

SESSION 2023

CAPES
CONCOURS EXTERNE ET TROISIÈME CONCOURS
ET CAFEP ET CORRESPONDANTS

SECTION : PHYSIQUE-CHIMIE

ÉPREUVE ÉCRITE DISCIPLINAIRE
PARTIE A COMPOSITION DE PHYSIQUE
PARTIE B COMPOSITION DE CHIMIE

Durée : 5 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Le candidat rendra deux copies séparées pour chacune des deux parties de l'épreuve

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours externe du CAPES de l'enseignement public :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B E	1 5 0 0 F	1 0 1 A	9 3 6 2

Épreuve à dominante chimie

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B E	1 5 0 0 F	1 0 1 B	9 3 6 3

► **Concours externe du CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B F	1 5 0 0 F	1 0 1 A	9 3 6 2

Épreuve à dominante chimie

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B F	1 5 0 0 F	1 0 1 B	9 3 6 3

► **Troisième concours du CAPES de l'enseignement public :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B V	1 5 0 0 F	1 0 1 A	9 3 6 2

Épreuve à dominante chimie

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B V	1 5 0 0 F	1 0 1 B	9 3 6 3

► **Troisième concours CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B W	1 5 0 0 F	1 0 1 A	9 3 6 2

Épreuve à dominante chimie

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B W	1 5 0 0 F	1 0 1 B	9 3 6 3

PARTIE A : COMPOSITION DE PHYSIQUE

Observations de l'atmosphère : du sol à l'espace

Qu'il s'agisse de descriptions qualitatives ou de mesures de paramètres physiques, l'observation se trouve à la base de toute prévision météorologique. Aux côtés notamment de l'observation des océans, du manteau neigeux et des calottes glaciaires, l'observation de l'atmosphère terrestre joue un rôle primordial. Agrégées dans le temps et sur de larges zones géographiques, ces observations atmosphériques participent également à une meilleure compréhension des évolutions climatiques.

Depuis les stations automatisées au sol, jusqu'aux satellites, en passant par les radars météorologiques et les sondages par ballons, les technologies utilisées sont nombreuses et variées et les données sont acquises par des instruments situés au sol, dans les airs et dans l'espace.

Ce sujet propose d'étudier quelques dispositifs d'observation : les radars météorologiques au sol destinés à caractériser les zones de précipitations, les ballons-sondes qui fournissent les données permettant d'établir les profils verticaux en pression et les satellites d'observation de la Terre. **Il est constitué de trois parties indépendantes.**

I Au sol

II Dans les airs

III Depuis l'espace

Données :

- indice de réfraction de l'air : $n_{\text{air}} = 1,00$;
- constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- masses molaires atomiques : $M_{\text{O}} = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_{\text{He}} = 4,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_{\text{N}} = 14 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- la composition de l'air est supposée connue du candidat ;
- rayon de la Terre : $R_T = 6,37 \times 10^3 \text{ km}$;
- inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de l'écliptique : $23,5^\circ$;
- constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$;
- masse de la Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$;
- nombre d'ouverture NO d'un objectif d'appareil photographique : $NO = \frac{f'}{D}$, rapport de sa distance focale image f' au diamètre D de son diaphragme d'ouverture supposé circulaire ;
- la valeur de la célérité de la lumière dans le vide est supposée connue du candidat.

I Au sol

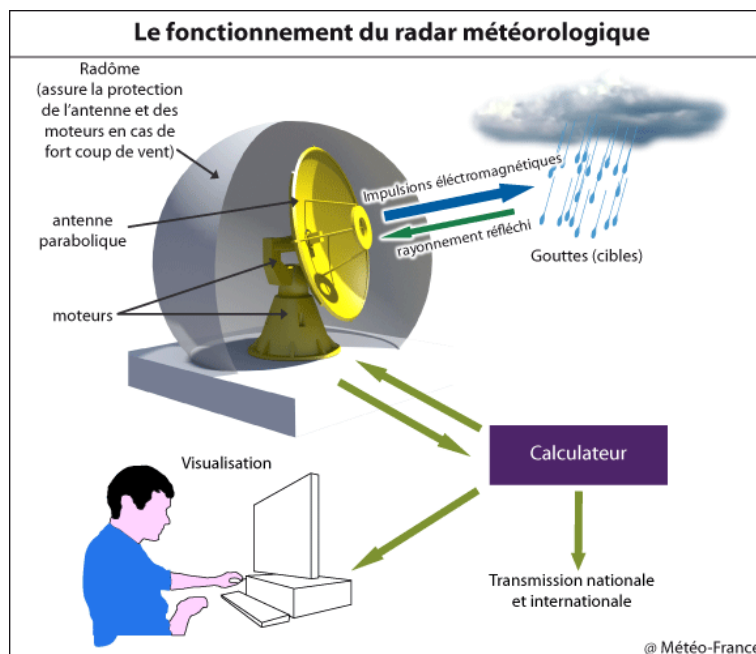
Radars météorologiques

Les radars météorologiques destinés à l'étude des zones de précipitation utilisent le fait qu'une partie des ondes électromagnétiques émises par le radar est rétrodiffusée vers le radar, par exemple par des gouttelettes d'eau, des flocons de neige ou des particules de glace en suspension.

Q1. Ondes électromagnétiques progressives sinusoïdales.

- Définir la notion d'onde progressive.
- Donner une expression générale de la grandeur vibratoire modélisant une onde plane progressive sinusoïdale de fréquence f et de célérité c se propageant selon l'axe (Ox) dans le sens des x croissants.

On considère que l'émetteur du radar émet une onde électromagnétique sinusoïdale de longueur d'onde $\lambda = 10,7 \text{ cm}$ et est situé en un point O . La zone de précipitation est supposée être en mouvement uniquement horizontal rectiligne en direction du radar à la vitesse constante v ; elle se rapproche donc du radar. Les ondes sont émises par le radar horizontalement et en direction de la zone de précipitation, à la célérité c . On suppose que $v \ll c$.



Q2. Une méthode de caractérisation de la zone de précipitation consiste à étudier le décalage en fréquence entre l'onde électromagnétique émise par le radar, de fréquence f_e , et l'onde électromagnétique que le radar reçoit après rétrodiffusion sur les précipitations, de fréquence f_r .

- Comment s'appelle cet effet de décalage en fréquence ?
- Établir l'expression de la fréquence f'_e de l'onde électromagnétique émise par le radar mesurée dans le référentiel lié à la zone de précipitation en fonction de f_e , de v et de c .
- On admet que, dans le référentiel lié à la zone de précipitation, l'onde électromagnétique reçue est réémise en direction du radar avec la même fréquence f'_e . Déterminer l'expression de la fréquence f_r de l'onde électromagnétique finalement reçue par l'antenne du radar après un aller-retour.
- En déduire que le décalage en fréquence $\Delta f = f_r - f_e$ a pour expression au premier ordre en $\frac{v}{c}$: $\Delta f = 2 f_e \frac{v}{c}$.

Q3. Pour effectuer la mesure du décalage en fréquence, on souhaite obtenir après traitement un signal électrique dont la fréquence est égale au décalage déterminé à la question précédente. Pour cela on réalise un traitement en deux étapes : un circuit multiplieur réalise le produit du signal électrique qui alimente l'émetteur (fréquence f_e) et du signal électrique généré par la réception de l'onde électromagnétique par le radar (fréquence f_r), puis un filtre permet d'obtenir le signal souhaité.

- (a) Montrer que le spectre du signal électrique obtenu en sortie du multiplieur est composé de deux termes : un terme à la fréquence $f_r - f_e = \Delta f$ et un terme à la fréquence $f_e + f_r$. Quel type de filtrage peut-on mettre en œuvre pour isoler le terme spectral souhaité ?
- (b) On montre à la figure 1 une simulation du chronogramme du signal électrique finalement obtenu. Par lecture de la courbe, déterminer la valeur de la vitesse horizontale de la zone de précipitation. Commenter.

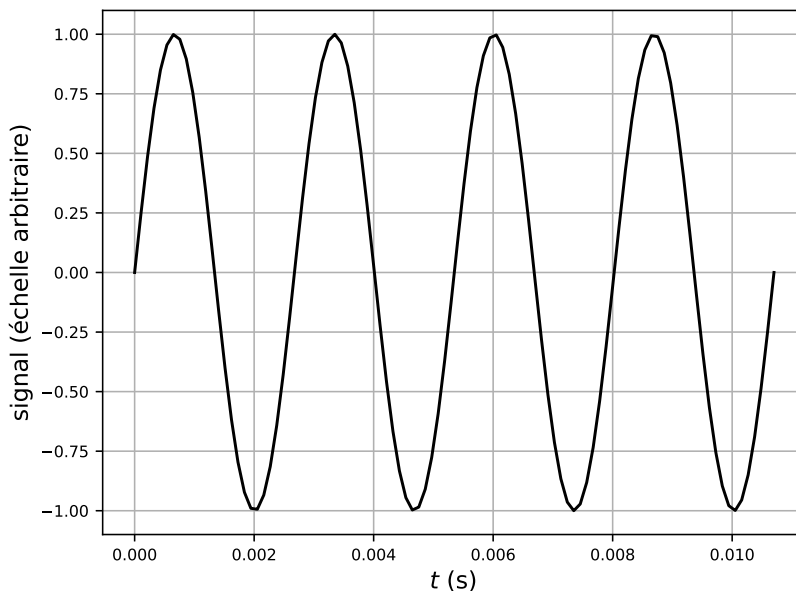


Figure 1 – Simulation du signal électrique obtenu après traitement.

Dans la pratique, de très nombreux radars météorologiques sont des radars à émission pulsée qui émettent des impulsions d'onde sinusoïdale d'une durée très courte, de façon répétitive. On note T_{RI} le temps de répétition des impulsions, c'est-à-dire la durée entre l'émission de deux impulsions consécutives (voir figure 2). On considère que la durée d'émission τ est négligeable devant T_{RI} .

- Q4.** (a) On note d la distance entre le radar et la zone de précipitation au moment où une impulsion donnée atteint la zone de précipitation et est rétrodiffusée. Exprimer la durée Δt de l'aller-retour de cette impulsion en fonction de la célérité c de l'onde et de la distance d .
Quelle est l'expression de la distance maximale d_{max} que l'on peut déterminer sans ambiguïté avec ce radar ?

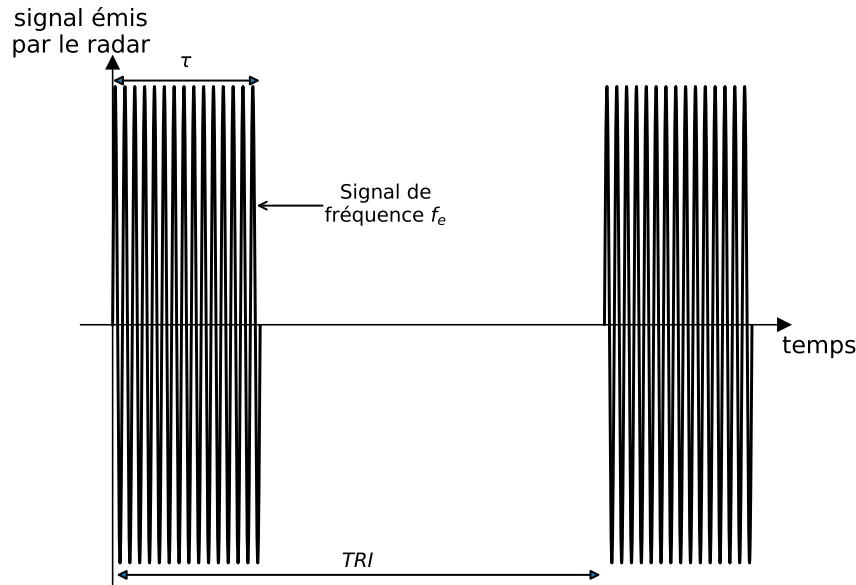


Figure 2 – Principe de l'émission pulsée : pendant une durée τ une impulsion d'onde sinusoïdale de fréquence f_e est émise. Deux impulsions sont séparées d'une durée T_{RI} qui représente le temps de répétition des impulsions. Les échelles ne sont pas respectées. On admet que $\tau \ll T_{RI}$.

- (b) Afin de déterminer la vitesse de la zone de précipitation, on réalise pour chaque impulsion un traitement en deux étapes similaire à celui déjà détaillé à la question Q3 : un circuit multiplieur réalise le produit d'un signal électrique de référence de même fréquence f_e que celui qui alimente l'émetteur et du signal électrique généré par la réception par le radar de l'impulsion électromagnétique de fréquence f_r , puis un filtre permet d'obtenir le signal souhaité, de fréquence $\Delta f = 2\frac{v}{c}f_e$. En raison du caractère pulsé de l'onde électromagnétique reçue par le radar, le signal acquis pour chaque impulsion a une durée τ et la répétition des acquisitions pour des impulsions consécutives permet d'obtenir un signal échantillonné dont la période d'échantillonnage est T_{RI} .

Rappeler l'inégalité que doivent respecter la fréquence f_s d'un signal et la fréquence d'échantillonnage f_{RI} pour que f_s puisse être déduite sans ambiguïté d'une analyse du signal échantillonné.

Quelle est l'expression de la vitesse maximale v_{max} déterminable sans ambiguïté ?

- (c) Déduire des questions précédentes que la détermination sans ambiguïté de la distance et de la vitesse impose un compromis sur le temps de répétition des impulsions T_{RI} .
- (d) D'après l'Organisation météorologique mondiale, en dehors des ouragans et cyclones la plupart des phénomènes météorologiques ont une vitesse inférieure à $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

À quelle distance maximale peut-on les observer avec un radar à émission pulsée de longueur d'onde $10,7 \text{ cm}$?

II Dans les airs

L'acquisition des données pendant l'ascension d'un ballon-sonde permet d'établir des profils verticaux, c'est-à-dire l'évolution des paramètres météorologiques en fonction de l'altitude.

Les profils verticaux établis par sondage sont d'une grande précision et sont très utiles en prévision météorologique ainsi que pour développer des modèles de l'atmosphère. D'autre part, bien qu'il s'agisse d'une technologie relativement ancienne, leurs données sont toujours employées pour étalonner les capteurs de télédétection radar et satellitaires.

Ballons-sondes ouverts

Un des enjeux dans la conception des ballons-sondes est de s'assurer de leur capacité à sonder la totalité de la troposphère, où se déroulent la plupart des phénomènes météorologiques. Selon la saison et la latitude, la troposphère, qui est la première couche atmosphérique quand on part du sol, a une épaisseur qui peut varier de huit à quinze kilomètres. On retient ici une épaisseur de la troposphère égale à 12 km.

On étudie un ballon-sonde ouvert constitué d'une masse d'hélium contenue dans une enveloppe ouverte rigide de volume $V_0 = 100 \text{ m}^3$ constant et d'un ensemble d'équipements (enveloppe, parachute de la nacelle, nacelle, capteurs, enregistreurs, etc.). L'enveloppe étant rigide et ouverte, si le gaz qu'elle contient est amené à se dilater, celui-ci peut s'en échapper.

On considère qu'au sol la température atmosphérique est $T_0 = 2,9 \times 10^2 \text{ K}$ et que la pression atmosphérique est $p_0 = 1,0 \text{ bar}$. On note M_{He} la masse molaire atomique de l'hélium.

Q5. Modèle du gaz parfait.

- Rappeler les hypothèses qui fondent le modèle du gaz parfait puis l'équation d'état du gaz parfait.
- Déterminer la valeur de la masse d'hélium présente dans l'enveloppe du ballon quand il est au sol à la température T_0 et à la pression p_0 .

Q6. Conditions de décollage.

- Quelle est l'origine physique de la poussée d'Archimède ?
- L'enveloppe qui contient l'hélium a un volume constant V_0 et on considère l'hélium à l'équilibre thermodynamique avec l'atmosphère extérieure. Déterminer l'expression de la poussée d'Archimède que le système constitué de l'enveloppe et de l'hélium qu'elle contient subit au sol en fonction notamment de la masse molaire de l'air M_{air} et de l'intensité du champ de pesanteur g .
- On néglige les effets de la poussée d'Archimède sur les parties autres que l'enveloppe contenant le gaz. On note m' la masse des équipements, c'est-à-dire la masse totale exceptée celle de l'hélium. Déterminer la valeur maximale de la masse des équipements pour que le ballon puisse décoller.

Q7. La masse des équipements du ballon-sonde est $m' = 10 \text{ kg}$ et le ballon décolle. On suppose qu'il y a toujours équilibre thermodynamique entre l'hélium du ballon et l'atmosphère.

- Montrer que l'altitude z^* à laquelle s'annule la force ascensionnelle résultant du poids et de la poussée d'Archimède est déterminée par l'équation

$$\frac{p(z^*)}{T(z^*)} = \frac{m'R}{V_0(M_{air} - M_{He})}$$

où p et T sont respectivement la pression et la température atmosphériques.

- (b) À l'aide de la courbe $\frac{p(z)}{T(z)} = f(z)$ de la figure 3, déterminer si la valeur de l'altitude z^* est suffisante pour obtenir un profil vertical complet de la troposphère.
- (c) Avec les hypothèses du modèle précédent, l'altitude du ballon oscillerait en fait autour de z^* puisque la force ascensionnelle change de sens de part et d'autre de cette altitude. Citer un phénomène qui finit en réalité par atténuer ces oscillations.

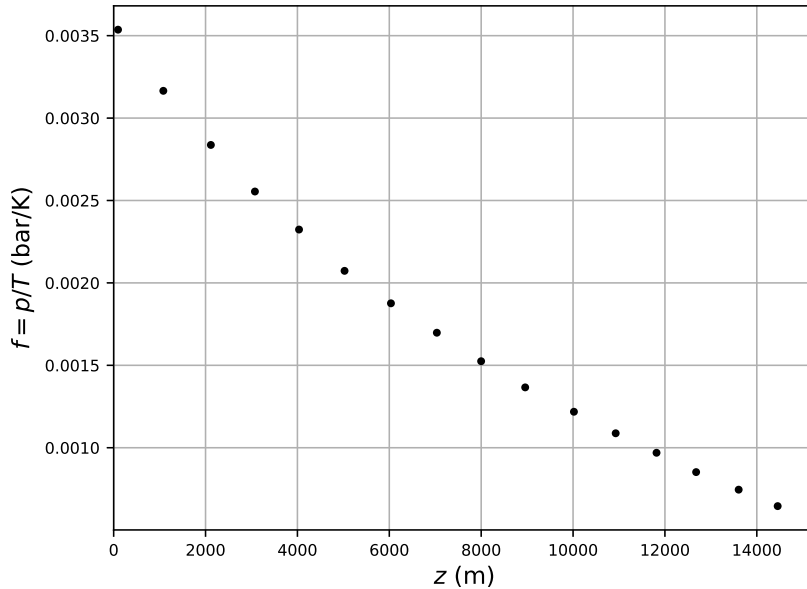


Figure 3 – Évolution du rapport de la pression en bar sur la température en kelvin en fonction de l'altitude en mètre. Données Météo-France.

Modélisation de la troposphère

Modéliser correctement les profils verticaux de la troposphère est un enjeu important car l'essentiel des phénomènes météorologiques s'y déroulent. On s'intéresse ici à la modélisation du profil vertical en pression et à la comparaison des modèles avec les mesures réalisées par radio-sondage par Météo-France.

On note z l'altitude, l'axe vertical ascendant étant orienté par le vecteur unitaire \vec{u}_z . La température et la pression à l'altitude $z = 0$ sont respectivement notées T_0 et p_0 .

Q8. Démontrer que le principe fondamental de la statique des fluides s'exprime par la relation $\vec{\text{grad}}(p) = \rho \vec{g}$ où p est la pression, ρ la masse volumique du fluide et $\vec{g} = -g \vec{u}_z$ le champ de pesanteur.

Q9. En déduire l'expression de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude pour une atmosphère modélisée par un gaz parfait isotherme dans un champ de pesanteur uniforme.

Comme on peut le voir sur la figure 4, les prévisions de ce modèle s'éloignent tendanciellement des données expérimentales quand l'altitude augmente. On cherche à modifier le modèle pour en améliorer les prévisions.

Q10. Pour évaluer l'influence de l'hypothèse « pesanteur uniforme », estimer la variation relative de l'intensité de pesanteur entre un point situé à la surface du globe terrestre supposé à répartition de masse sphérique et un point à une altitude de 12 km. Conclure.

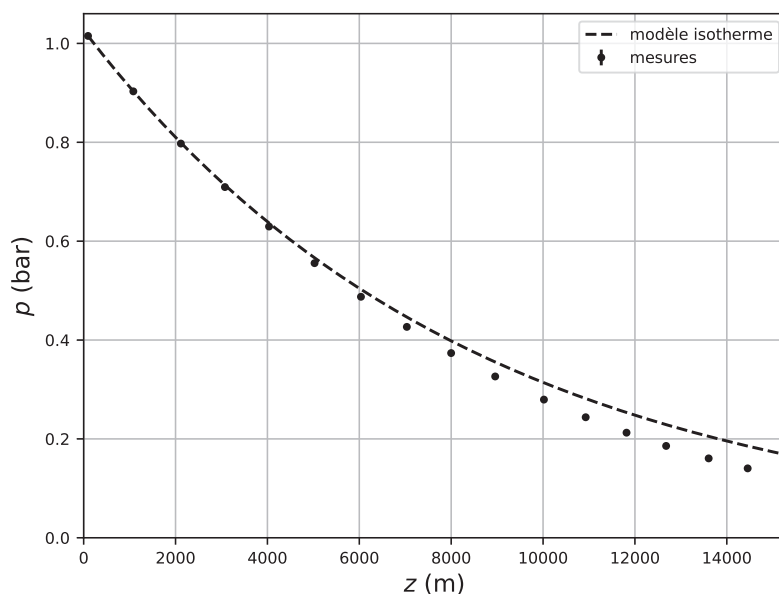


Figure 4 – Comparaison entre le profil vertical en pression mesuré (données Météo-France) et la prévision dans le cadre modèle du gaz parfait isotherme dans un champ de pesanteur uniforme.

On conserve l'hypothèse de la pesanteur uniforme et on propose plutôt de remettre en question l'hypothèse « atmosphère isotherme », en tenant compte des variations de température avec l'altitude.

Q11. On propose un modèle d'atmosphère à gradient de température constant : $\frac{dT}{dz} = -a$, où a est une constante positive.

- En déduire l'expression de $T(z)$ en prenant $z = 0$ pour l'altitude du sol.
- En supposant que la pesanteur est uniforme, démontrer que l'expression de la pression en fonction de l'altitude peut se mettre sous la forme $p = p_0(1 - \alpha z)^\beta$ où α et β sont deux constantes dont on donnera les expressions en fonction de a , T_0 , M_{air} , g et R .
- On réalise un ajustement numérique des paramètres α et β de l'expression précédente à partir des pressions mesurées expérimentalement. L'ajustement mène aux estimations suivantes : $\alpha = 2,1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ et $\beta = 5,6$. En déduire la valeur de a . Commenter.
- À l'aide de développements limités, montrer qu'à très basse altitude le modèle isotherme et le modèle à gradient de température prévoient des évolutions de la pression avec l'altitude similaires.

Q12. On souhaite tester la compatibilité du modèle à gradient de température avec les mesures.

- Pour le capteur de pression utilisé chaque valeur mesurée de la pression p est dans un intervalle $[p - 2,0 \text{ hPa}; p + 2,0 \text{ hPa}]$. Déterminer l'expression de l'incertitude-type sur une valeur mesurée de p dans le cadre d'un modèle de probabilité uniforme (modèle rectangulaire).
- On représente à la figure 5 la courbe des écarts entre les prévisions du modèle à gradient de température et les mesures. Après avoir énoncé un critère de compatibilité entre le modèle et les mesures, discuter de cette compatibilité à l'aide de la courbe de la figure 5.

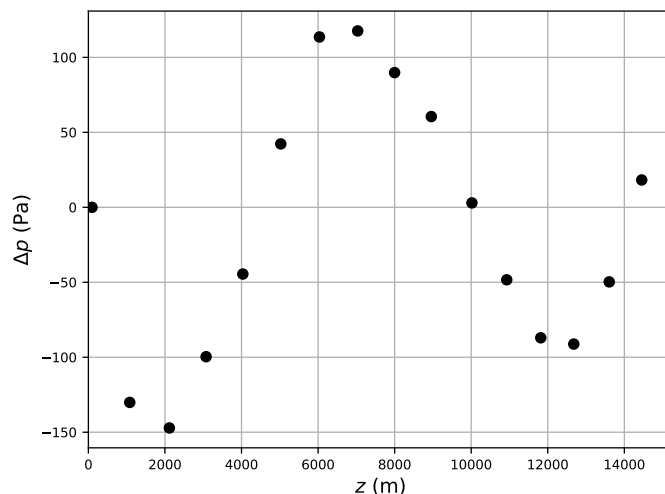


Figure 5 – Courbe des écarts entre les prévisions du modèle à gradient de température et les mesures.

III Depuis l'espace

Dans cette partie, on s'intéresse aux satellites qui permettent d'observer de façon globale les phénomènes météorologiques depuis l'extérieur de l'atmosphère. On distingue principalement deux types de satellites météorologiques : les satellites géostationnaires et les satellites défilants héliosynchrones à orbite polaire. On se propose d'étudier certaines de leurs caractéristiques : surface visible depuis le satellite, balayage et résolution.

Dans toute la suite, on considère que la Terre et son atmosphère forment une sphère de rayon R_T et on néglige les effets optiques liés à la présence de l'atmosphère (réfraction, diffusion, etc.).

Surface visible depuis un satellite géostationnaire

Q13. Positionnement d'un satellite géostationnaire.

- Expliquer pourquoi un satellite géostationnaire a forcément une orbite circulaire contenue dans le plan équatorial terrestre.
- Déterminer la valeur de l'altitude h d'un satellite terrestre en orbite géostationnaire.

Un des intérêts des satellites géostationnaires est qu'ils observent en continu la même zone de la surface terrestre, ce qui permet de réaliser facilement des images animées de l'atmosphère, donnant une idée très précise de l'évolution des phénomènes météorologiques. En revanche, du fait de leur éloignement et du positionnement de leur orbite, ils sont mal adaptés pour observer les parties de la Terre situées aux grandes latitudes.

Q14. Surface terrestre visible depuis un satellite géostationnaire.

- En considérant que la partie de la Terre visible depuis le satellite est limitée par un faisceau partant du satellite et dont les extrémités sont tangentes à la sphère terrestre, déterminer l'expression de la latitude maximale observable en fonction de son altitude h et du rayon terrestre R_T .
- Sous les hypothèses précédentes est-il possible d'observer depuis un satellite géostationnaire les pôles géographiques ? Des régions situées au-delà des cercles polaires ?
- Montrer que la fraction de l'aire de la surface terrestre visible depuis un satellite géostationnaire est donnée par $\%_S = \frac{1}{2} \frac{h}{R_T+h}$. Effectuer l'application numérique.

Dans la pratique, plusieurs phénomènes physiques limitent encore plus la visibilité des grandes latitudes et la fraction réellement visible est plus faible.

Ces limitations expliquent en partie pourquoi les observations issues des satellites géostationnaires sont complétées par des observations issues de satellites défilants héliosynchrones à orbites polaires.

Balayage d'un satellite héliosynchrone à orbite polaire

Les satellites défilants héliosynchrones à orbites polaires ont un plan orbital contenant toujours l'axe de rotation de la Terre autour d'elle-même et gardant une orientation fixe par rapport à la direction Terre-Soleil.

Pour ces satellites, d'après Météo-France, « l'imageur embarqué permet de surveiller les masses nuageuses sur l'ensemble de la Terre et notamment dans les régions polaires (la Scandinavie, par exemple) qui échappent à la vue des satellites géostationnaires. En revanche, comme les satellites défilants ne survolent une région de moyenne latitude que deux fois par jour, on ne peut donc pas "animer" leurs images pour suivre le mouvement des masses nuageuses ».

Au cours d'une révolution du satellite, on distingue deux phases : une phase « montante » pendant laquelle le satellite survole l'hémisphère sud puis l'hémisphère nord (phase montante) et une phase « descendante » pendant laquelle il survole l'hémisphère nord puis l'hémisphère sud.

On étudie un satellite en orbite circulaire héliosynchrone polaire à l'altitude 870 km et dont le capteur permet d'observer en continu une zone à la surface de la Terre de 2 800 km de large.

- Q15.** On note T la période de révolution du satellite, déterminer l'expression de la longueur de l'arc parcouru dans le référentiel géocentrique pendant une révolution du satellite par un point situé à la surface de la Terre à la latitude θ .
- Q16.** Expliquer pourquoi un point situé à une latitude moyenne n'est dans la zone observée en phase montante que deux fois par jour.

Résolution d'un imageur satellitaire

On étudie un imageur d'un satellite constitué d'un objectif et d'un capteur. On assimile l'objectif à une lentille mince de distance focale $f' = 300$ mm. Le capteur est rectangulaire, de diagonale 7,7 mm et son facteur de forme (rapport de la longueur du petit côté sur celle du grand) est 1/2,35. Au total, il est constitué de 2,1 millions de pixels de forme carrée. L'imageur est monté sur un satellite en orbite circulaire à l'altitude 410 km.

- Q17.** Quelle est la résolution de l'imageur, c'est-à-dire la distance minimale séparant deux points à la surface de la Terre formant des images séparées sur le capteur? Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti.

On souhaite déterminer s'il est pertinent de diminuer la taille des pixels du capteur pour améliorer la résolution. Pour cela, on évalue le rôle de la diffraction due à l'ouverture de l'objectif qui limite le pouvoir de séparation de l'appareil.

- Q18.** Définir en termes généraux en quoi consiste la diffraction.
- Q19.** On considère un faisceau lumineux monochromatique de longueur d'onde λ issu d'un point objet A_0 situé à l'infini et limité par une ouverture plane circulaire de diamètre D . On forme, dans le plan d'un capteur, une image A_i de A_0 grâce à une lentille mince convergente située après l'ouverture circulaire. Le plan du capteur est située à une distance f' du plan de la lentille. On pourra se référer à la figure 6.

(a) Décrire la figure de diffraction observée dans le plan du capteur.

- (b) Donner une relation entre λ , f' et D permettant de déterminer un ordre de grandeur de la largeur ΔX_i de la tache centrale de diffraction dans le plan du capteur.

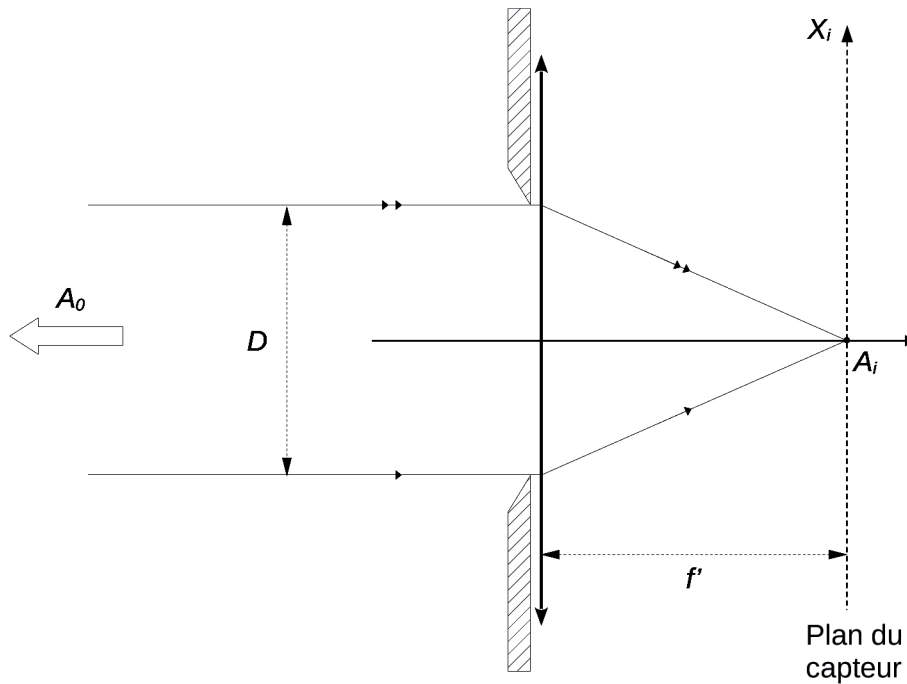


Figure 6 – Faisceau lumineux incident, ouverture circulaire, lentille et plan du capteur.

- Q20.** Dans le cas de l'imageur satellitaire étudié, l'objectif utilisé possède un nombre d'ouverture de 5,6 et le capteur est sensible à la lumière pour des longueurs d'onde comprises entre 350 et 790 nm.
- Est-il pertinent de tenter d'améliorer la résolution en jouant sur la taille des pixels du capteur? Justifier.
 - Proposer d'autres pistes pour améliorer la résolution.

PARTIE B : COMPOSITION DE CHIMIE

POLLUANTS DE L'ATMOSPHERE

La qualité de l'air peut être modifiée par des polluants qui peuvent être d'origine naturelle ou d'origine anthropique, c'est-à-dire liés à l'activité humaine. La pollution de l'air a des effets significatifs sur la santé et l'environnement, qui engendrent des coûts importants pour la société¹. Ce sujet propose l'étude de quelques polluants de l'atmosphère :

- les oxydes d'azote ;
- les composés organiques volatils COVs ;
- le dioxyde de soufre.

Les différentes parties sont totalement indépendantes.

Table des matières

1 Les oxydes d'azote	12
1.1 Titration à l'aide d'un tube échantillonneur	12
1.2 Dosage par chimiluminescence	13
2 Les composés organiques volatils, COVs	14
2.1 Synthèse de l'ETBE	14
2.2 Méthode de la cinétique relative	14
2.3 Application à l'étude de l'ETBE	15
3 Le dioxyde de soufre	16
3.1 Synthèse du trioxyde de soufre	16
3.2 Dosage par fluorescence	17
3.3 Titration conductimétrique	18
4 Annexes	19
4.1 Données atomiques et moléculaires	19
4.2 Données thermodynamiques	20
4.3 Évaluation des incertitudes de mesure	20
4.4 Code et instructions Python	21
4.5 Fiches de données de sécurité	22
4.6 Document-réponse	23

1. Site du Ministère de la Transition Écologique

1 Les oxydes d'azote

Le monoxyde d'azote et le dioxyde d'azote sont les principaux polluants azotés de l'air. Ils interviennent notamment comme précurseurs dans le cycle de l'ozone troposphérique. Deux méthodes de dosage de l'espèce NO_2 sont proposées dans cette section.

1.1 Titrage à l'aide d'un tube échantillonneur

Il est possible de titrer le dioxyde d'azote de l'air à l'aide d'un tube échantillonneur. Ce tube contient une grille en acier sur laquelle une solution aqueuse de triéthanolamine $(\text{HOCH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$ est imprégnée. Il est alors placé, pour une durée déterminée, dans la nature et le dioxyde d'azote de l'air est adsorbé sur les grilles sous forme d'ions nitrite.

Q1- Écrire la configuration électronique de l'atome d'hydrogène, de l'atome d'azote et de l'atome d'oxygène dans leur état fondamental. Écrire le schéma de Lewis de l'ion nitrite NO_2^- et de l'acide nitreux HNO_2 .

Q2- Justifier la miscibilité totale de la triéthanolamine dans l'eau.

Q3- Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation chimique mettant en jeu les propriétés acido-basiques de la triéthanolamine et des ions nitrite.

La solution d'ions nitrite est ensuite récupérée et les ions nitrite formés sont alors dosés. Différentes méthodes permettent d'obtenir la concentration en dioxyde d'azote dans l'air à partir de la concentration en ion nitrite dans la solution recueillie dans le tube échantillonneur.

Le titrage des ions nitrite se fait usuellement par la méthode de Griess-Saltzman² (**Figure 1**). Par réaction avec l'acide sulfanilique, on forme un ion diazonium (R1). Celui-ci réagit ensuite avec le *N*-(1-naphtyl)éthylènediamine dans l'acide acétique pour former un colorant diazoïque rouge (R2).

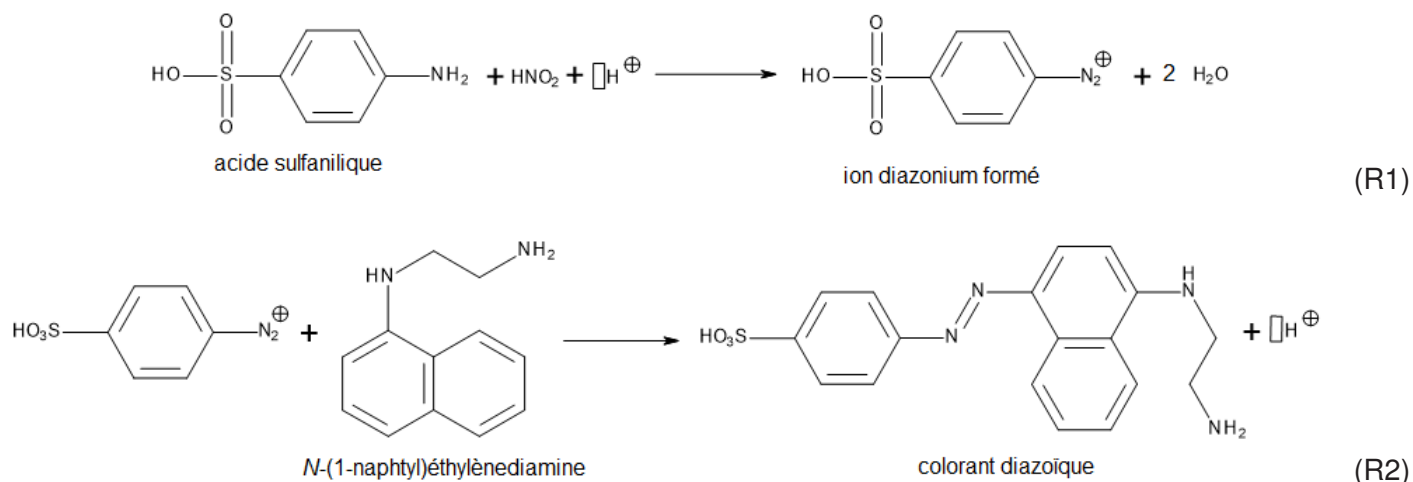


Figure 1 - Méthode de Griess-Saltzman.

Q4- Expliquer succinctement comment il est possible d'utiliser la transformation modélisée par les réactions (R1) et (R2) pour déterminer la concentration en ion nitrite dans la solution recueillie. Préciser les hypothèses effectuées.

2. B.E. Saltzman, « Colorimetric Microdetermination of Nitrogen Dioxide in the Atmosphere », *Anal. Chem.*, 26, **1954**, 1949-1955.

La réaction entre l'ion diazonium et le *N*-(1-naphtyl)éthylènediamine (R2) correspond à un mécanisme de substitution électrophile aromatique représenté sur la **Figure 2** ($\square E^{\oplus}$ désigne un électrophile).

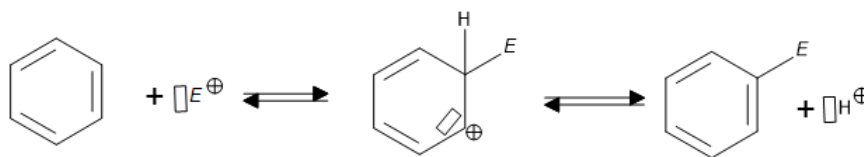


Figure 2 - Mécanisme de substitution électrophile aromatique.

Q5- Représenter un schéma de Lewis de l'ion diazonium issu de la réaction (R1) et justifier son caractère électrophile.

Q6- Reproduire et compléter le mécanisme de substitution électrophile aromatique de la **Figure 2** en ajoutant les flèches courbes. Préciser la signification des flèches courbes dans l'écriture d'un mécanisme en chimie organique.

1.2 Dosage par chimiluminescence

La méthode de référence pour doser le dioxyde d'azote de l'air repose sur la chimiluminescence.

Le dioxyde d'azote est d'abord réduit en monoxyde d'azote par action du molybdène à 320 °C.

Dans un ozoneur à décharge, on génère de l'ozone O_3 que l'on mélange avec un échantillon d'air. L'ozone réagit ensuite avec le monoxyde d'azote pour former du dioxyde d'azote excité et du dioxygène (R3). Le dioxyde d'azote se désexcite par émission d'un photon (R4). L'intensité lumineuse émise est alors enregistrée par un photomultiplicateur dont la réponse est un courant électrique. L'intensité de ce courant électrique est proportionnelle à la concentration de monoxyde d'azote.

Q7- Écrire les équations des réactions modélisant les transformations (R3) et (R4).

Cette méthode a été proposée en 1970³ et les résultats ont été reportés dans la **Figure 3** :

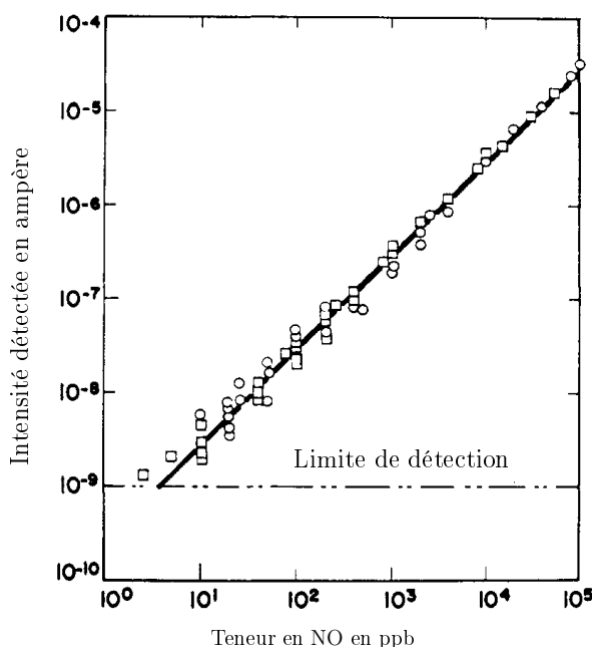


Figure 3 - Courbe d'étalonnage de l'intensité du courant détecté en fonction de la teneur en monoxyde d'azote. ppb signifie « partie par milliards » : 1 ppb correspond à 1 molécule pour 1 milliard de molécules dans le mélange gazeux.

3. A. Fontijn, A. J. Sabadell, and R. J. Ronco, « Homogeneous Chemiluminescent Measurement of Nitric Oxide with Ozone », *Anal. Chem.*, 42, 1970, 575-579.

Pour préserver la qualité de l'air, le seuil actuel en Europe pour le dioxyde d'azote est fixé à 40 µg par m³ d'air (moyenne annuelle).

Q8- Indiquer s'il est possible à partir des résultats fournis par la **Figure 3** de mesurer des concentrations équivalentes à ce seuil. Commenter en tenant compte de la date de publication de l'article.

Une station de mesure avec tube échantillonneur a permis d'obtenir le résultat suivant : $c_{\text{NO}_2} = 34,7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ avec une incertitude $u(c_{\text{NO}_2}) = 5,8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Une autre mesure effectuée par chimiluminescence a permis d'obtenir le résultat suivant : $c_{\text{NO}_2} = 39,8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ avec une incertitude $u(c_{\text{NO}_2}) = 2,1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Q9- Indiquer à l'aide du calcul d'un écart normalisé si ces deux mesures sont compatibles.

2 Les composés organiques volatils, COVs

Les composés organiques volatils (COVs) sont des composés organiques de faible température d'ébullition. Ils peuvent donc aisément se propager dans l'atmosphère où ils sont en général dégradés dans des cycles faisant intervenir le radical hydroxyle. Pour étudier l'impact de ces composés sur la santé, il est nécessaire de connaître leur devenir et notamment leur durée de vie.

L'ETBE ou 2-éthoxy-2-méthylpropane (**Figure 4**) est utilisé comme additif dans les carburants. Lors de sa dégradation dans l'atmosphère, les produits suivants sont notamment obtenus : formate de *tert*-butyle (TBF), acétate de *tert*-butyle (TBA), éthanal et méthanal.

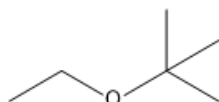


Figure 4 - Formule topologique de l'ETBE.

2.1 Synthèse de l'ETBE

Le méthoxyéthane, $\text{H}_3\text{COCH}_2\text{CH}_3$, peut être synthétisé par réaction de Williamson entre l'ion éthanolate et le bromométhane.

Q10- Nommer la fonction chimique formée lors de cette transformation.

Q11- Écrire le mécanisme de la réaction modélisant cette transformation au niveau microscopique.

On envisage de former l'ETBE de cette manière par réaction entre l'ion éthanolate et le 2-bromo-2-méthylpropane.

Q12- Expliquer pourquoi cette synthèse n'est pas efficace et indiquer quelle autre transformation peut être observée.

Q13- Proposer une voie de synthèse efficace pour l'ETBE.

2.2 Méthode de la cinétique relative

Dans les cas où la détermination de la concentration d'un réactif est difficile à déterminer, il est possible d'utiliser la méthode de la cinétique relative. Cette méthode permet de déterminer le rapport de la constante de vitesse pour le réactif étudié à la constante de vitesse pour un réactif référence de réactivité similaire. Considérons un COV A dont on souhaite étudier la réaction avec les radicaux hydroxyle HO^\bullet (R5) :



Q14- Montrer que la loi de vitesse associée à ce processus élémentaire peut s'écrire (Éq1) :

$$\frac{d \ln ([A])}{dt} = -k_A \times [\text{HO}^\bullet] \quad (\text{Éq1})$$

On introduit dans l'échantillon un réactif référence, *Ref*, de réactivité similaire à *A* pour lequel la constante de vitesse de la réaction (R6), k_{ref} , est connue :



Q15- Montrer que le tracé de $\ln \left(\frac{[A]_0}{[A]_t} \right)$ en fonction de $\ln \left(\frac{[Ref]_0}{[Ref]_t} \right)$ permet de déterminer $\frac{k_A}{k_{ref}}$.

2.3 Application à l'étude de l'ETBE

Dans une étude de 1992⁴, les auteurs ont utilisé cette méthode pour étudier la cinétique de la réaction entre l'ETBE et les radicaux hydroxyle. Ils ont utilisé comme référence le *n*-hexane. Les résultats obtenus sont reportés dans la **Figure 5** et la constante de vitesse associée à la réaction entre le *n*-hexane et le radical hydroxyle est $k_{hex} = 5,58 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{molécule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

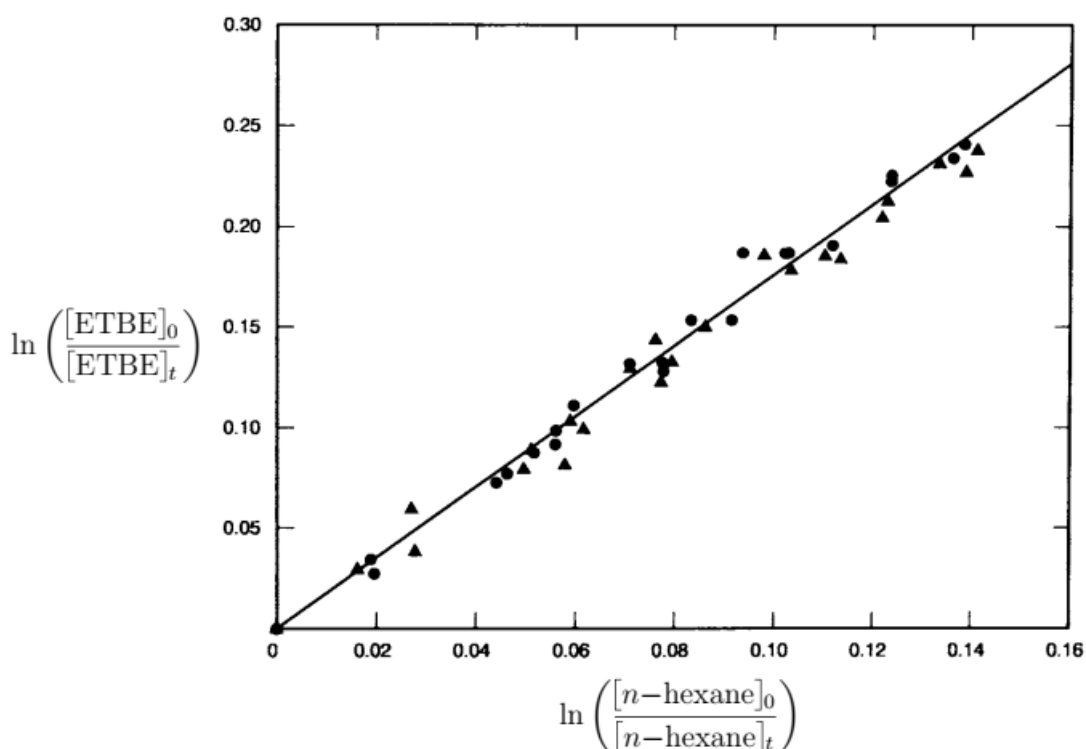


Figure 5 - Cinétique relative de la dégradation de l'ETBE par les radicaux hydroxyle par rapport au *n*-hexane. La distinction entre les symboles ronds et triangles ne sera pas prise en compte.

Q16- À partir des données expérimentales, estimer la constante de vitesse k_{ETBE} associée à la réaction entre l'ETBE et les radicaux hydroxyle.

En chimie atmosphérique, on définit la durée de vie τ d'une espèce selon l'expression de l'équation 2.

$$\tau = - \frac{[A]}{\frac{d[A]}{dt}} \quad (\text{Éq2})$$

Il est généralement admis que dans la troposphère la concentration du radical hydroxyle est constante et vaut environ $10^6 \text{ molécule} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Q17- Calculer la durée du vie de l'ETBE dans la troposphère. Conclure sur la pertinence de cette seule donnée pour appréhender la pollution liée à ce composé.

4. D.I. Smith, T.E. Kleindienst, E.E. Hudgens, C.D. McIver et J.J. Bufalini « Kinetics and Mechanism of the Atmospheric Oxidation of Ethyl Tertiary Butyl Ether », *Int. J. Chem. Kinet.*, 24, **1992**, 199-215.

3 Le dioxyde de soufre

3.1 Synthèse du trioxyde de soufre

L'étape-clé de la synthèse de l'acide sulfurique consiste en l'oxydation du dioxyde de soufre en trioxyde de soufre par le dioxygène (R7). Cette transformation est réalisée à une pression proche de la pression atmosphérique.



Un mélange gazeux initial contenant du dioxyde de soufre, du dioxygène et du diazote passe sur quatre lits successifs de catalyseur. On étudie ici le fonctionnement du premier lit. On définit le taux d'avancement τ_{SO_3} :

$$\tau_{\text{SO}_3} = \frac{n_{\text{SO}_3}}{n_{\text{SO}_2, \text{initial}}} \quad (\text{Éq3})$$

On cherche à déterminer le taux d'avancement à l'état final pour cette transformation effectuée sur le premier lit de catalyseur. La température à la sortie du premier lit est 876 K et à cette température la constante d'équilibre associée à l'équation de réaction (R7) est $K^\circ = 9,54$. Pour cela, on utilise le code Python fourni dans l'**Annexe 4.4**.

Q18- Recopier et compléter les lignes 18 et 26 du code Python fourni en **Annexe 4.4**.

Q19- Parmi les figures représentées sur la **Figure 6**, indiquer celle qui correspond à l'exécution du programme fourni dans l'**Annexe 4.4** dans le cas considéré ici. Justifier.

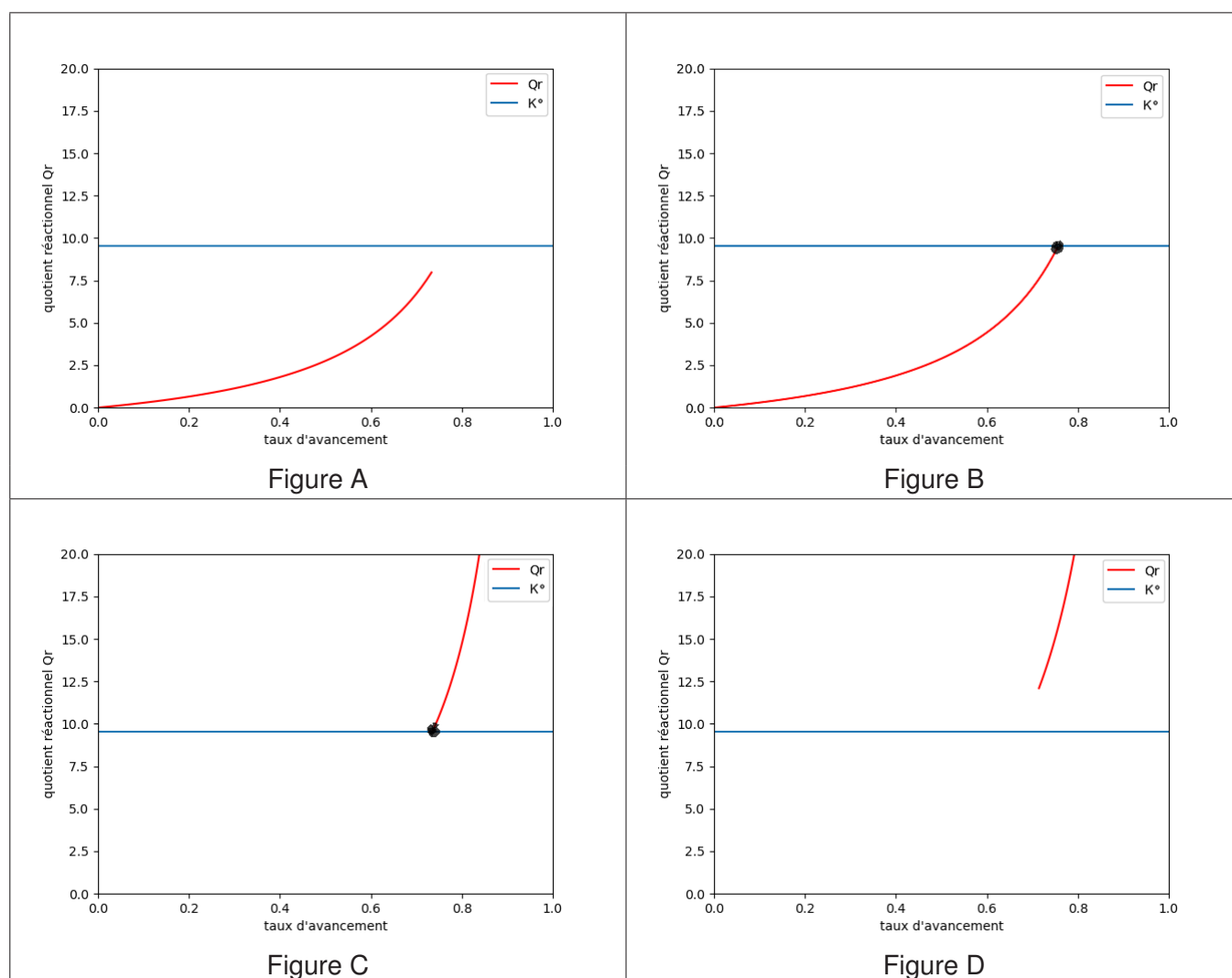


Figure 6 - Courbes représentant l'évolution du quotient réactionnel Q_r et de la constante d'équilibre K° en fonction du taux d'avancement.

On obtient un taux d'avancement à l'état final de 70%.

Q20- Compléter le schéma suivant représentant le bilan de fonctionnement du 1^{er} lit de la **Figure 7**.

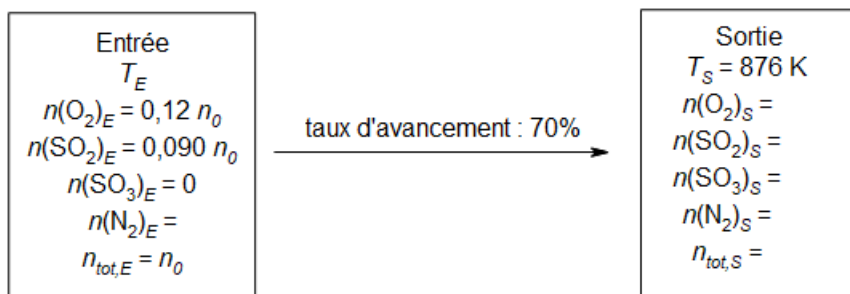


Figure 7 - Bilan de fonctionnement du premier lit.

Q21- À l'aide d'un bilan enthalpique clairement établi, déterminer la température d'entrée du gaz dans le premier lit, notée T_E , en supposant que la transformation est adiabatique. Tout développement, même non abouti, sera valorisé.

Q22- Commenter les conditions opératoires de cette synthèse : choix de la température et de la pression, succession de lits catalytiques.

3.2 Dosage par fluorescence

Il est possible de doser le dioxyde de soufre par fluorimétrie. Un échantillon est irradié à 213,9 nm et l'émission de fluorescence est mesurée entre 320 et 380 nm. L'intensité de fluorescence mesurée est alors proportionnelle à la quantité de dioxyde de soufre dans l'échantillon.

Des auteurs⁵, suite à une amélioration du procédé, proposent la courbe d'étalonnage représentée en **Figure 8**.

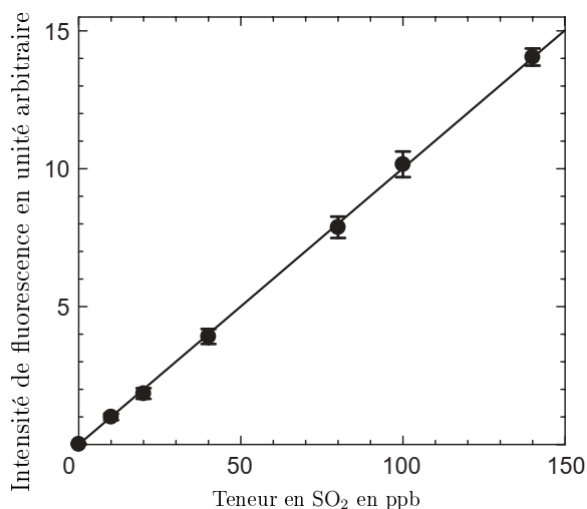


Figure 8 - Intensité de fluorescence mesurée en fonction de la teneur en dioxyde de soufre. ppb signifie « partie par milliards » : 1 ppb correspond à 1 molécule pour 1 milliard de molécules dans le mélange gazeux.

À partir d'une moyenne journalière de 50 ppb ou d'une moyenne horaire de 120 ppb de dioxyde de soufre dans l'air, il est nécessaire d'informer la population de l'existence d'un pic de pollution.

Les données du **Tableau 1** ont été enregistrées à différents moments de la journée.

horaire	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h
intensité de fluorescence en unité arbitraire	3,4	3,8	6,5	9,7	8,5

Tableau 1 - Intensités de fluorescence enregistrées à différents moments de la journée.

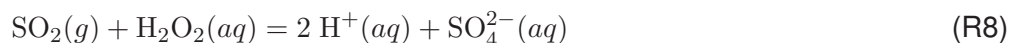
Q23- Indiquer s'il est nécessaire d'alerter la population suite à ces mesures.

Q24- Expliquer succinctement et à l'aide d'un schéma le phénomène de fluorescence.

5. Y. Mastumi, H. Shigemori et K. Takahashi, « Laser-induced fluorescence instrument for measuring atmospheric SO₂ », *Atmospheric Environment*, 39, (2005), 3177-3185.

3.3 Titration conductimétrique

Il est possible de réaliser un titrage du dioxyde de soufre dans l'air de la manière suivante. On fait barboter 10^4 m^3 d'air dans un litre de solution de peroxyde d'hydrogène en excès. Le dioxyde de soufre est alors dissous selon la transformation modélisée par la réaction d'équation (R8) :



On obtient une solution S_0 dont les ions sulfate peuvent être titrés par les ions baryum avec un suivi conductimétrique. Un volume $V_0 = 50 \text{ mL}$ de la solution S_0 est prélevé et introduit dans un bécher dans lequel on ajoute 100 mL d'eau distillée. Une solution de chlorure de baryum ($\text{Ba}^{2+}(aq), 2 \text{Cl}^-(aq)$) de concentration $c_1 = 2,500 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, ($u(c_1) = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), est ajoutée mL par mL en relevant la conductivité de la solution après chaque ajout.

La courbe représentée **Figure 9** est obtenue (les barres verticales et horizontales représentent l'incertitude de mesure). La courbe de la **Figure 9** est reproduite dans le document réponse en **Annexe 4.6 à rendre avec la copie**.

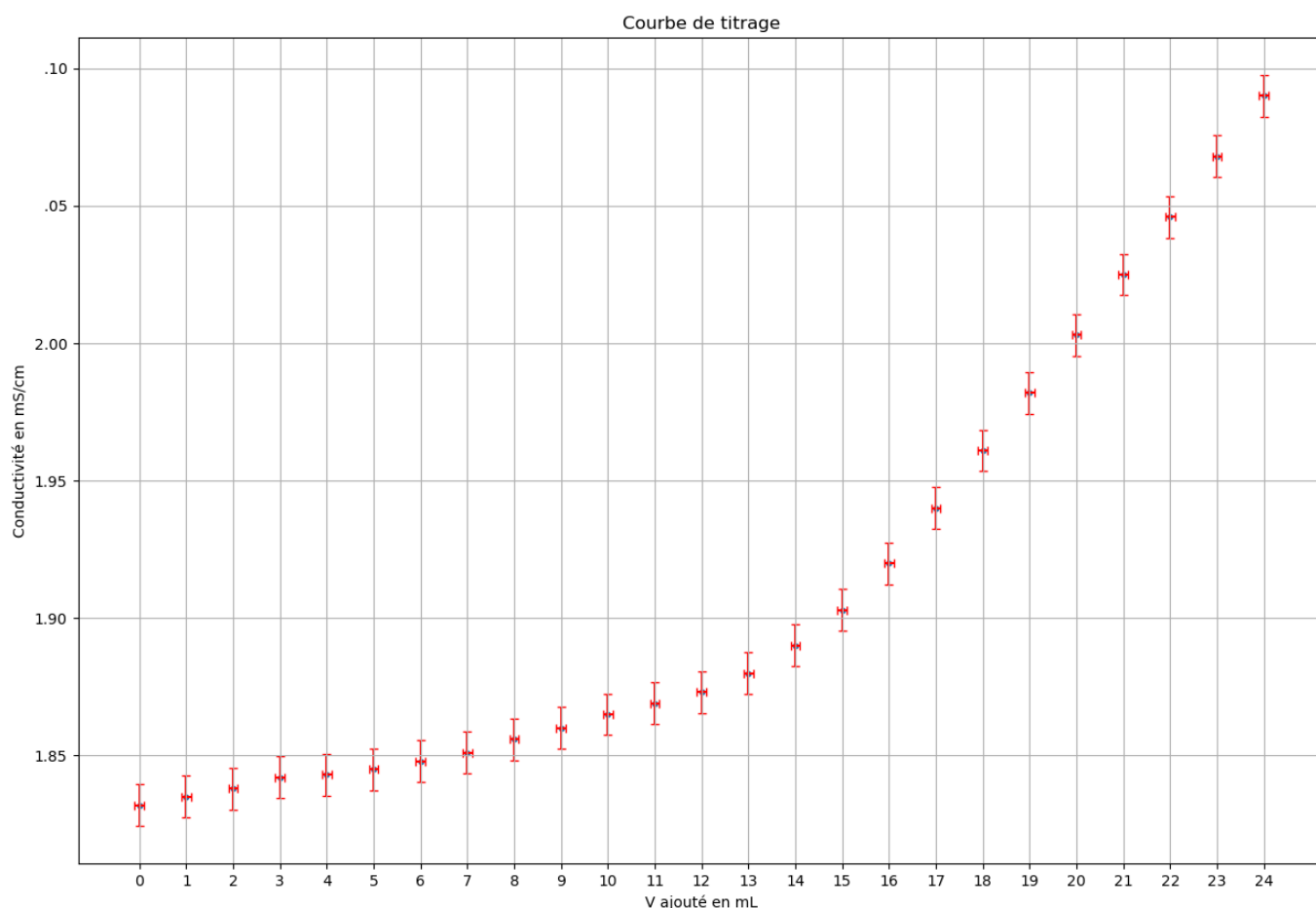


Figure 9 - Courbe de titrage conductimétrique.

Q25- Indiquer le matériel utilisé pour ce protocole en justifiant vos choix de verrerie.

Q26- Détailler comment cette courbe peut être utilisée pour déterminer le volume équivalent V_{eq} et l'incertitude-type associée $u(V_{eq})$. Le document-réponse de l'**Annexe 4.6** devra être complété et rendu. L'exploitation explicite des données expérimentales devra apparaître.

Q27- Déterminer la concentration en ion sulfate de la solution S_0 et l'incertitude-type associée.

Q28- Déterminer la concentration en masse de dioxyde de soufre dans l'air analysé.

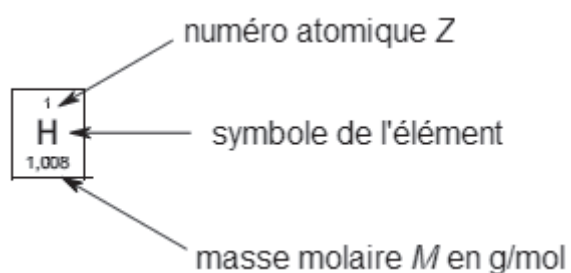
4 Annexes

4.1 Données atomiques et moléculaires

Classification périodique des éléments

1 H 1,008																	2 He 4,003
3 Li 6,94	4 Be 9,01											5 B 10,81	6 C 12,01	7 N 14,01	8 O 16,00	9 F 19,00	10 Ne 20,18
11 Na 22,99	12 Mg 24,30	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,97	16 S 32,06	17 Cl 35,45	18 Ar 39,95
19 K 39,10	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,87	23 V 50,94	24 Cr 52,00	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,93	28 Ni 58,69	29 Cu 63,55	30 Zn 65,38	31 Ga 69,72	32 Ge 72,63	33 As 74,92	34 Se 78,97	35 Br 79,90	36 Kr 83,80
37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,91	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,95	43 Tc -	44 Ru 101,1	45 Rh 102,9	46 Pd 106,4	47 Ag 107,9	48 Cd 112,4	49 In 114,8	50 Sn 118,7	51 Sb 121,8	52 Te 127,6	53 I 126,9	54 Xe 131,3
55 Cs 132,9	56 Ba 137,3	57-71	72 Hf 178,5	73 Ta 180,9	74 W 183,8	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,1	79 Au 197,0	80 Hg 200,6	81 Tl 204,4	82 Pb 207,2	83 Bi 209,0	84 Po -	85 At -	86 Rn -
87 Fr -	88 Ra -	89-103	104 Rf -	105 Db -	106 Sg -	107 Bh -	108 Hs -	109 Mt -	110 Ds -	111 Rg -	112 Cn -	113 Nh -	114 Fl -	115 Mc -	116 Lv -	117 Ts -	118 Og -

57 La 138,9	58 Ce 140,1	59 Pr 140,9	60 Nd 144,2	61 Pm -	62 Sm 150,4	63 Eu 152,0	64 Gd 157,3	65 Tb 158,9	66 Dy 162,5	67 Ho 164,9	68 Er 167,3	69 Tm 168,9	70 Yb 173,0	71 Lu 175,0
89 Ac -	90 Th 232,0	91 Pa 231,0	92 U 238,0	93 Np -	94 Pu -	95 Am -	96 Cm -	97 Bk -	98 Cf -	99 Es -	100 Fm -	101 Md -	102 No -	103 Lr -

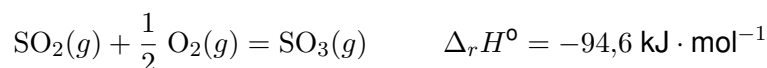


Durées de vie dans la troposphère en présence de radical hydroxyle de différents COVs

	acétone	éthanal	méthanal
durée de vie τ	65 jours	10 heures	1,5 jour

4.2 Données thermodynamiques

Données thermodynamiques à 876 K



Capacité thermique molaire standard à pression constante (indépendante de la température)

Composé	O ₂ (g)	N ₂ (g)	SO ₂ (g)	SO ₃ (g)
$C_{p,m}^\circ / \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	34,2	31,9	53,4	74,2

Constante des gaz parfaits

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

Constantes thermodynamiques à 25 °C

Constante d'acidité : $K_a(\text{ion triéthanolammonium/triéthanolamine}) = 10^{-7,8}$

$$K_a(\text{HNO}_2/\text{NO}_2^-) = 10^{-3,2}$$

$$K_a(\text{éthanol/ion éthanolate}) = 10^{-16}$$

Constante de solubilité : $K_s(\text{BaSO}_4(s)) = 10^{-10}$

Couples d'oxydoréduction



4.3 Évaluation des incertitudes de mesure

Incertitude-type pour une distribution uniforme

Pour une distribution uniforme des valeurs de X sur un intervalle de demi-étendue a : $u(X) = \frac{a}{\sqrt{3}}$.

Verrerie usuelle avec incertitude-type associée

	Fliale jaugée	Pipette jaugée	Burette graduée	Éprouvette graduée
$u(V) / \text{mL}$	0,035	0,029	0,029	0,17

Formules de composition des incertitudes

Relation	Incertitude
$X = A + B - C$	$u(X) = \sqrt{(u(A))^2 + (u(B))^2 + (u(C))^2}$
$X = \frac{A \times B}{C}$	$\frac{u(X)}{ X } = \sqrt{\left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{u(C)}{C}\right)^2}$

Calcul d'un écart normalisé ou z -score

$$z = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{(u(x_1))^2 + (u(x_2))^2}}$$

4.4 Code et instructions Python

```
1 # Importer la fonction logarithme et le tracé de courbe
2 import math
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # Position du problème
6 # On cherche l'état final pour une transformation modélisée par
7 # la réaction d'équation  $\text{SO}_2(\text{g}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g}) = \text{SO}_3(\text{g})$ 
8 n0= 1 # Quantité de matière de gaz à l'entrée n0 en mol
9 nSO2_0=0.09*n0 # mol
10 nO2_0=0.12*n0 # mol
11 nSO3_0=0 # mol
12 ntot_0=n0 # mol
13 P=1.2 # bar
14 K = 9.54
15
16 # Fonction quotient réactionnel
17 def Qr(x) :
18     return (?????????) #
19
20 # Fonction taux d'avancement
21 def alpha(x) :
22     return((nSO3_0+x)/(nSO2_0))
23
24 #Intervalle de définition de l'avancement
25 xi = 0 #avancement initial
26 ximax= min(?????????????) #avancement maximal
27 Q = Qr(xi) # quotient réactionnel initial
28 dxi = 1e-3
29 x=[]
30 y=[]
31
32 # Comparaison de Ka et Qr
33 if Q < K :
34     while Q < K :
35         t=alpha(xi)
36         x.append(t)
37         y.append(Q)
38         xi=xi+dxi
39         Q=Qr(xi)
40
41 elif Q > K :
42     while Q > K :
43         t=alpha(xi)
44         x.append(t)
45         y.append(Q)
46         xi=xi-dxi
47         Q=Qr(xi)
48 else :
49     print("Le système est initialement à l'équilibre")
50
51 #Visualisation graphique
52 plt.plot(x,y,"r-",label="Qr")
53 plt.xlabel("taux d'avancement")
54 plt.ylabel("quotient réactionnel Qr")
55 plt.ylim(0,20)
56 plt.xlim(0,1)
57 plt.axhline(y=K, label="K")
58 plt.legend()
59 plt.show()
```

L'instruction du module math de Python « `math.sqrt(x)` » renvoie la racine carrée de x.

4.5 Fiches de données de sécurité

Extrait de la Fiche de Données de Sécurité de l'ETBE



H225 - Liquide et vapeurs très inflammables
H336 - Peut provoquer somnolence ou vertiges

Extrait de la Fiche de Données de Sécurité de l'éthanal



Mention d'avertissement

Danger

Mentions de danger

H224 - Liquide et vapeurs extrêmement inflammables
H302 - Nocif en cas d'ingestion
H319 - Provoque une sévère irritation des yeux
H335 - Peut irriter les voies respiratoires
H341 - Susceptible d'induire des anomalies génétiques
H350 - Peut provoquer le cancer

Extrait de la Fiche de Données de Sécurité du méthanal



H226 - Liquide et vapeurs inflammables
H301 + H311 + H331 - Toxique par ingestion, par contact cutané ou par inhalation
H314 - Provoque de graves brûlures de la peau et de graves lésions des yeux
H317 - Peut provoquer une allergie cutanée
H335 - Peut irriter les voies respiratoires
H341 - Susceptible d'induire des anomalies génétiques
H350 - Peut provoquer le cancer
H370 - Risque avéré d'effets graves pour les organes

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

4.6 Document-réponse

À rendre avec la copie.

