

Lycée Baimbridge, MP 2025-2026

13 octobre 2025

Physique Chimie

DS 3

Durée : 2 heures

*Calculatrice **autorisée***

Le sujet est constitué de deux parties totalement indépendantes, les trois sous parties de la partie 1 sont également indépendantes. Il n'est pas nécessaire de les aborder dans l'ordre.

Les réponses doivent systématiquement être justifiées (sauf mention explicite du contraire). La clarté de la rédaction et la justesse du raisonnement mené seront valorisées, même si la tentative de réponse n'est pas aboutie ou si la réponse obtenue à la fin de la question est incorrecte.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur de sujet, merci de l'indiquer clairement sur votre copie, et de poursuivre votre composition en expliquant les initiatives que vous êtes amené.e à prendre.

Comme au concours, le sujet est long. Il n'est pas nécessaire de tout faire pour avoir une bonne note.

Données :

Constantes fondamentales :

- Permittivité diélectrique du vide $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
- Charge de l'électron $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Nombre d'Avogadro $\mathcal{N}_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Constante des gaz parfaits $R = 8.314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

Opérateur gradient en coordonnées cylindriques :

$$\vec{\text{grad}}(U) = \frac{\partial U}{\partial r} \vec{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \vec{u}_\theta + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{u}_z \quad (1)$$

Propriétés d'un axone :

- Rayon intérieur d'un axone $a = 5.0 \mu\text{m}$
- Epaisseur de la membrane d'un axone $b = 7.0 \text{ nm}$
- Permittivité relative de la membrane $\epsilon_r = 8.0$

Masses molaires :

Atome	H	C	N	O	Na
Masse molaire ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	1	12	14	16	23

Enthalpies et entropies standard de formation à 25°C :

Espèce	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 (\text{aq})$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 (\text{aq})$	$\text{CO}_2 (\text{g})$	$\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$\text{CO} (\text{g})$	$\text{O}_2 (\text{g})$
$\Delta_f H^\circ (\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	-673	-1273	-393.5	-285	-110.6	
$S_m^\circ (\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1})$			213.7		197.6	204.8

1 Suivi médical d'un sportif (E3A)

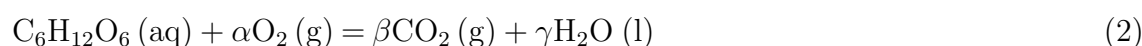
Nous allons, dans ce sujet, étudier différents phénomènes physico-chimiques en relation avec le suivi médical des sportifs.

1.1 Métabolisme aérobie et anaérobie

Lorsqu'on fournit un effort peu intense, le glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) est oxydé en dioxyde de carbone (CO_2) par le dioxygène (O_2) dissous dans le sang, c'est le métabolisme aérobie du glucose.

□ 1 – Proposer une formule de Lewis pour le glucose, sachant que les 6 atomes de carbone forment un cycle, et qu'il n'y a pas de liaisons O-O.

□ 2 – Déterminer les coefficients stoechiométriques α , β et γ de l'équation d'oxydation du glucose ci-dessous :



□ 3 – Déterminer l'expression, puis calculer l'enthalpie standard de cette réaction, supposée indépendante de la température. La réaction est-elle endothermique ou exothermique ? Commenter.

□ 4 – Quel est le volume d'air à 21 % de dioxygène (considéré comme un gaz parfait à la pression $P = 1.0 \text{ bar}$ et la température $T = 293 \text{ K}$) nécessaire pour produire les $2.5 \times 10^3 \text{ kJ}$ consommés pendant une heure de sport ? Quelle est dans ce cas la masse de glucose consommée ?

Si l'effort est plus intense, le dioxygène n'est plus disponible en quantité suffisante par le sang, et le muscle utilise un métabolisme anaérobie avec formation d'acide lactique ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$), éventuellement en parallèle du métabolisme aérobie.

Le bilan de la transformation chimique associée au métabolisme anaérobie peut être exprimé par l'équation de réaction suivante :



□ 5 – Comparer l'énergie produite par l'utilisation d'une mole de glucose suivant le métabolisme aérobie d'une part et le métabolisme anaérobie d'autre part. Commenter.

1.2 Test d'effort par vélo

On étudie un vélo d'appartement nommé CEVIS (Cycle Ergometer with Vibration Isolation and Stabilization System). Un des dispositifs pouvant permettre d'apporter un couple de freinage au vélo est l'induction. Nous allons étudier un dispositif simplifié de freinage par induction. Dans ce dispositif simplifié, les pédales entraînent une roue. Sur

la face extérieure de cette roue sont placées à intervalles réguliers des spires carrées qui passent chacune leur tour devant un solénoïde alimenté par un courant continu.

Nous allons faire une modélisation unidimensionnelle de ce dispositif. Nous allons d'abord étudier le champ magnétique créé par un solénoïde de section carrée.

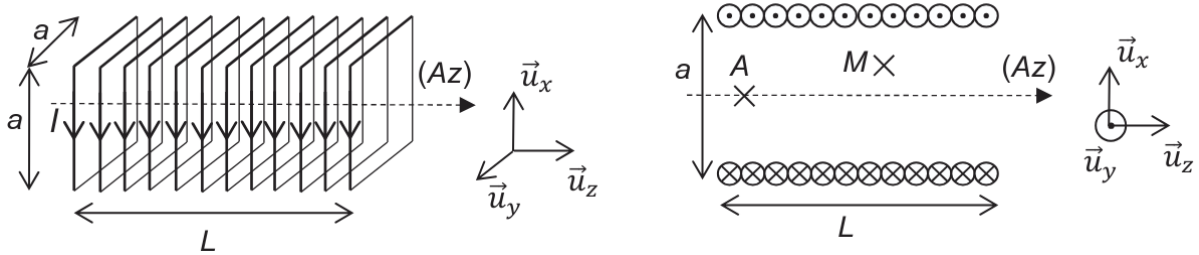


Figure 1: Schéma du solénoïde, en perspective et en coupe.

On considère un solénoïde, représenté ci-dessus, dont la longueur vaut L et de section carrée de côté a avec $L \gg a$. Ce solénoïde est constitué en tout de N spires parcourues par le courant d'intensité I et on pose $n = \frac{N}{L}$ le nombre de spires par unité de longueur. L'axe du solénoïde est confondu avec l'axe (Az) .

On admet que le champ magnétique est nul à l'extérieur du solénoïde.

□ 6 – À partir du modèle du solénoïde infini, montrer que le champ magnétique peut s'écrire $\vec{B} = B(x, y)\vec{u}_z$, puis déterminer l'expression du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde, sous la forme $\vec{B}_{int}(M) = B_0\vec{u}_z$, B_0 étant une constante à exprimer en fonction des caractéristiques du circuit notamment.

Si on travaille en face d'un solénoïde fini réel (longueur L , section carrée de côté a), on considère que le champ magnétique est nul sauf dans la zone grisée de surface a^2 représentée sur la figure suivante, où le champ magnétique vaut $\vec{B}_0 = B_0\vec{u}_z$.

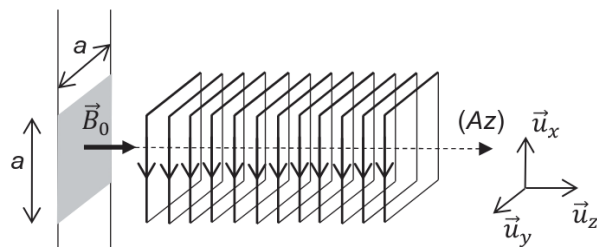


Figure 2: Champ magnétique en face du solénoïde.

On étudie maintenant une spire carrée de côté a , qui passe à la vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_x$ imposée en face du solénoïde réel. Elle entre puis sort de la zone grisée des figures. On étudie d'abord la phase où la spire entre dans le champ magnétique : la partie avant de la spire (EF) est donc dans la zone grisée et la partie arrière (CD) est dans une zone de champ nul (voir figure 6).

On considère qu'à $t = 0$, la partie avant (EF) de la spire est en $x = 0$, c'est-à-dire que la spire commence juste à entrer dans la zone grisée.

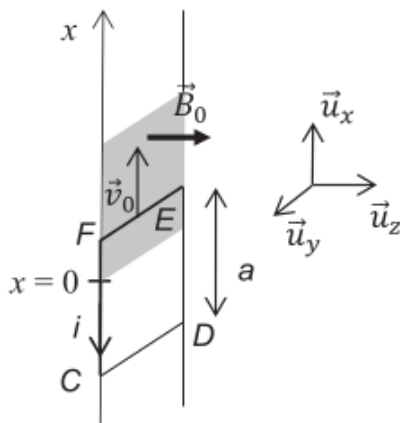


Figure 3: Spire entrant dans la zone de champ nul.

On rappelle la loi de Faraday dans un circuit soumis à un champ magnétique variable, qui relie la force électromotrice de l'induction au flux du champ magnétique à travers le circuit : $e = -\frac{d\phi}{dt}$.

□ 7 — Expliquer qualitativement pourquoi il apparaît une intensité i dans la spire, dont le sens sera choisi comme sur la figure 6. La spire ayant une résistance interne R , déterminer cette intensité i pendant toute la phase où la spire entre dans la zone grisée, en fonction de v_0 notamment. On négligera l'auto-inductance de la spire et son champ propre.

□ 8 — En déduire qu'il s'exerce une force constante sur la spire pendant cette phase d'entrée dans la zone grisée, dont on donnera l'expression en fonction de B_0, a, R et de v_0 . Justifier qualitativement le sens de cette force.

□ 9 — De la même façon, montrer que la force exercée sur la spire pendant la phase de sortie de la zone grisée (c'est-à-dire quand la partie arrière de la spire (CD) est dans la zone grisée et la partie avant (EF) dans une zone de champ nul) vaut :

$$\vec{F} = -\frac{B_0^2 a^2}{R} v_0 \vec{u}_x \quad (4)$$

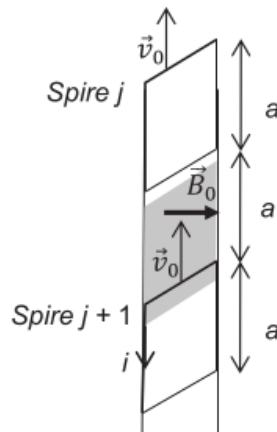


Figure 4: Succession de spires.

On étudie maintenant une succession de spires toutes identiques, séparées de la distance a , qui passent devant le solénoïde à la vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_x$ (voir figure 7).

- 10 – Quel est l'avantage de choisir une distance a entre les spires ?
- 11 – Déterminer la puissance dissipée par le système de freinage. Comment cette puissance varie en fonction de la vitesse v_0 ?
- 12 – Pourquoi est-il intéressant d'un point de vue sportif que la puissance augmente quand la vitesse augmente ?

1.3 Electrocardiogramme

L'électrocardiogramme permet un suivi du fonctionnement cardiaque par le simple port d'électrodes collées à la peau. Nous allons d'abord étudier le fonctionnement électrique des nerfs, puis appliquer le modèle du dipôle électrostatique à l'électrocardiogramme.

1.3.1 Fonctionnement électrique d'un nerf

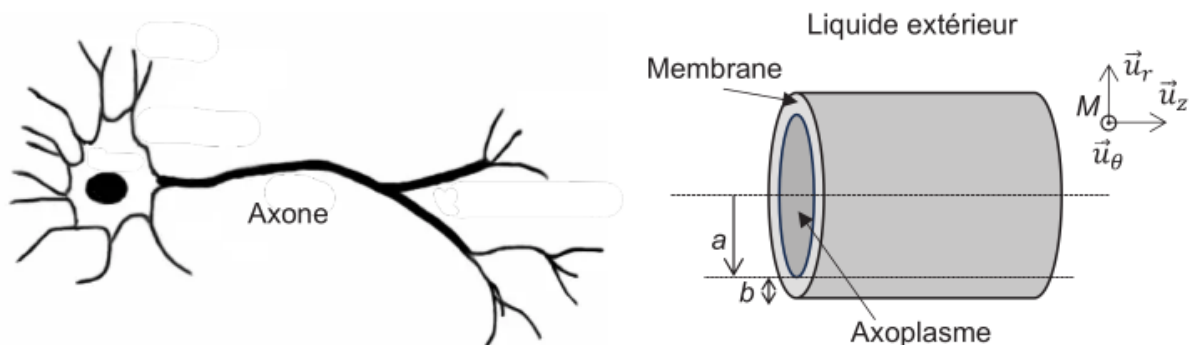


Figure 5: Schéma d'un neurone (à gauche) et d'un axone (à droite).

Un neurone est une cellule complexe dont nous allons étudier une partie, l'axone, ou fibre nerveuse, qui conduit le signal nerveux électrique dans le corps humain.

On modélise un axone par un cylindre infiniment long d'axe $(O, \vec{u}_z)$, de rayon intérieur a . Il est constitué d'une membrane d'épaisseur b et de permittivité électrique relative ϵ_r et d'un axoplasme à l'intérieur de cette membrane (voir figure ci-dessus).

L'axoplasme est au potentiel V_A , tandis que le liquide extérieur est au potentiel V_E . La face intérieure de la membrane porte une charge de densité surfacique σ uniforme. On ne s'intéresse pas à la charge de la face extérieure. On travaille en régime stationnaire.

On utilise la base locale $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$ en coordonnées cylindriques (r, θ, z) . On admet que les calculs de champs dans la membrane sont identiques à ceux du vide, à ceci près qu'il faut remplacer la permittivité du vide ϵ_0 par $\epsilon_0\epsilon_r$, où ϵ_r est la permittivité relative de la membrane.

□ **13** – Montrer que le champ électrique $\vec{E}(M)$ dans la membrane ne dépend que de r et qu'il est porté par le vecteur directeur $\vec{u}_r$.

□ **14** – En appliquant le théorème de Gauss, déterminer l'expression de $\vec{E}(M)$ en fonction de $\sigma, \epsilon_0\epsilon_r, a, r$ et de $\vec{u}_r$.

□ **15** – Quelle est la relation liant le champ électrostatique $\vec{E}(M)$ et le potentiel $V(M)$? Déterminer l'expression du potentiel $V(M)$ en fonction de $\sigma, \epsilon_0\epsilon_r, a, r$ et de V_A . En déduire que la charge surfacique σ peut s'écrire :

$$\sigma = \frac{\epsilon_0\epsilon_r(V_A - V_E)}{a \ln \left(\frac{a+b}{a} \right)} \quad (5)$$

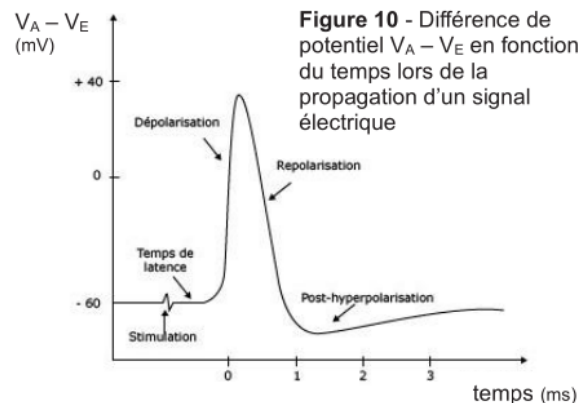
□ **16** – En utilisant la relation $a \gg b$, simplifier l'écriture de la charge surfacique σ en fonction de $\epsilon_0\epsilon_r, b, V_E$ et de V_A , puis montrer qu'on peut écrire la norme du champ électrique sous la forme $||\vec{E}(M)|| = \left| \frac{V_A - V_E}{b} \right|$. Quelle est la charge Q portée par la face intérieure d'une longueur L de membrane ?

□ **17** – En utilisant la relation $Q = C(V_A - V_E)$, déterminer l'expression de la capacité de la membrane pour une longueur L , puis sa capacité par unité de surface de membrane c_m .

□ **18** – On trouve dans la littérature médicale $c_m = 1 \cdot 10^{-2} \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$. Vérifier que cette valeur est compatible avec l'expression littérale trouvée plus haut. Sachant que $V_A - V_E = -60 \text{ mV}$, déterminer numériquement σ et le champ électrique $\vec{E}(M)$ dans la membrane.

En réalité, ce potentiel et cette répartition des charges correspondent à une situation où l'axone est au repos. Quand un influx nerveux se propage, le potentiel change suivant des mécanismes biologiques que nous n'expliquerons pas (voir figure 10). On appelle le signal correspondant "potentiel d'action".

Lorsque le cœur bat, il y a un potentiel d'action qui se propage dans le cœur. Par conséquent, on peut considérer qu'une partie du cœur est chargée positivement et une autre partie négativement. Cela ressemble à un dipôle électrostatique. Cette modélisation très simple permet en fait d'expliquer de façon satisfaisante les électrocardiogrammes.



1.3.2 Réalisation et exploitation d'un électrocardiogramme

Dans notre modèle simplifié, le muscle cardiaque se comporte comme un dipôle électrique qui varie suffisamment lentement pour qu'on puisse utiliser les formules de la statique. On rappelle que le potentiel créé au point M de position $\overrightarrow{OM} = \vec{r}$ par un dipôle électrostatique placé en O de moment dipolaire électrique $\vec{p}$ s'écrit :

$$V(M) = \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (6)$$

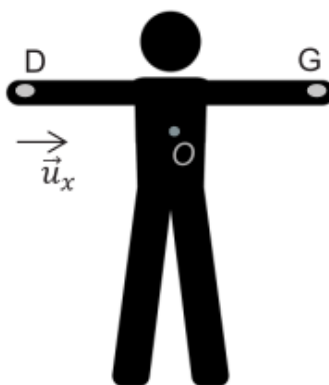


Figure 6: Position des électrodes.

Un électrocardiogramme est un tracé contenant 12 lignes correspondant à la mesure de 12 tensions mesurées entre différentes électrodes situées sur le corps humain. Nous n'allons nous intéresser qu'à une de ces mesures de tension, entre deux électrodes placées l'une au poignet gauche (G) et l'autre au poignet droit (D). On mesure alors la tension $U_1 = V_G - V_D$ en fonction du temps. Le cœur O où est situé le dipôle étudié est à égale distance d des électrodes $d = OG = OD$.

□ **19** – En utilisant la formule de $V(M)$, montrer que U_1 est proportionnelle à la projection du dipôle électrostatique du cœur sur la direction $\vec{u}_x$ entre D et G. On notera K la constante de proportionnalité, qu'on exprimera en fonction de ϵ_0, d et de la distance DG .

Le tableau ci-dessous représente le dipôle électrique du cœur à différents instants t_i successifs pendant un cycle cardiaque (un point représente un dipôle nul). On précise l'orientation du vecteur $\vec{u}_x$ en bas à droite.

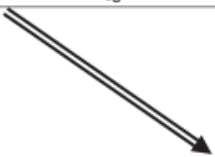
t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
								
t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{16}	
								

Figure 7: Evolution du dipôle électrostatique cardiaque en fonction du temps (avec $t_i < t_{i+1}$).

□ **20** – Auquel de ces 4 graphes (représentant la tension en fonction du temps) l'enregistrement peut-il correspondre ?

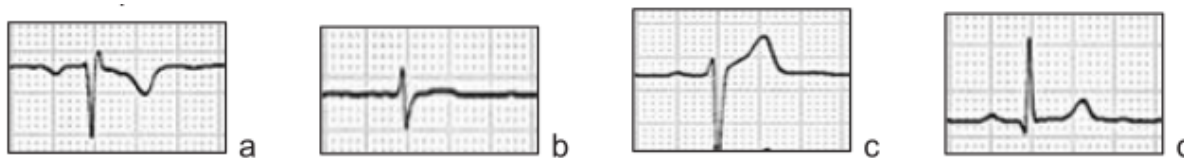


Figure 8: Auquel de ces graphes l'enregistrement peut-il correspondre ?

2 Utilisation de nanoparticules d'or en catalyse hétérogène (Centrale)

La combustion du carburant dans un moteur thermique automobile conduit à la formation de monoxyde de carbone, gaz toxique inodore et incolore. Le pot catalytique vise à réduire la nocivité des gaz d'échappement. Le monoxyde de carbone y est oxydé en dioxyde de carbone au contact d'éléments catalyseurs qui contiennent des métaux nobles comme le platine, le palladium ou le rhodium.

Jusqu'à la fin des années 1980, l'or était considéré comme un métal inactif en catalyse, contrairement aux autres métaux nobles précédemment cités. C'est en 1987 qu'une équipe de recherche japonaise a mis en évidence non seulement les propriétés de catalyse remarquables de nanoparticules d'or de taille inférieure à 5 nm dans la réaction d'oxydation du monoxyde de carbone, mais aussi que l'or était le seul métal capable de catalyser cette réaction à température ambiante, voire à plus basse température.

2.1 Influences de la température, de la pression et de la composition du mélange gazeux sur l'oxydation du monoxyde de carbone

On étudie l'équilibre chimique résultant de l'oxydation du monoxyde de carbone par le dioxygène. Toutes les espèces chimiques considérées sont en phase gazeuse à la température T et à la pression totale P fixées et sont assimilées à des gaz parfaits.

□ **21** – Écrire l'équation de la réaction qui modélise l'oxydation en phase gazeuse du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone en se ramenant à une mole de dioxygène.

□ **22** – Calculer la valeur de la constante thermodynamique $K^\circ(T)$ de cet équilibre chimique dans le cas particulier où $T = 298 \text{ K}$.

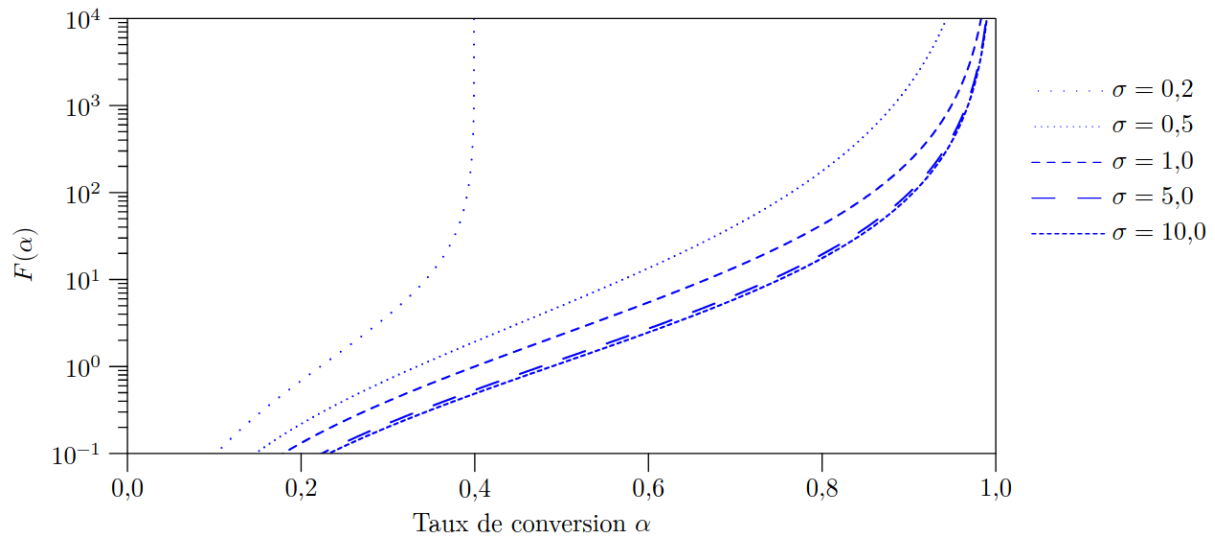
L'état initial est constitué d'un mélange idéal de monoxyde de carbone et de dioxygène gazeux seulement. On définit la proportion initiale de dioxygène par le paramètre σ , égal au rapport de la quantité initiale de dioxygène sur la quantité initiale de monoxyde de carbone. On définit aussi le taux de conversion du monoxyde de carbone comme étant la quantité de monoxyde de carbone qui a réagi, rapportée à la quantité initiale de monoxyde de carbone. On le note α .

□ **23** – Indiquer quelles sont les conditions de température et de pression qui favorisent l'oxydation du monoxyde de carbone. Dans ces conditions, discuter de l'intérêt d'utiliser un catalyseur.

Le graphe de la figure suivante représente les variations de la fonction :

$$F(\alpha) = \frac{\alpha^2(1 + \sigma - \alpha/2)}{(1 - \alpha)^2(\sigma - \alpha/2)} \quad (7)$$

en fonction de α pour différentes valeurs de σ , en échelle semilogarithmique.



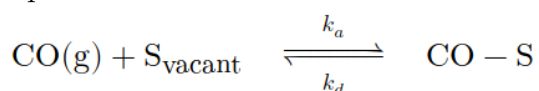
□ **24** – Indiquer comment il convient de choisir la proportion initiale de dioxygène σ pour favoriser l'oxydation du monoxyde de carbone.

2.2 Modèle de Langmuir de l'adsorption

La catalyse de l'oxydation du monoxyde de carbone par des nanoparticules d'or fait intervenir une étape d'adsorption (plus précisément de chimisorption) au cours de laquelle les molécules de monoxyde de carbone viennent se lier, par liaison chimique, à certains sites d'adsorption sur la surface d'une nanoparticule. Un site d'adsorption lié à une molécule de monoxyde de carbone est qualifié d'occupé, par opposition à un site vacant.

On propose de déterminer à l'aide d'un modèle de cinétique chimique dans un premier temps, puis grâce à des arguments de thermodynamique statistique dans un second temps, la fraction des sites d'adsorption occupés à l'équilibre thermodynamique à la température T en fonction de la pression P en monoxyde de carbone. Cette fraction, également appelée *taux d'occupation*, est notée θ . Elle est égale au nombre de sites occupés divisé par le nombre total de sites.

L'adsorption d'une molécule de monoxyde de carbone sur une surface est modélisée par le processus



où un site d'adsorption vacant est noté S_{vacant} et un site occupé par une molécule de monoxyde de carbone adsorbée est noté CO-S. La constante de vitesse de la réaction d'adsorption est notée k_a alors que la constante de vitesse du processus réciproque, appelé désorption, est notée k_d .

On suppose que la vitesse de la réaction d'adsorption est d'ordre 1 par rapport à la pression partielle en monoxyde de carbone, notée p , et d'ordre 1 par rapport au taux de sites vacants. De même, on suppose que la vitesse de la réaction de désorption est d'ordre 1 par rapport au taux de sites occupés.

□ **25** – Établir l'expression de la vitesse d'apparition des sites occupés, $\frac{d\theta}{dt}$, en fonction de k_a, k_d, θ et p .

□ **26** – Exprimer θ , lorsque l'équilibre est établi, en fonction du rapport $K = k_a/k_d$ des constantes de vitesse et de la pression p . L'expression obtenue a été établie pour la première fois par Irving Langmuir, physicien et chimiste américain, récipiendaire du prix Nobel de chimie en 1932 pour ses travaux en physico-chimie des surfaces.

La figure suivante représente des mesures d'adsorption du monoxyde de carbone sur des nanoparticules d'or : le taux d'occupation θ est représenté en fonction de la pression p en monoxyde de carbone à température ambiante fixée. On cherche à modéliser ces données par le modèle de Langmuir qui fournit l'expression de θ en fonction de p établie à la question précédente.

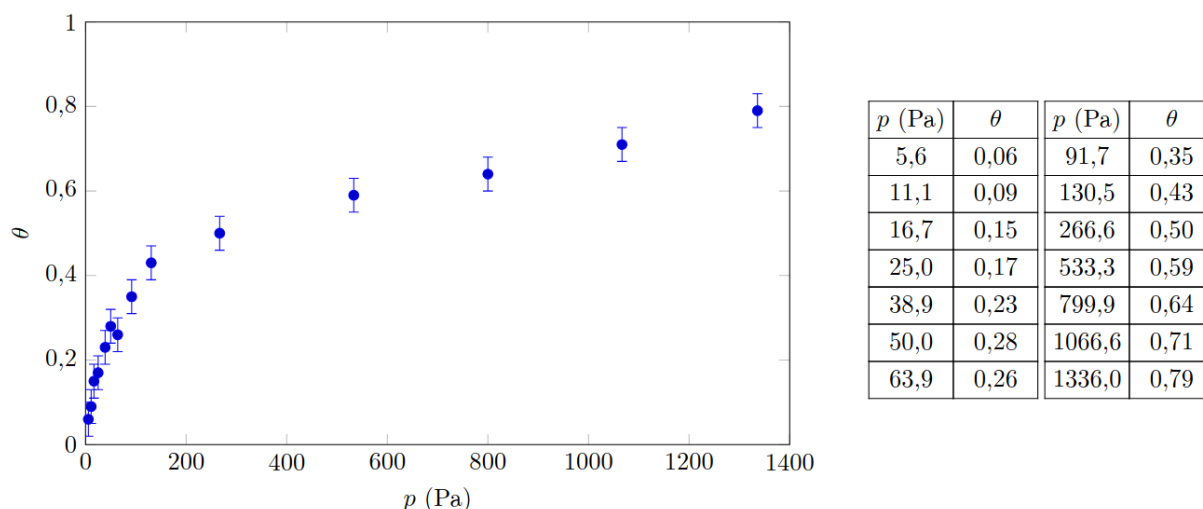


Figure 9: Taux d'occupation σ de la surface du catalyseur (nanoparticule d'or) en fonction de la pression p en monoxyde de carbone, à température ambiante

□ **27** – On choisit de modéliser les données expérimentales données dans la figure à l'aide du modèle de Langmuir. Estimer une valeur approchée du rapport K des constantes de vitesse compatible avec les mesures dans la limite des faibles pressions. Expliquer de façon argumentée (en s'appuyant par exemple sur une représentation graphique) si cette valeur permet d'accorder le modèle de Langmuir avec les mesures réalisées aux plus hautes pressions.