :

- débit de liquide réglable de 10 à 100 % par une pompe (débit maximal de 16 L·h⁻¹) ;
- débit de liquide réglé à $L = 50$ % ;
- débitmètre de gaz entrant gradué en % (100 % correspond à 80 L·min⁻¹) ;
- débit de gaz G réglé à 45 % ;
- température du liquide à l'entrée 18 °C ;
- hauteur de la colonne 1,9 m ;
- pression en tête de colonne égale à la pression atmosphérique (1,01 bar).

11. Sachant que la solubilité des gaz diminue lorsque la température augmente, justifier que le liquide doit être froid pour améliorer l'efficacité de la capture.

Pour que le mélange entre les phases gazeuse et liquide soit efficace, il faut maintenir une différence de pression approximative entre le pied et la tête de colonne de 8 mbar par mètre de colonne. L'abaque de la **Figure 6** ci-dessous représente la variation de la pression relative en pied de colonne (différence de pression entre le gaz en pied de colonne et l'air extérieur) en fonction du débit de gaz circulant, pour plusieurs débits de liquide.

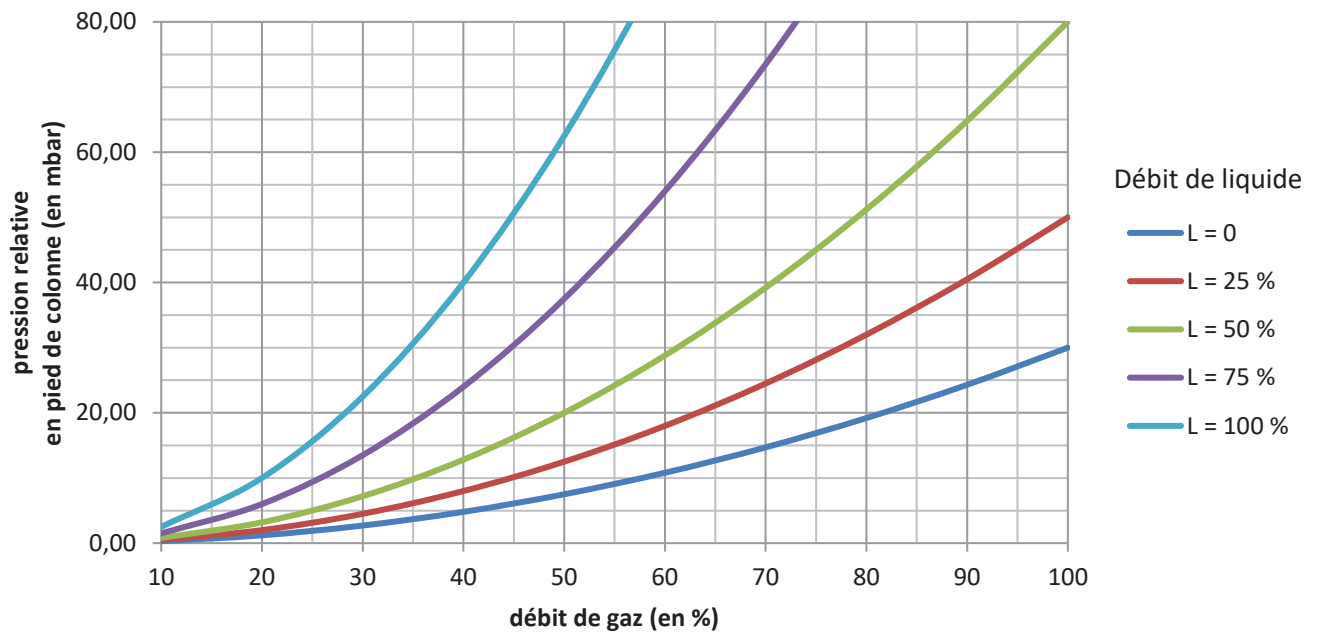
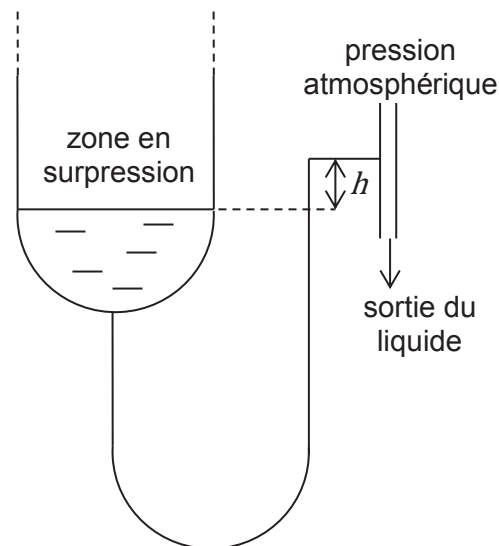


Figure 6 : variation de la pression relative en pied de colonne en fonction des débits de gaz et liquide

12. Vérifier que les réglages choisis conduisent à un fonctionnement correct de la colonne.

Afin d'empêcher la sortie du gaz par le bas, il est nécessaire de maintenir un niveau de liquide constant en pied de colonne. Pour cela, le liquide sort par un tube assez long (garde liquide) qui remonte jusqu'à une hauteur h réglable, comme précisé sur le schéma ci-dessous, représentant la partie inférieure de la **figure 5**.



13. Déterminer la hauteur h minimale pour faire tout juste couler le liquide si le pied de colonne est en surpression de 16 mbar par rapport à la pression atmosphérique (on considérera la vitesse suffisamment petite pour pouvoir appliquer le principe fondamental de la statique des fluides incompressibles).

Données :

- masse volumique de la solution aqueuse = $1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- intensité du champ de pesanteur $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Les réglages de débits de gaz effectués correspondent à une quantité de matière totale de gaz entrant de 1,51 mole par minute. La fraction molaire de CO_2 dans ce gaz entrant, mesurée par un capteur du type étudié dans la **partie A.1**, vaut 12,0 %.

14. Calculer la quantité de matière de dioxyde de carbone entrant dans la colonne en une minute.

Le CO_2 réagit avec l'hydroxyde de sodium en excès pour donner du carbonate de sodium ($2 \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$).

15. Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation prenant place entre le dioxyde de carbone et l'hydroxyde de sodium.

Données :

Couples acide / base : $\text{CO}_2(\text{aq}) / \text{HCO}_3^-(\text{aq})$, $\text{pK}_a = 6,2$; $\text{HCO}_3^-(\text{aq}) / \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$, $\text{pK}_a = 10,3$

On recueille 1,42 L de solution aqueuse sortant pendant 10 min. On prélève 5,0 mL de cette solution qu'on titre par de l'acide chlorhydrique (monoacide fort) de concentration $0,87 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Le graphe suivant (**Figure 7**), représentant le pH et sa dérivée en fonction du volume d'acide versé, est obtenu. La première équivalence correspond à la neutralisation des ions hydroxyde restant, les deux suivantes aux ions carbonate (dibase).

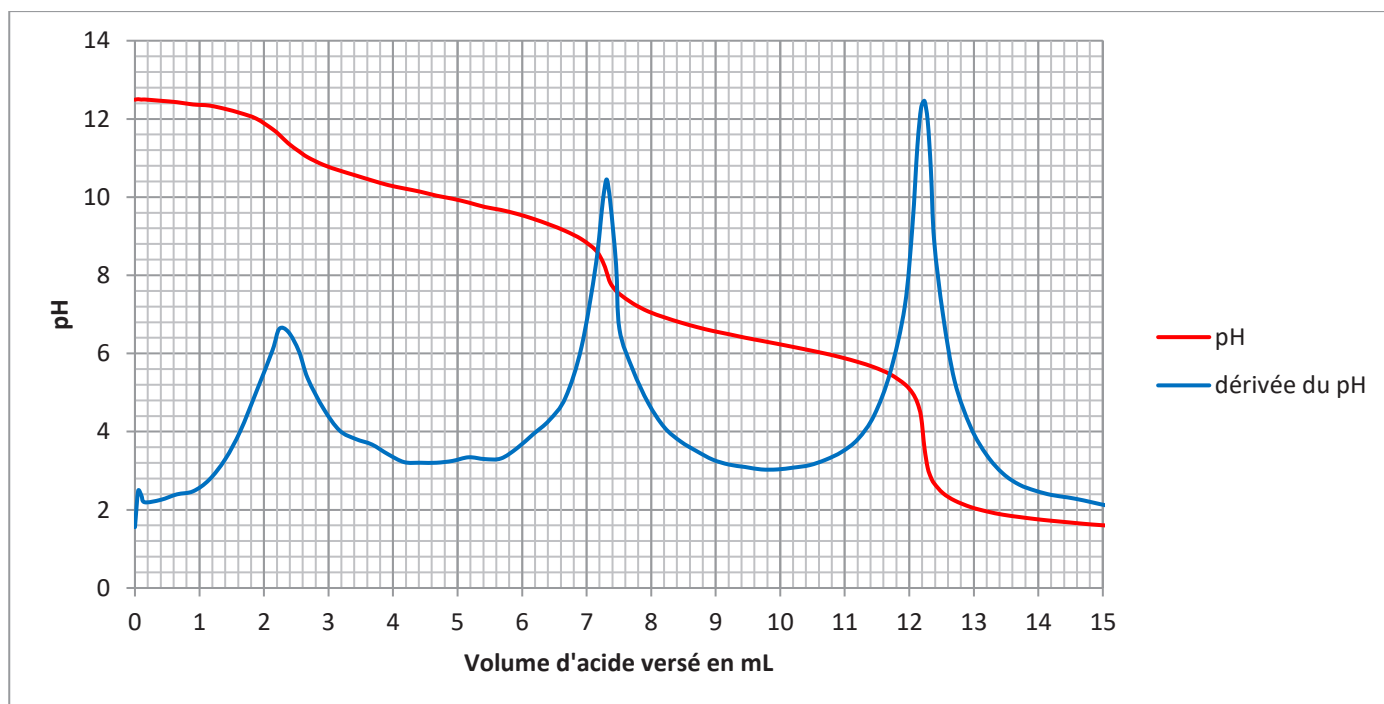


Figure 7 : courbe de titrage de la solution sortante par l'acide chlorhydrique

16. Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation prenant place entre l'ion carbonate et l'acide chlorhydrique.
17. Déterminer la quantité de matière d'ion carbonate présent dans l'échantillon prélevé.
18. En déduire la quantité de carbonate de sodium dans la solution prélevée pendant 10 min. Celle-ci correspond à la quantité de matière de CO_2 dissous pendant cette même durée.

En utilisant de l'eau pure à la place de la solution d'hydroxyde de sodium, avec les mêmes réglages, on trouve un débit en quantité de matière de CO_2 dissous dans l'eau de $0,007 \text{ mol}\cdot\text{min}^{-1}$.

19. Conclure sur l'intérêt d'utiliser une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium au lieu d'eau pure pour la capture du dioxyde de carbone.

B. Valorisation du dioxyde de carbone

Une alternative au stockage du dioxyde de carbone après son captage est son utilisation dans des procédés permettant de le valoriser, c'est-à-dire d'utiliser cette matière première disponible en grandes quantités et de la convertir en produits à plus forte valeur ajoutée. Actuellement, environ 230 Mt/an de dioxyde de carbone sont engagées dans ce processus CCU (Carbon Capture and Utilisation)¹. Le dioxyde de carbone peut être utilisé directement en tant que fluide réfrigérant, solvant, ou encore gazéifiant de boissons, être transformé en carburants ou molécules organiques d'intérêt (valorisation chimique) ou encore servir dans des processus de méthanation biologique ou fermentation biologique (valorisation biologique). Cette partie s'intéresse à quelques applications industrielles parmi les différentes voies citées.

B.1 Valorisation chimique en acide salicylique

Il existe diverses voies chimiques de valorisation du dioxyde de carbone, la principale en termes de volume étant la synthèse d'urée. Nous nous limiterons dans cette partie à quelques exemples d'utilisation du CO₂ comme précurseur de molécules d'intérêt.

Le CO₂ est utilisé industriellement pour former de l'acide salicylique. L'acide salicylique est utilisé directement dans certains produits dermatologiques ou cosmétiques en raison de ses propriétés antiseptiques et antalgiques. Il est également un précurseur de l'acide acétylsalicylique (ou aspirine).

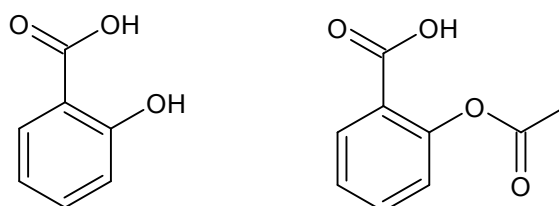


Figure 8 : à gauche, l'acide salicylique ; à droite, l'acide acétylsalicylique

B.1.1 Production de l'acide salicylique

Cette partie s'attache à étudier les mécanismes mis en jeu dans la production de l'acide salicylique et à quantifier la masse de CO₂ valorisée par cette filière.

20. Identifier les fonctions chimiques présentes dans l'acide salicylique.

L'acide salicylique est obtenu industriellement par carboxylation du phénol, cette transformation chimique est modélisée par la réaction de Kolbe-Schmitt dont l'équation est donnée **Figure 9**.

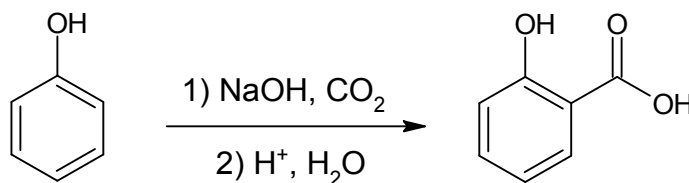


Figure 9 : réaction de Kolbe-Schmitt

¹ Source : <https://www.iea.org/reports/co2-capture-and-utilisation>

Un mécanisme **simplifié** de cette réaction est proposé ci-dessous.

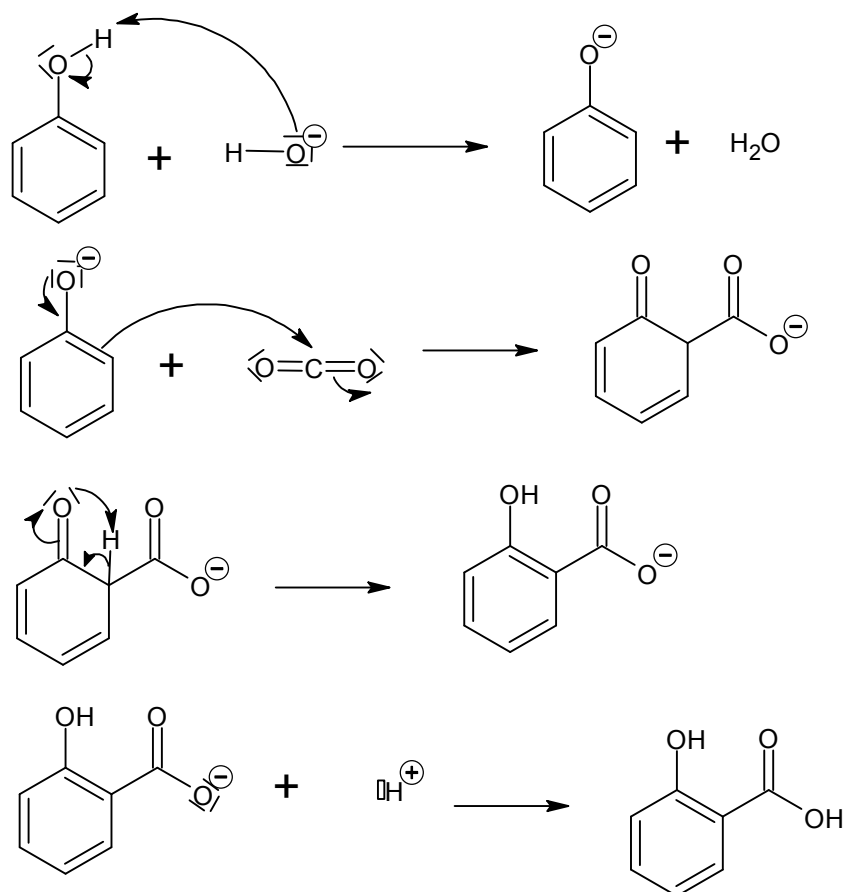


Figure 10 : Mécanisme simplifié de la réaction de Kolbe-Schmitt

Données :

- $\text{p}K_a(\text{phénol/phénolate}) = 10$;
- $\text{p}K_a(\text{H}_2\text{O}/\text{HO}^-) = 14$;
- masses molaires atomiques : $M(\text{O}) = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(\text{C}) = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(\text{H}) = 1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

21. Expliquer la première étape de ce mécanisme à l'aide des données.
22. Indiquer le type de réaction mise en jeu lors de la deuxième étape.
23. Recopier et compléter la dernière étape en ajoutant la(les) flèche(s) courbe(s) adéquate(s).

La production mondiale annuelle d'acide salicylique est de 70 000 t/an.²

24. Estimer la masse de CO_2 annuelle valorisée selon cette filière.

B.1.2 Acide salicylique, composant d'un antalgique

Outre son utilisation comme précurseur de l'aspirine, l'acide salicylique est utilisé en tant que tel dans certains produits dermatologiques ou cosmétiques en raison de ses propriétés antiseptiques et

² Source : ALCIMED (2010). Panorama des voies de valorisation du CO_2 . Étude réalisée pour le compte de l'ADEME.

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/069/47069766.pdf

antalgiques. Il entre notamment dans la composition du Synthol[®], un antalgique d'action locale utilisé en cas d'ecchymoses ou contusions.

COMPOSITION EN SUBSTANCES ACTIVES pour 100 g de solution :	
LEVOMENTHOL	0,2600 g
VERATROLE	0,2600 g
RESORCINOL	0,0210 g
ACIDE SALICYLIQUE	0,0105 g

Figure 11 : extrait de l'emballage d'un flacon de Synthol[®]

Lors d'une séance de travaux pratiques en laboratoire, un groupe d'étudiants cherche à vérifier si la teneur en acide salicylique d'un échantillon de Synthol[®] est conforme à l'étiquetage.

Les étudiants mettent en œuvre un dosage spectroscopique par étalonnage. Des mesures classiques d'absorbance ne peuvent pas être utilisées, car d'autres espèces présentes dans le Synthol[®] absorbent la lumière UV à la même longueur d'onde que l'acide salicylique.

En revanche, après absorption de la lumière, l'acide salicylique réémet une partie de cette énergie absorbée sous forme de rayonnement avec une longueur d'onde plus élevée : c'est le phénomène de fluorescence.

L'intensité de la lumière émise, appelée **intensité de fluorescence** et notée I_F , s'écrit sous la forme $I_F = k c$ où k est une constante et c la concentration en quantité de matière de l'acide salicylique dans l'échantillon. Cela permet d'exploiter cette intensité de fluorescence pour mettre en œuvre un dosage par étalonnage.

Choix de la longueur d'onde d'excitation

Lors de la mise en œuvre du dosage, l'échantillon est soumis à un rayonnement de longueur d'onde égale à 295 nm, qui est absorbé par l'acide salicylique ; cette phase est appelée **excitation**.

Le spectre d'absorption d'une solution d'acide salicylique obtenu en laboratoire est donné ci-dessous.

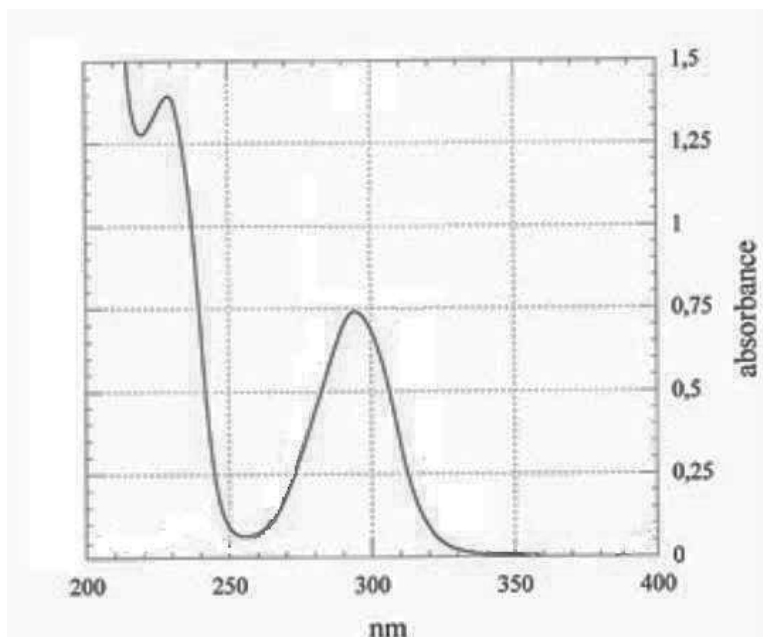
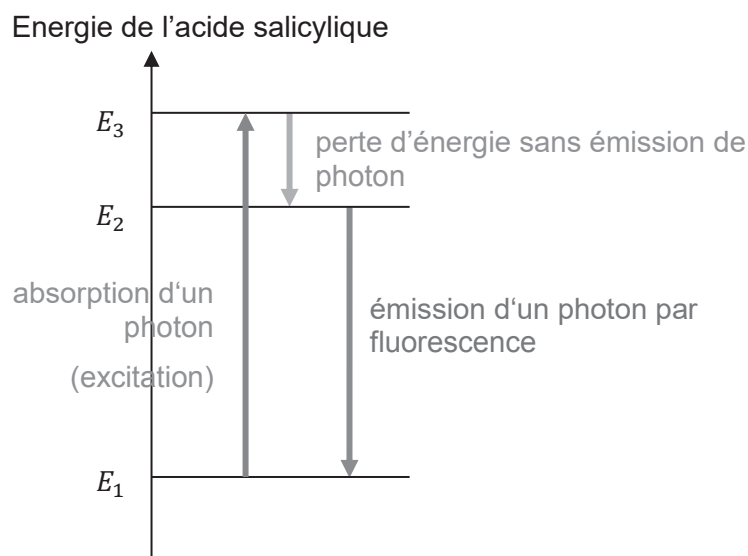


Figure 12 : spectre d'absorption d'une solution d'acide salicylique de concentration $2 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

25. À partir du spectre d'absorption, justifier le choix de la longueur d'onde d'excitation.

Un diagramme, simplifié, représentant quelques niveaux d'énergie de la molécule d'acide salicylique permet de comprendre les phénomènes mis en jeu :



26. À partir du diagramme d'énergie, expliquer pourquoi la longueur d'onde émise est supérieure à la longueur d'onde absorbée lors de l'excitation.

Réalisation du dosage par les étudiants

Les étudiants mettent en œuvre le dosage par étalonnage pour déterminer la teneur en acide salicylique dans un échantillon de Synthol® et vérifier la conformité avec l'étiquette.

Le protocole de la manipulation est donné ci-après.

- On prépare 50 mL d'une solution-mère d'acide salicylique dans l'eau distillée, à la concentration $c_0 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, en présence de 1 mL d'éthanol (pour aider à la dissolution).
- À partir de cette solution-mère, on prépare une solution F_0 à la concentration $c'_0 = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, par dilution dans une solution-tampon à $pH = 7,0$.
- On prépare ensuite une série de cinq solutions-filles F_1 à F_5 de concentration $2,0 \cdot 10^{-6}$ à $10,0 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, en diluant la solution F_0 .

27. Proposer un protocole pour préparer la solution F_0 à partir de la solution-mère. Le matériel utilisé sera précisé.

Les résultats de mesure d'intensité de fluorescence émise pour les solutions-filles, ainsi que la courbe d'étalonnage associée sont donnés ci-dessous :

Solution	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
Concentration ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$10,0 \cdot 10^{-6}$
I_F en u.a. (unité arbitraire)	13,1	25,5	36,4	49,9	63,5

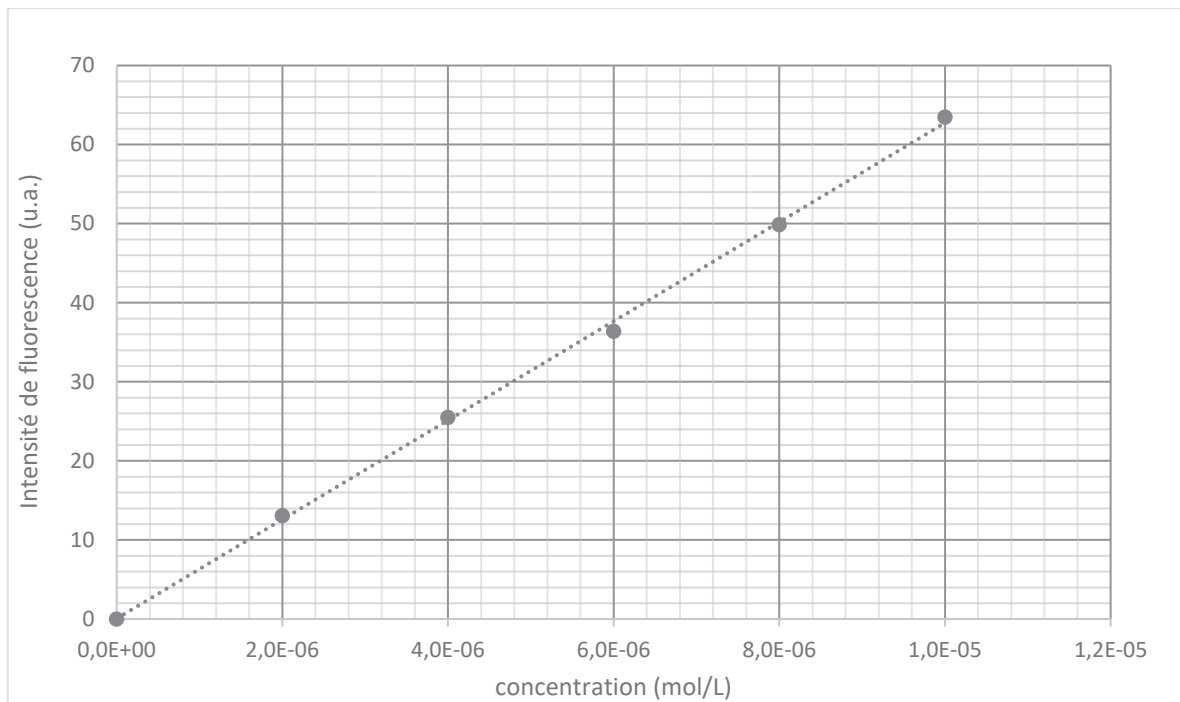


Figure 13 : courbe d'étalonnage

28. Commenter l'allure de la courbe d'étalonnage.

29. À partir de cette courbe, déterminer la valeur de la constante k définie en début de cette sous-partie B.1.2.

Chacun des 15 étudiants a ensuite mesuré l'intensité de fluorescence d'une solution de Synthol® dilué 100 fois.

Donnée : densité du Synthol, $d = 0,93$.

30. Expliquer pourquoi il a été nécessaire de diluer le Synthol®. La réponse devra être justifiée par un calcul.

31. Un des étudiants a mesuré une intensité de fluorescence I_F égale à 45,1 u.a. Déterminer la masse d'acide salicylique pour 100 g de Synthol® correspondant à cette mesure.

La prise en compte des résultats des 15 étudiants conduit à une valeur moyenne de 0,01073 g d'acide salicylique pour 100 g de Synthol®, avec un écart-type de 0,0005 g.

On rappelle que l'incertitude-type sur la moyenne d'une série de valeurs est égale à l'écart-type de cette série divisée par \sqrt{N} où N est le nombre de mesures.

32. Exprimer le résultat de mesure moyen des 15 étudiants avec le nombre de chiffres significatifs adaptés et l'incertitude-type associée.

33. Evaluer la différence entre le résultat obtenu expérimentalement et la valeur de référence de l'emballage en nombre d'incertitudes-types. Conclure.

B.2 Valorisation en polycarbonate

Outre la production d'urée et d'acides carboxyliques comme l'acide salicylique, le CO_2 est utilisé dans l'industrie chimique pour produire des polycarbonates qui sont des composés conduisant à de nombreuses applications du fait de leurs propriétés thermiques, optiques et mécaniques. En particulier, le polycarbonate de bisphénol A (appelé plus couramment polycarbonate) possède une grande résistance aux chocs, permettant son utilisation dans de nombreux objets du quotidien comme des casques de moto ou des coques de smartphones.

B.2.1 Résistance aux chocs lors d'une chute libre sans frottements

Pour être homologuées, les coques de téléphones doivent vérifier certaines normes. En particulier, il existe une certification MIL-STD-810G délivrée par le laboratoire de test de développement technologique de l'armée Américaine, qui assure entre autres une résistance à 26 chutes de 1,2 mètre.

Le polycarbonate présente une résistance aux chocs de $10 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$.³

À titre de comparaison, dans cette partie on cherche à estimer l'énergie surfacique (exprimée en $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$) libérée lors d'un choc consécutif à la chute d'un smartphone d'une hauteur de 1,20 m.

Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, on étudie la chute d'un smartphone de masse $m = 210 \text{ g}$. On le laisse tomber depuis une hauteur du sol $h = 1,2 \text{ m}$, sans vitesse initiale. Il est dans une position horizontale lors du lâcher. On considère dans cette première étude que les frottements dus à l'air lors de la chute du smartphone sont négligeables.

Donnée : intensité du champ de pesanteur : $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

34. En prenant comme référence une énergie potentielle nulle au niveau du sol, exprimer l'énergie potentielle de pesanteur du smartphone à l'instant initial.
35. Indiquer la valeur de l'énergie cinétique initiale du smartphone.
36. À l'aide d'un bilan d'énergie mécanique, en déduire la valeur d'énergie cinétique acquise par le téléphone au moment où il touche le sol.
37. En proposant des estimations raisonnables pour les valeurs des différentes surfaces du smartphone, donner une estimation de l'énergie cinétique surfacique (en $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$), dans le cas où le smartphone tombe à plat, puis dans le cas où il est lâché en position verticale et tombe sur la tranche.
38. Comparer ces valeurs à la résistance aux chocs annoncée pour le polycarbonate. Commenter les limites de cette étude simple.

B.2.2 Amélioration du modèle de la chute

Le modèle de la chute libre sans frottement est questionné. Dans cette partie, on cherche à vérifier si la force de frottement \vec{f} est négligeable lors de la chute ou si elle est modélisable.

À l'aide de l'accéléromètre du smartphone, on a relevé, lors de sa chute, les valeurs expérimentales de son accélération verticale en fonction du temps pour une durée totale de 1 s, l'instant $t = 0$ correspondant au moment où le smartphone est lâché, sans vitesse initiale depuis une hauteur du sol $h = 1,20 \text{ m}$. Un coussin est placé au sol pour réceptionner l'appareil. La courbe obtenue est donnée ci-dessous.

³ Source : <https://plasticexpress.fr/proprietes-physiques>

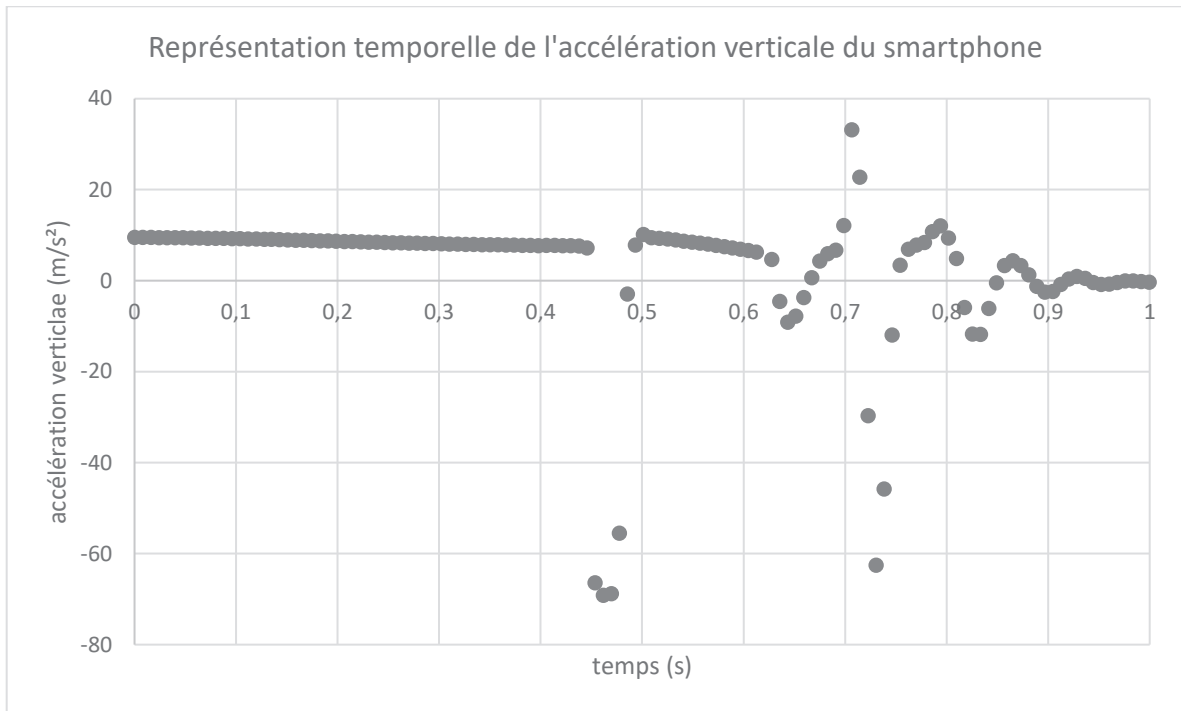


Figure 14 : évolution de l'accélération verticale du smartphone

39. À partir de cette courbe, estimer la durée de la chute en repérant le moment de l'impact au sol.
40. Justifier le signe de l'accélération au moment de l'impact puis donner une explication aux oscillations visibles en fin d'acquisition.

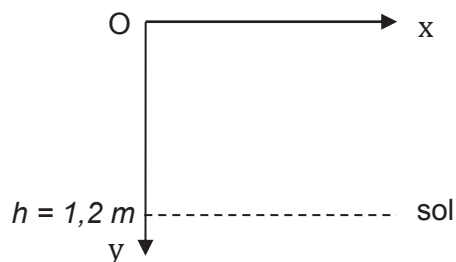
On cherche à comparer cette courbe expérimentale avec trois modèles de chute différents.

- **Modèle 1.** Chute libre sans frottements : $\vec{f} = \vec{0}$.
- **Modèle 2.** Présence d'une force de frottement fluide \vec{f} modélisée par l'expression $\vec{f} = -k\vec{v}$, soit, en norme : $f = kv$.
- **Modèle 3.** Présence d'une force de frottement fluide \vec{f} modélisée par l'expression $\vec{f} = -k'v\vec{v}$, soit, en norme : $f = k'v^2$.

où k et k' sont les coefficients de frottement fluide (respectivement en $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ et $\text{N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2}$).

Le smartphone, de masse $m = 210 \text{ g}$, est lâché sans vitesse initiale depuis une hauteur de $1,2 \text{ m}$ du sol.

Le repère terrestre d'étude (O, x, y) est représenté par le schéma ci-après, l'origine du repère étant placée sur la position initiale du smartphone $y(0) = 0$:



41. En modélisant le smartphone par un point, représenter, sans souci d'échelle sur la copie, les forces s'exerçant sur lui pendant sa chute.
42. À l'aide de la deuxième loi de Newton, établir les expressions de l'accélération verticale $a_y(t)$ du smartphone pour chacun des trois modèles de chute présentés ci-dessus.

On s'intéresse d'abord au modèle 1 sans frottements.

43. Dans le cadre de ce modèle 1, déterminer l'expression de la vitesse verticale $v_y(t)$ du smartphone en fonction du temps, puis celle de sa position verticale $y(t)$ en fonction du temps.
44. Déterminer la valeur de la durée de la chute et conclure si cette valeur est en accord avec la courbe expérimentale.
45. Commenter l'allure de l'accélération expérimentale avant l'impact en indiquant si elle est en accord avec le modèle 1.

On cherche maintenant à affiner le modèle en déterminant, le cas échéant, le modèle avec frottements le plus en adéquation avec la courbe expérimentale.

Les mesures expérimentales d'accélération ont été faites à intervalle de temps régulier Δt . On obtient ainsi un ensemble de points discrets, le point 0 correspondant à la mesure à $t = 0$, le point 1 à $t_1 = \Delta t$, le point 2 à $t_2 = 2\Delta t$, etc., avec $\Delta t = t_{i+1} - t_i$.

46. Exprimer a_i , l'accélération au point i , en fonction de la vitesse v_i au point i , de la vitesse v_{i+1} au point $i+1$ et de l'intervalle de temps Δt .
47. En déduire l'expression de la vitesse v_{i+1} en fonction des caractéristiques en i et de Δt .

En procédant par itération et en considérant que la vitesse initiale est nulle, on peut ainsi estimer les valeurs de la vitesse pour les différents instants de l'expérience. Le tracé de l'accélération en fonction de la vitesse, obtenu à partir des résultats expérimentaux précédents, est donné ci-dessous, en se limitant aux points correspondants à la durée de la chute avant l'impact.

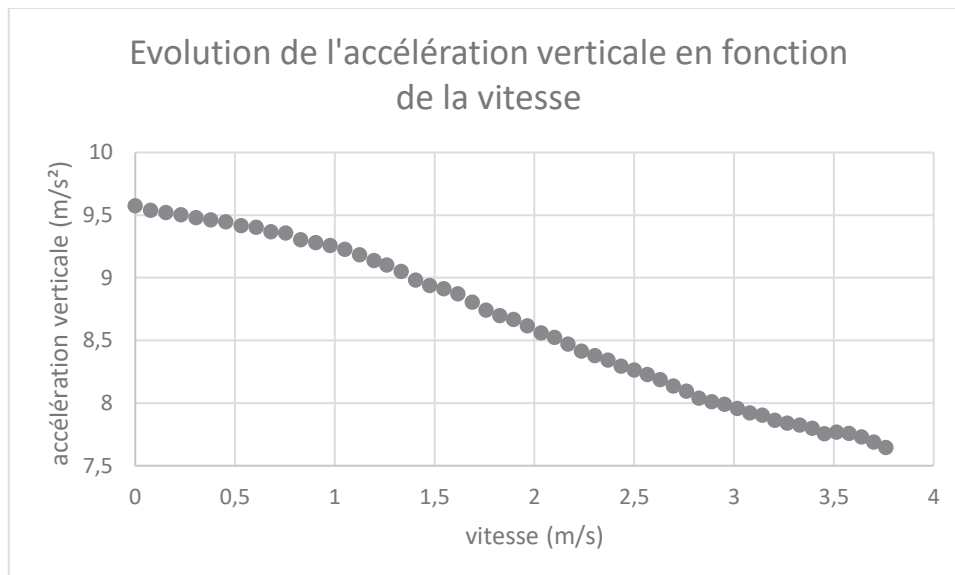


Figure 15 : évolution de l'accélération en fonction de la vitesse du smartphone

48. Commenter cette courbe en précisant si les frottements sont négligeables durant toute la durée de la chute. S'ils ne le sont pas, préciser le modèle semblant le plus en adéquation avec l'expérience et estimer une valeur du coefficient de frottement fluide correspondant.

B.3 Valorisation sans transformation : utilisation comme fluide réfrigérant

Par son caractère inerte, stable et non corrosif, le dioxyde de carbone représente une alternative à d'autres fluides réfrigérants avec un pouvoir de réchauffement beaucoup plus important que le CO₂. Les machines réfrigérantes usuelles présentent des coefficients de performance (COP), définis comme le rapport entre la puissance utile et la puissance coûteuse, dont les valeurs avoisinent 3 ou 4. Le principal inconvénient de l'utilisation du CO₂ comme fluide frigorigène est qu'il nécessite des pressions élevées (plusieurs dizaines de bars), ce qui pose des problèmes d'étanchéité du matériel et de sécurité. Pour pallier cette difficulté, on peut mettre en œuvre des systèmes en cascade à deux fluides frigorigènes, l'un étant le CO₂ qui est condensé grâce à l'évaporation du deuxième fluide.

On se propose ici d'étudier quelques caractéristiques d'une machine réfrigérante constituée d'un système en cascade CO₂/NH₃ et de déterminer le coefficient de performance (COP) de cette machine réfrigérante.

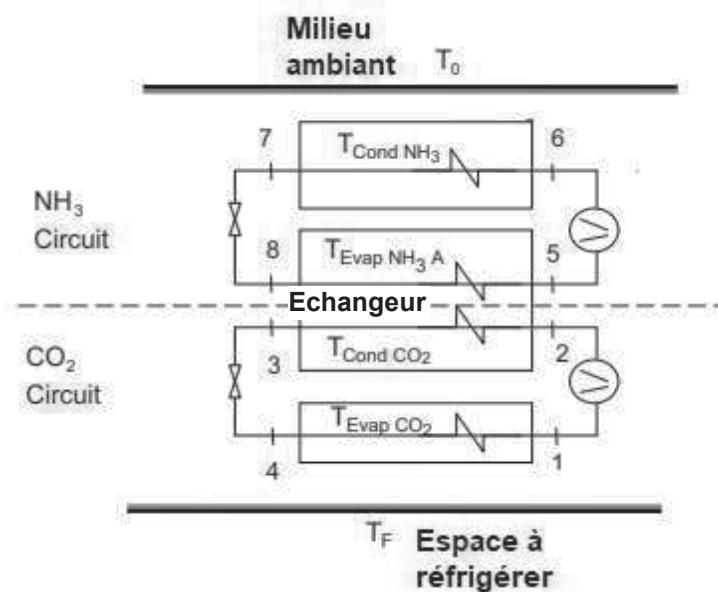


Figure 16 : Schéma d'une machine réfrigérante en cascade CO₂/NH₃

Source : J. Alberto Dopazo et al. (2009) Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling application at low temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 29, pp. 1577-1583

Dans l'exemple présenté sur la **Figure 16**, le circuit basse température fonctionne avec du dioxyde de carbone et a une fonction réfrigérante, tandis que le circuit haute température fonctionne avec de l'ammoniac et a pour but de condenser le dioxyde de carbone dans un échangeur situé entre les points 2, 3, 8 et 5 du schéma.

Encadré 1 : Description des échanges mis en jeu dans le système lors de chaque transformation

- 1-2 : le CO₂ reçoit une puissance mécanique $P_{Comp\ CO_2}$ dans le compresseur ;
- 2-3 : le CO₂ est refroidi jusqu'à la température $T_{Cond\ CO_2}$ puis condensé à $T_{Cond\ CO_2}$ dans l'échangeur et fournit une puissance thermique $P_{Ech\ CO_2}$;
- 3-4 : le CO₂ passe dans un détendeur, sans échange thermique ni mécanique ;
- 4-1 : le CO₂ reçoit une puissance thermique $P_{Evap\ CO_2}$ de la part de la source froide (espace à réfrigérer) et subit une évaporation à la température $T_{Evap\ CO_2}$ puis un réchauffement ;
- 5-6 : le NH₃ reçoit une puissance mécanique $P_{Comp\ NH_3}$ dans le compresseur ;
- 6-7 : le NH₃ est refroidi jusqu'à la température $T_{Cond\ NH_3}$ puis condensé à la température $T_{Cond\ NH_3}$, et fournit une puissance thermique $P_{Cond\ NH_3}$ au milieu ambiant ;

7-8 : le NH_3 passe dans un détendeur, sans échange thermique ni mécanique ;

8-5 : le NH_3 reçoit une puissance thermique $P_{\text{Ech NH}_3}$ et subit une évaporation à la température $T_{\text{Evap NH}_3}$ dans l'échangeur.

49. Compléter le document-réponse en annexe en indiquant dans chaque encadré la puissance échangée correspondant à chaque flèche.

50. Indiquer dans quel état physique se trouve le CO_2 aux points 1, 2, 3 et 4 du circuit basse température.

L'ensemble des tuyaux ainsi que l'échangeur sont supposés parfaitement calorifugés. Toutes les pertes sont donc négligées. Le débit massique du fluide correspondant au point i est noté D_i et le régime est stationnaire.

51. Donner une relation entre les débits massiques D_1, D_2, D_3 et D_4 . De même, donner une relation entre D_5, D_6, D_7 et D_8 .

On s'intéresse aux transformations se déroulant dans l'échangeur.

52. Donner la relation entre $P_{\text{Ech CO}_2}$ et $P_{\text{Ech NH}_3}$, sachant que les pertes thermiques sont négligées.

Le terme $P_{\text{Ech CO}_2}$ comprend en fait deux contributions :

- la puissance $P_{\text{Refr CO}_2}$ fournie par le refroidissement du CO_2 de $T_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ à $T_{\text{Cond CO}_2} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
- la puissance $P_{\text{Cond CO}_2}$ fournie par la condensation du CO_2 sous une pression de 35 bar.

L'énergie thermique massique libérée par la condensation du CO_2 à la température $T_{\text{Cond CO}_2}$ est de $247 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Par ailleurs, la capacité thermique massique du CO_2 lors du refroidissement de T_2 à $T_{\text{Cond CO}_2}$ est de $0,85 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$. Le débit massique $D_2 = 6,4\cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ est donné (source ⁴).

53. Déterminer la valeur de la puissance $P_{\text{Ech CO}_2}$.

Par ailleurs, l'énergie massique reçue par NH_3 dans l'évaporateur est de $1090 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

54. Déterminer la valeur du débit massique D_5 .

55. À l'aide d'un bilan d'énergie, exprimer $P_{\text{Evap CO}_2}$ en fonction de $P_{\text{Comp CO}_2}$ et $P_{\text{Ech CO}_2}$.

On rappelle que le coefficient de performance (COP) d'une machine réfrigérante est défini par l'expression suivante :

$$COP = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance coûteuse}}$$

56. Exprimer le coefficient de performance, COP , de la machine réfrigérante étudiée en fonction de certaines des puissances définies dans l'encadré 1.

Les puissances mécaniques reçues par les deux compresseurs ont pour valeurs :

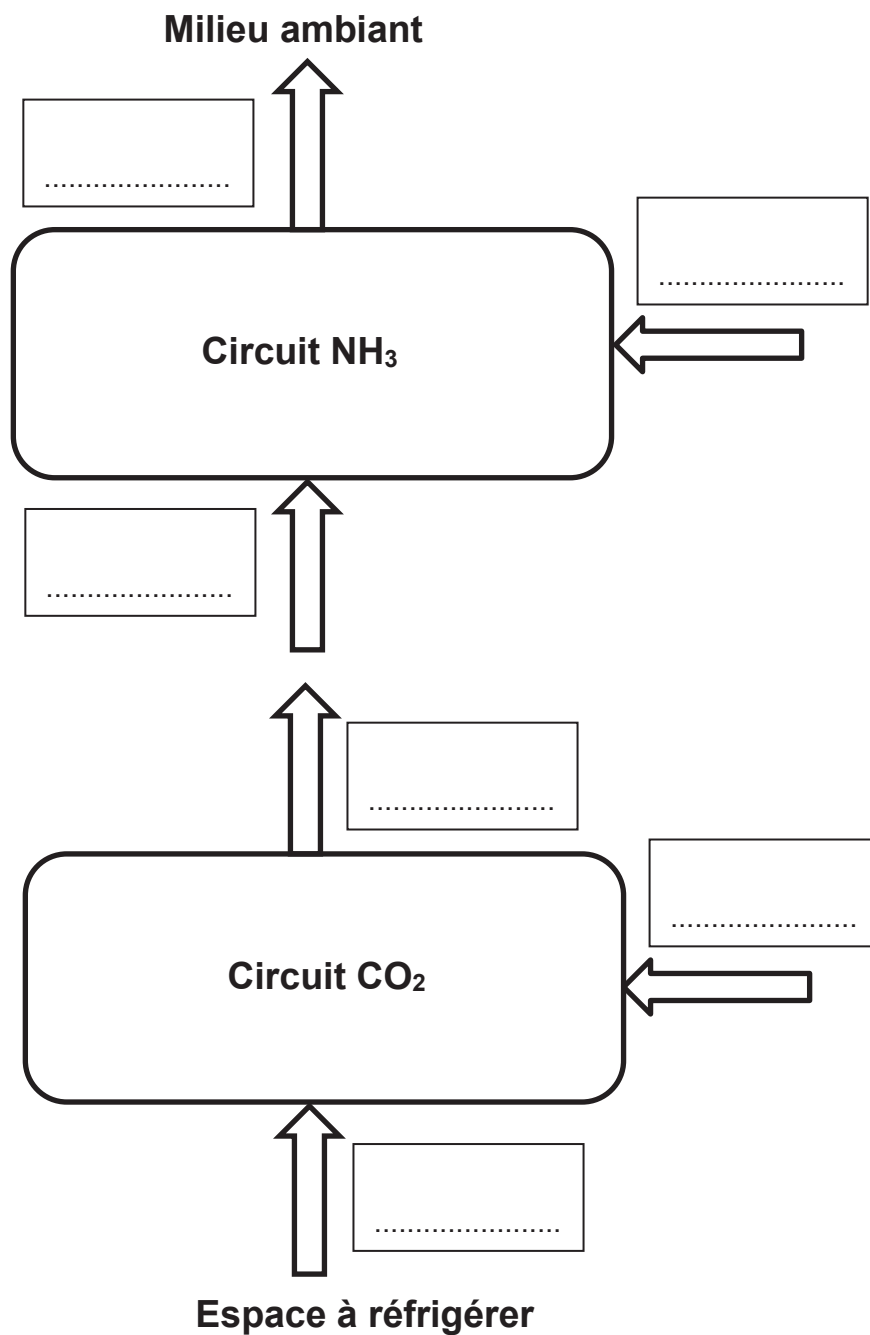
$$P_{\text{Comp CO}_2} = 0,47 \text{ kW} \text{ et } P_{\text{Comp NH}_3} = 0,46 \text{ kW}.$$

57. En déduire la valeur du COP de cette machine réfrigérante dans les conditions de fonctionnement. Conclure sur l'efficacité de cette machine réfrigérante.

⁴ Source : <https://climalife.dehon.fr/uploads/product/media/document/co2-r-744-fr.pdf>

Document réponse à rendre avec la copie :

Représentation schématique des puissances échangées dans la machine réfrigérante



Modèle CCYC : ©DNE

NOM DE FAMILLE (naissance) :
(en majuscules)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

PRENOM :
(en majuscules)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

N° candidat :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

N° d'inscription :

--	--	--

(Les numéros figurent sur la convocation, si besoin demander à un surveillant.)



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Né(e) le :

		/			/				
--	--	---	--	--	---	--	--	--	--