

SESSION 2012

**CAPLP
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP**

Section : MATHÉMATIQUES – SCIENCES-PHYSIQUES

COMPOSITION DE PHYSIQUE-CHIMIE

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Pour la partie Physique :
Les annexes 1, 2 et 3 sont à rendre obligatoirement avec la copie.

PHYSIQUE

Cette partie est composée de deux exercices indépendants.

EXERCICE I : La loi de la gravitation, un exemple de loi physique

Le texte ci-dessous est extrait du livre « La nature de la physique » de Richard Feynman.

« [...] Après Copernic, il y eut de grands débats pour savoir si les planètes tournaient vraiment autour du Soleil avec la Terre ou si la Terre occupait le centre de l'Univers, etc. Puis un homme appelé Tycho Brahé imagina une façon de répondre à la question. Il pensa que ce serait peut-être une bonne idée d'observer très, très soigneusement, et de noter où les planètes se situaient dans le ciel [...]. Quand toutes les données furent rassemblées, elles parvinrent dans les mains de Kepler, qui essayait alors d'analyser le type de mouvement qu'exécutent les planètes autour du Soleil [...]. Ainsi, grâce à la précision des expériences, il put procéder à une autre tentative et finit par trouver trois choses [...].

La question suivante était : qu'est-ce qui fait tourner les planètes autour du Soleil ?

[...] Galilée étudiait les lois du mouvement des objets courants qu'on trouve sur Terre. En étudiant ces lois, faisant un grand nombre d'expériences pour voir comment des boules roulent sur un plan incliné, comment les pendules se balancent et d'autres encore, Galilée découvre un grand principe [...].

Le pas suivant fut franchi par Newton qui discuta la question : « Si elle¹ ne va pas en ligne droite, que se passe-t-il alors ? » et donna la réponse suivante : il faut une force pour modifier la vitesse [...]. Jusque là, Newton n'avait en fait rien dit de neuf car il avait juste énoncé deux idées que Kepler présentait dans un autre langage [...].

Mais les gens avaient vu dans leurs télescopes les satellites tournant autour de Jupiter, et ceci ressemblait à un petit système solaire, comme si les satellites étaient attirés par Jupiter. La Lune tourne autour de la Terre et est attirée de la même façon [...]. On savait que, dans le phénomène de la gravitation, les objets sur Terre étaient attirés vers le bas mais on doit à Newton l'idée que la gravitation qui retenait la Lune en orbite était peut-être la même que celle qui attirait les objets vers la Terre [...].

Les premières vérifications² soigneuses portèrent sur les satellites de Jupiter. En observant attentivement leurs déplacements sur de longues périodes de temps, on pouvait vérifier si tout se passait « selon » Newton ; il se trouva que ce n'était pas le cas. Les lunes de Jupiter semblaient avoir tantôt huit minutes d'avance, tantôt huit minutes de retard sur un horaire calculé à partir des lois de Newton.

On remarqua qu'elles étaient en avance lorsque Jupiter était près de la Terre, en retard lorsqu'il en était loin, ce qui était plutôt bizarre. Roemer, faisant confiance à la loi de la gravitation arriva à l'intéressante conclusion [...]. »

¹ « elle » désigne une planète du système solaire

² Il s'agit des vérifications de la loi de Newton

Données :

Constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-2}$

Masse de Jupiter : $M_J = 1,90 \times 10^{27} \text{ kg}$

Accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$

Période de révolution de la Terre : 365,25 jours

Rayon moyen de la Terre : $R_T = 6370 \text{ km}$

Rayon moyen de Jupiter : $R_J = 71\,500 \text{ km}$

Distance Terre-Lune : $R_{TL} = 384\,000 \text{ km}$

Rayon de la trajectoire du satellite Io autour de Jupiter : $R_{JI} = 421\,800 \text{ km}$

Moment cinétique par rapport à un point A d'un objet ponctuel M de masse m et de vitesse $\vec{v}$ en mouvement dans un référentiel R : $\vec{\sigma}_A = \vec{AM} \wedge m\vec{v}$

Tous les corps étudiés seront assimilés à des points matériels dotés de leur masse. Les satellites et les astres étudiés seront considérés à répartition de masse à symétrie sphérique.

A. À propos de l'auteur et des scientifiques cités dans le texte

A.1. Qui est Richard Feynman, l'auteur du texte ?

A.2. Newton a-t-il vécu, en partie, au XIV^{ème} ou au XVII^{ème} siècle ?

A.3. Parmi les scientifiques suivants ayant contribué à l'évolution de l'astronomie : Tycho Brahé, Kepler, Galilée et Newton, indiquer ceux qui sont contemporains.

B. Quelques aspects des mouvements des corps selon Kepler et Galilée

B.1. D'après le texte, « Kepler finit par trouver trois choses ». Énoncer ces « trois choses ».

B.2. Dans son mouvement autour du Soleil, une planète assimilée à un point matériel de masse m_P , décrit une trajectoire elliptique de centre O, de demi-grand axe a et de demi-petit axe b .

Sur l'**ANNEXE 1** à rendre obligatoirement avec la copie sont représentés : l'ellipse, les extrémités de son grand axe A et A', celles de son petit axe B et B', le vecteur vitesse $\vec{v}_{A'}$ de la planète en A' et F un des foyers de l'ellipse où se situe le Soleil.

On rappelle que $a^2 = b^2 + c^2$, avec $c = OF$.

B.2.1. Exprimer les vitesses v_A et v_B en fonction de a , b , c et $v_{A'}$. On pourra utiliser la conservation du moment cinétique de la planète.

B.2.2. Représenter les vecteurs vitesse $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_B$ sur l'**ANNEXE 1** en respectant les échelles indiquées sur cette annexe.

B.3. L'utilisation des données de Tycho Brahé a conduit Kepler à établir la relation :

$\frac{T^2}{a^3} = k$ avec k , une constante. Préciser la signification et l'unité dans le système international de chacune des grandeurs de cette relation.

B.4. D'après le texte, « Galilée découvre un grand principe ». Nommer et énoncer ce principe.

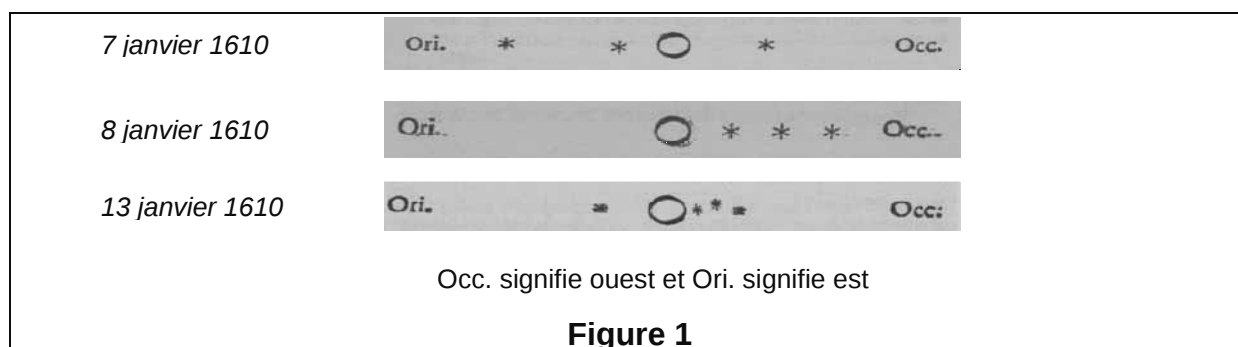
B.5. Galilée observe aussi le ciel avec la première lunette astronomique de l'histoire. En 1610, il découvre Io, Europe, Ganymède et Callisto, quatre satellites de Jupiter. Il relate ainsi ses observations dans un ouvrage, *Le messager des étoiles*, dans lequel il dessine également ce qu'il voit. Les croquis indiqués sur la **figure 1** représentent les observations de Galilée à trois dates différentes.

Les orbites des satellites de Jupiter appartiennent quasiment au plan de l'équateur de Jupiter et sont pratiquement circulaires.

B.5.1. Donner une raison possible permettant d'expliquer pourquoi les quatre satellites ne sont pas toujours vus en même temps par Galilée.

B.5.2. Quelle est la trajectoire des satellites de Jupiter vue par Galilée ?

B.5.3. Les découvertes de Galilée et de Kepler ont-elles permis de départager les théories rivales concernant le système géocentrique et le système héliocentrique ? Justifier.



C. La loi de la gravitation universelle

Le texte précise : « les premières vérifications soigneuses portèrent sur les satellites de Jupiter ». Nous allons nous intéresser dans cette partie, au mouvement du satellite Io, de masse M_I autour de Jupiter de masse M_J dans le référentiel galiléen d'origine le centre de Jupiter et d'axes dirigés vers trois étoiles « fixes ». Toutes les orbites étudiées sont considérées circulaires et on ne tient compte que du champ gravitationnel de Jupiter.

C.1. Vocabulaire

C.1.1. Que signifie le terme universel de « la loi de gravitation universelle » ?

C.1.2. Caractériser les référentiels galiléens en mécanique Newtonienne. Quel est le meilleur référentiel galiléen connu actuellement ?

C.1.3. Quels exemples de référentiels galiléens et de référentiels non galiléens pourriez-vous donner à de jeunes élèves ?

C.2. Action à distance

C.2.1. Énoncer les trois lois de Newton.

On note : $\vec{u}_{JI}$, un vecteur unitaire dirigé de J, le centre d'inertie de Jupiter, vers I, le centre d'inertie du satellite Io et R_{JI} , la distance séparant les centres d'inertie de Jupiter et de son satellite Io.

C.2.2. Représenter soigneusement, sans se préoccuper de l'échelle, sur un schéma : Jupiter, Io, le vecteur unitaire $\vec{u}_{JI}$ et la force $\vec{F}_{JI}$ exercée par l'astre sur son satellite.

C.2.3. Donner l'expression vectorielle de la force $\vec{F}_{JI}$.

C.2.4. Déterminer l'expression du vecteur accélération $\vec{a}_I$ du centre d'inertie I du satellite Io.

C.2.5. Montrer que le mouvement du satellite Io s'effectue à vitesse constante V_I . Exprimer V_I en fonction de G , M_J et R_{JI} .

C.2.6. Déterminer l'expression de la période de révolution T du satellite Io autour de Jupiter en fonction de G , M_J et R_{JI} . Calculer la valeur de cette période en l'exprimant dans le système international puis dans une unité plus adaptée.

C.2.7. En déduire l'expression de la constante k de la question B.3.

C.3. Champ gravitationnel

C.3.1. Le concept de champ existait-il à l'époque de Newton ? Expliquer.

C.3.2. On note $\vec{u}_{JM}$, un vecteur unitaire dirigé de J, le centre d'inertie de Jupiter, vers un point M de l'espace situé à une distance r supérieure au rayon de Jupiter R_J . Donner l'expression vectorielle du champ gravitationnel $\vec{G}_J$ de Jupiter au point M. En déduire l'expression de $\vec{G}_{J0}$, le champ gravitationnel en un point de la surface de Jupiter.

C.4. Chute des corps

La **figure 2** ci-dessous est réalisée sans souci d'échelle. Elle schématise la trajectoire du satellite Io autour de Jupiter. L'arc $\widehat{AC}$ représente le trajet réel suivi par le satellite pendant une seconde.

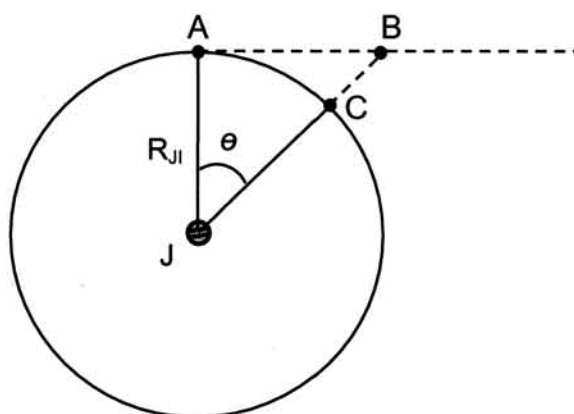


Figure 2

On considérera que le mouvement du satellite Io s'apparente pendant une seconde, à une chute dans le seul champ gravitationnel créé par Jupiter à l'altitude où se trouve Io. On supposera le champ gravitationnel constant pour la hauteur de chute BC et l'angle θ faible.

C.4.1. De quelle hauteur h , un objet ponctuel, de masse m , lancé au voisinage de la surface de Jupiter, avec une vitesse horizontale $\vec{V}_0$ tombe-t-il sous l'effet du champ gravitationnel créé par Jupiter après une seconde de chute ? Le référentiel d'étude sera supposé galiléen.

C.4.2. On montre que $BC \approx \frac{\widehat{AC}^2}{2R_J}$. Calculer BC et vérifier que : $\frac{R_J}{R_J} \approx \sqrt{\frac{h}{BC}}$ avec h la hauteur de chute en une seconde d'un objet à la surface de Jupiter.

C.4.3. La relation vérifiée dans la question précédente reste valable dans le cas du système Terre-Lune. En déduire la hauteur de chute de la Lune en une seconde à partir de la hauteur de chute en une seconde d'un objet à la surface de la Terre.

D. Vers un autre résultat

L'objet de cette partie est de reprendre le raisonnement effectué par Roemer en 1676 pour expliquer les retards et les avances du satellite Io par rapport aux prédictions des tables de Cassini.

La **figure 3** illustre les observations de Roemer. Le point O, appelé occultation, représente l'entrée de Io dans le cône d'ombre de Jupiter. Le point E, appelé émersion, représente la sortie de Io du cône d'ombre de Jupiter. Les points A, B, C et D correspondent à des positions particulières de la Terre.

Les observations de Roemer sont les suivantes :

- La durée entre deux occultations successives de Io est de 42,5 heures.
- La durée entre la première et la dix-huitième occultation de Io est de 722 h 25 min 42 s. Au début de la mesure, la Terre se trouve en A. Le déplacement de Jupiter autour du Soleil pendant cette durée sera négligé.

Dans un souci de cohérence de chiffres significatifs, on posera :

$$42,5 \text{ h} = 42 \text{ h } 30 \text{ min } 00 \text{ s.}$$

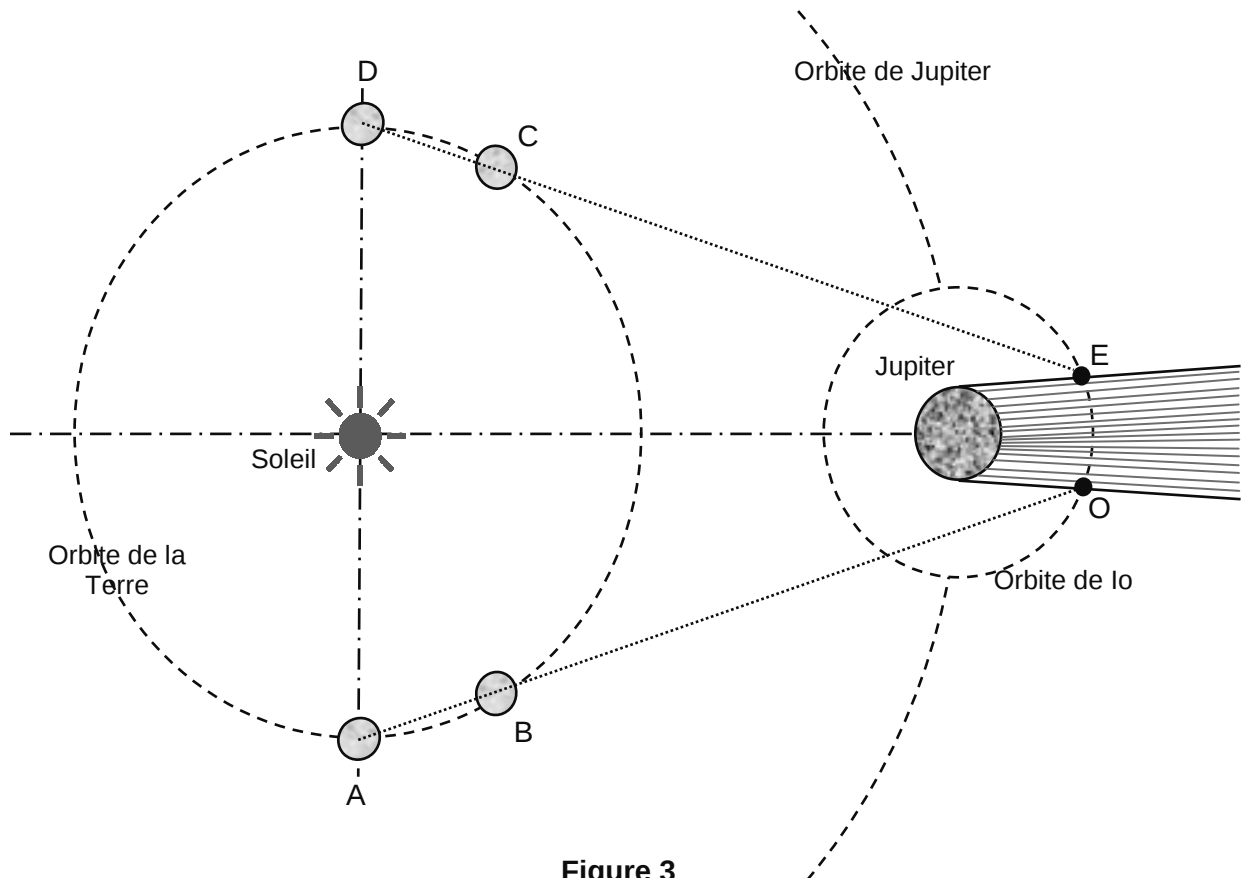


Figure 3

D.1. Si la Terre restait toujours en A, quelle serait la durée mesurée des dix-sept occultations successives ?

D.2. Sachant que la Terre est en B au début de la dix-huitième occultation, en déduire la durée mise par la lumière pour parcourir la distance AB.

D.3. La vitesse dans le vide de la lumière issue de Io, calculée à partir des observations de Roemer, varie selon les auteurs ; elle est voisine de $215\,000 \text{ km.s}^{-1}$. En supposant que la valeur du rayon de l'orbite terrestre est la seule source d'erreur, déterminer cette valeur utilisée à l'époque de Roemer.

D.4. Quelle est l'intéressante conclusion citée dans le texte à laquelle arriva Roemer ?

D.5. Quelle est la valeur actuelle de la vitesse de la lumière dans le vide ? Comment la mesure-t-on ?

EXERCICE II : MICROSCOPIE OPTIQUE

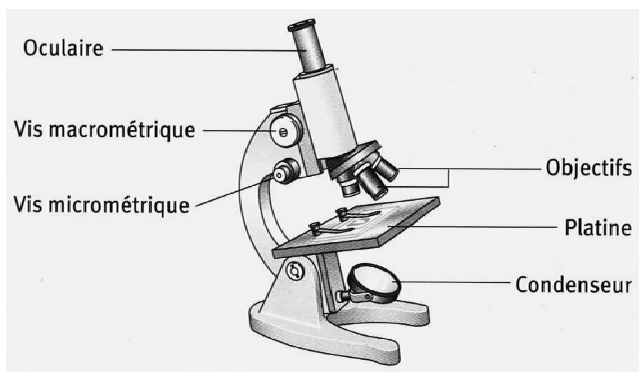
Cet exercice comporte quatre parties A, B, C et D dont les trois premières sont indépendantes.

Un microscope est un instrument d'optique destiné à observer des objets ou détails d'objets dont les dimensions sont de l'ordre du micromètre. Il est constitué de deux systèmes convergents : un objectif et un oculaire.

L'objectif est un système constitué de plusieurs lentilles assimilables à une seule lentille de courte distance focale de l'ordre du millimètre. L'oculaire est équivalent à une loupe de distance focale de l'ordre du centimètre.

La mise au point se fait en déplaçant l'ensemble « objectif-oculaire » par rapport à l'objet étudié à l'aide de la vis macrométrique pour un réglage grossier puis à l'aide de la vis micrométrique pour un réglage fin.

Le tableau ci-dessous renseigne sur quelques caractéristiques de l'objectif et de l'oculaire d'un microscope utilisé en travaux pratiques avec des élèves.



Objectif L_1	Distance focale $f'_1 = 16 \text{ mm}$
	Diamètre $D_1 = 9,0 \text{ mm}$
	Grandissement $ \gamma_1 = 10$
Oculaire L_2	Vergence $C_2 = +50 \text{ } \delta$
	Grossissement $G_2 = 12,5$

A. Généralités en optique géométrique

A.1. Énoncer les conditions de Gauss et définir les termes de stigmatisme rigoureux et d'aplanétisme.

A.2. Décrire une méthode permettant de distinguer les lentilles convergentes des lentilles divergentes.

A.3. Caractériser une lentille mince et définir sa vergence.

A.4. Rappeler, sans démonstration, pour les lentilles minces, les formules de conjugaison et de grandissement linéaire de Descartes avec origine au centre optique.

A.5. Définir l'indice de réfraction d'un milieu. Donner les valeurs des indices de réfraction du vide n_{vide} , de l'air n_{air} et de deux autres milieux. Dans la pratique scolaire, quelle valeur retient-on pour n_{air} ? La valeur de n_{air} est-elle une constante ou bien dépend-elle de paramètre(s) que l'on précisera ?

A.6. Définir un milieu dispersif. Citer un exemple de milieu dispersif et une manifestation concrète de la dispersion de la lumière.

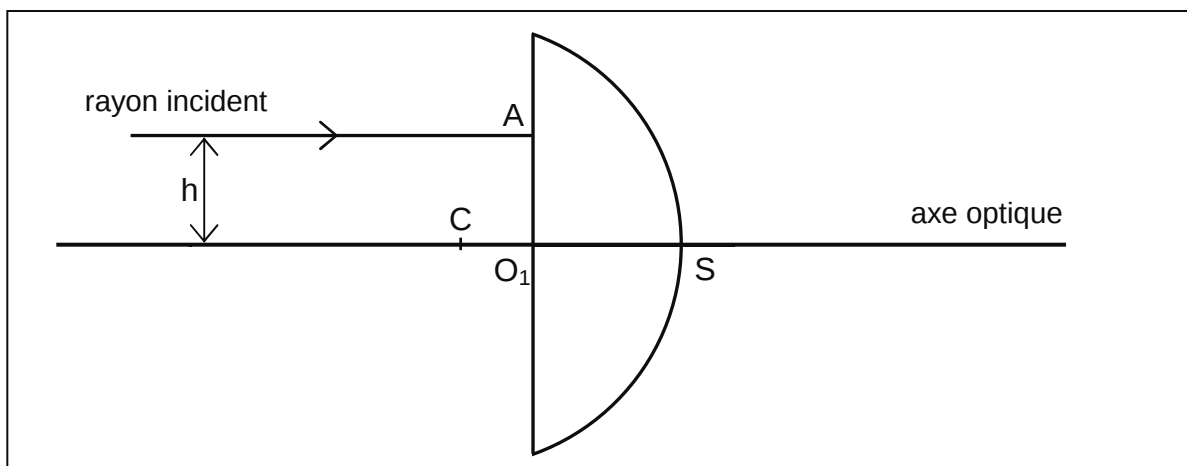
B. Étude de l'objectif du microscope

L'objectif du microscope utilisé par les élèves est assimilé à une lentille L_1 plan convexe en verre, d'indice de réfraction n . L'indice de l'air entourant la lentille est pris égal à 1,00.

Le dioptre d'entrée de la lentille L_1 est plan. Le dioptre de sortie est sphérique, de rayon $R = CS = 8,32$ mm avec C , le centre du dioptre sphérique et S , le point de concours du dioptre sphérique avec l'axe optique.

Le centre optique O_1 de la lentille est le point de concours du dioptre plan avec l'axe optique. L'épaisseur de la lentille, $e = O_1S = 1,35$ mm, est inférieure au rayon R du dioptre de sortie.

Un faisceau lumineux incident, assimilé à un rayon de lumière, arrive parallèlement à l'axe optique sur le dioptre plan en un point A . Ce rayon et l'axe optique sont séparés d'une distance $h = 1,00$ mm. Le schéma ci-dessous est réalisé sans souci d'échelle.



B.1. Le faisceau lumineux incident est monochromatique.

B.1.1. Reproduire sur la copie le schéma ci-dessus puis tracer sans souci d'échelle la marche d'un faisceau monochromatique incident traversant la lentille et réfracté au point B où le rayon arrive sur le dioptre sphérique. Faire figurer les angles d'incidence i et de réfraction r au point B .

B.1.2. Montrer que l'angle d'incidence i au point B s'écrit : $i = \sin^{-1}\left(\frac{h}{R}\right)$.

Exprimer l'angle de réfraction r en fonction de n , n_{air} , h et R .

B.1.3. Discuter suivant les valeurs de l'angle d'incidence i , les trajets possibles du rayon incident au point B pour un indice de réfraction moyen de valeur $n = 1,52$.

B.2. On considère que le faisceau lumineux incident est constitué de deux radiations de longueurs d'onde dans le vide $\lambda_1 = 450$ nm et $\lambda_2 = 650$ nm. Les indices de réfraction du verre correspondant aux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 sont respectivement $n_1 = 1,53$ et $n_2 = 1,51$.

B.2.1. Justifier la différence entre les valeurs des indices n_1 et n_2 .

B.2.2. Préciser les couleurs des radiations de longueurs d'onde λ_1 et λ_2 . Calculer les valeurs des angles de réfraction r_1 et r_2 respectifs. Qu'observe-t-on à la sortie de la lentille ? Quel type de défaut optique de la lentille étudiée est ainsi mis en évidence ?

B.2.3. L'objectif d'un microscope est souvent constitué d'une succession de lentilles accolées ayant des verres de pouvoirs dispersifs différents afin d'obtenir un objectif achromatique. Expliquer ce dernier terme.

B.2.4. Pour une valeur moyenne de l'indice de réfraction $n = 1,52$, déterminer le diamètre maximum $D_{\max}$ de la lentille permettant d'éviter le phénomène de réflexion totale. Ce phénomène peut-il se produire avec la lentille L_1 ?

B.3. On considère à nouveau que la lentille L_1 a un indice de réfraction moyen de valeur $n = 1,52$.

B.3.1. En utilisant le schéma réalisé à la question B.1.1., nommer le point d'intersection du rayon réfracté avec l'axe optique. Montrer que la distance L séparant le centre optique O_1 et ce point peut se mettre sous la forme :

$$L = R \times (\cos i - 1) + e + \frac{h}{\tan(r - i)}$$

B.3.2. Calculer la valeur de L pour $h = 1,00$ mm puis $h = 2,50$ mm. Quel type de défaut optique de la lentille est ainsi mis en évidence ?

B.3.3. Si la lentille est supposée mince et utilisée dans les conditions de Gauss, montrer, en faisant les approximations appropriées, que la distance L s'écrit :

$$L \approx \frac{R}{n-1}$$

En utilisant cette relation, discuter les conditions de stigmatisme d'une lentille mince.

Dans la suite, toute lentille mince sera supposée rigoureusement stigmatique quelle que soit la position de l'objet.

C. Étude de l'oculaire du microscope

L'oculaire du microscope étudié est assimilé à une lentille mince convergente L_2 de distance focale f'_2 étudiée a priori dans les conditions de Gauss.

C.1. Afin de déterminer la distance focale f'_2 de l'oculaire, un objet lumineux AB perpendiculaire à l'axe optique de la lentille L_2 est positionné à la graduation zéro sur un banc optique. L'écran fixe est placé à une distance D supérieure à $4f'_2$ de l'objet.

C.1.1 Montrer qu'il existe sur le banc optique, deux positions O_{2a} et O_{2b} du centre optique de la lentille pour lesquelles l'image $A'B'$ de l'objet AB est nette sur l'écran.

C.1.2. La distance séparant les deux positions O_{2a} et O_{2b} précédentes est notée d . Déterminer l'expression de f'_2 en fonction de d et D . En déduire la valeur de f'_2 sachant que $D = 20,0$ cm et $d = 15,5$ cm.

C.2. La lentille L_2 est maintenant utilisée comme une loupe.

C.2.1. Lorsque l'objet AB est placé à $1,5$ cm de la lentille L_2 , utilisée comme une loupe, son image est située à $6,0$ cm de L_2 . Sur l'**ANNEXE 2 à rendre obligatoirement avec la copie**, déterminer par un tracé, la position des foyers principaux objet et image de L_2 et positionner l'image $A'B'$. Retrouver la valeur de f'_2 à partir de la construction géométrique.

C.2.2. La puissance P d'une loupe et son grossissement G sont définis par les relations : $P = \frac{\alpha'}{AB}$ et $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ avec :

α' : l'angle sous lequel est vue l'image $A'B'$ donnée par la loupe.

α : le diamètre apparent de l'objet, c'est l'angle de vision directe à l'œil nu de l'objet placé à la distance $d_m = 25,0$ cm de l'œil.

Exprimer puis calculer la puissance P_2 et le grossissement G_2 de la lentille L_2 utilisée comme une loupe lorsque l'œil de l'observateur est placé au foyer image F'_2 de la lentille L_2 . On supposera que $\tan \alpha' \approx \alpha'$.

Afin d'obtenir un grossissement supérieur à celui d'une loupe, on utilise souvent un microscope.

D. Réalisation d'un microscope réduit

Cette partie est consacrée à l'étude d'un microscope réduit comprenant les deux lentilles minces convergentes et coaxiales étudiées précédemment, fonctionnant a priori dans les conditions de Gauss.

L'objectif L_1 est une lentille mince de distance focale $f_1 = 16$ mm et de diamètre $D_1 = 9,0$ mm. L'intervalle optique Δ représente la distance entre le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire, il est fixe et a pour valeur normalisée $\Delta = 16,0$ cm. L'oculaire L_2 est une lentille mince de vergence $C_2 = +50 \delta$.

D.1. L'observateur a une vision normale, il regarde à travers le microscope un objet AB sans accommoder, l'image définitive A'B' est donc située à l'infini.

D.1.1. Dans ces conditions, où doit être située l'image intermédiaire A_1B_1 ?

D.1.2. Déterminer la valeur de la grandeur algébrique $\overline{O_1A}$ permettant de positionner l'objet AB par rapport à l'objectif L_1 .

D.1.3. Sur l'**ANNEXE 3 à rendre obligatoirement avec la copie**, tracer à travers le microscope, la marche de deux rayons particuliers issus du point B de l'objet AB afin de placer l'image intermédiaire A_1B_1 et de repérer l'image définitive A'B'.

D.2. L'observateur dont l'œil est placé au foyer principal image F'_2 de l'oculaire, accommode à présent au maximum : l'image définitive est située à $d_m = 25,0$ cm de l'œil, d_m étant la distance minimale de vision distincte.

D.2.1. Déterminer la position de l'image intermédiaire A_1B_1 par rapport au foyer objet de l'oculaire L_2 .

D.2.2. Déterminer la valeur de la grandeur algébrique $\overline{O_1A}$ permettant de situer la nouvelle position de l'objet AB par rapport à l'objectif L_1 .

D.2.3. En déduire la latitude de mise au point, c'est-à-dire la variation de la distance séparant l'objet AB de l'objectif L_1 , compatible avec une vision nette par l'observateur de l'image définitive A'B'. Expliquer la présence d'une vis micrométrique sur le microscope.

D.3. Le grossissement G du microscope est défini par la relation : $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$

où α désigne le diamètre apparent de l'objet à l'œil nu à $d_m = 25$ cm et α' , l'angle sous lequel est vue l'image définitive formée à l'infini à travers le microscope.

D.3.1. Exprimer la valeur absolue du grandissement de l'objectif notée $|\gamma_1|$ en fonction de Δ et f_1 . Calculer la valeur numérique de $|\gamma_1|$.

D.3.2. Le grandissement de l'objectif et le grossissement de l'oculaire sont généralement gravés sur les montures de ces éléments. Exprimer puis calculer le grossissement du microscope en fonction de la valeur absolue $|\gamma_1|$ du grandissement de l'objectif et du grossissement G_2 de l'oculaire.

D.4. L'observateur place son œil dans le plan du cercle oculaire du microscope.

D.4.1. Donner la définition du cercle oculaire.

D.4.2. Déterminer la position du cercle oculaire par rapport à l'oculaire. Quel est l'intérêt de connaître ce paramètre ?

Modèle ENSD ©NEOPTÉC				
Nom : (Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)				
Prénom :				
N° d'inscription :	Né(e) le : / /			
(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)				
	Concours	Section/Option	Epreuve	Matière

EFE MSP 2

ANNEXES 1-2-3
à rendre avec la copie

ANNEXE 1 à rendre obligatoirement avec la copie

Échelles :

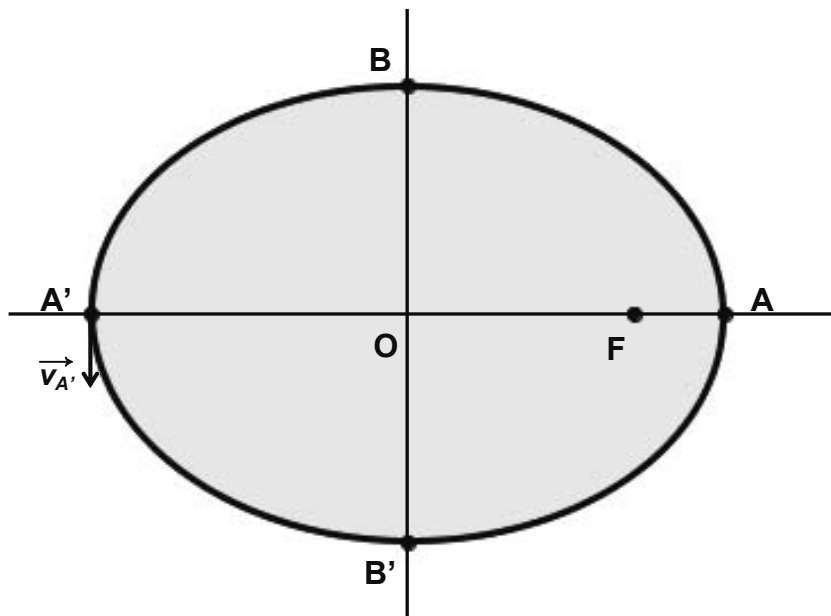
Le vecteur $\vec{v}_{A'}$ a pour longueur 1,0 cm.

La distance AA' vaut 8,4 cm sur la figure.

$OB = 3,0$ cm ; $OF = 3,0$ cm

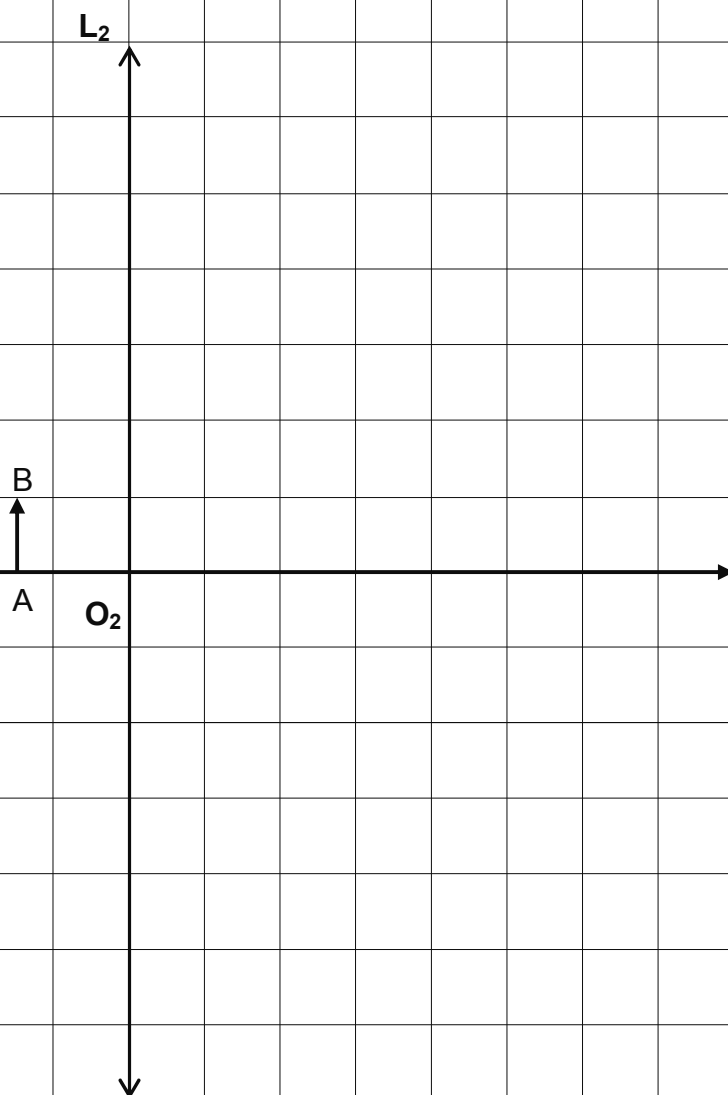
Données :

$AA' = 2a$; $OB = b$; $OF = c$



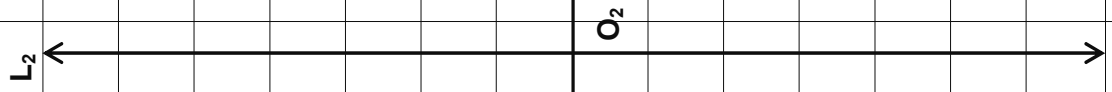
ANNEXE 2 à rendre obligatoirement avec la copie

Échelle : 1 carreau représente 1,0 cm



ANNEXE 3 à rendre obligatoirement avec la copie

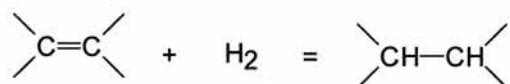
Échelle horizontale : 1 carreau représente 1,0 cm



CHIMIE

HYDROGENATION DES ALCENES PAR CATALYSE HETEROGENE REDUCTION DE LA FONCTION ALDEHYDE DE LA VANILLINE PAR NABH4

Les doubles liaisons C=C réagissent à température ambiante (25°C) sous pression atmosphérique (1 bar) avec le dihydrogène gazeux H_{2(g)} en présence d'un catalyseur métallique pour donner des composés saturés :

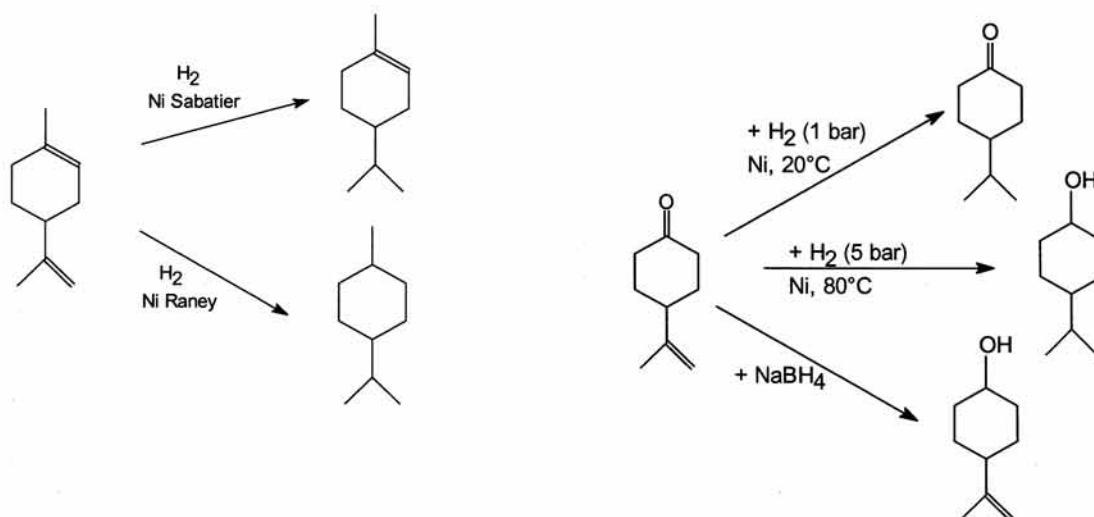


Selon la nature de l'alcène, l'hydrogénation peut s'effectuer en phase gazeuse ou en phase solvant.

Un métal très utilisé est le nickel divisé : il peut être préparé selon la méthode de Raney ou selon la méthode de Sabatier. Le nickel de Raney (1926), très divisé et poreux, est plus actif que le nickel de Sabatier (1912), moins divisé et poreux. Le nickel de Raney permet donc l'hydrogénation de doubles liaisons C=C encombrées. Par exemple pour le limonène présent dans l'écorce des agrumes.

L'hydrogénation catalytique des doubles liaisons C=C est utilisée dans la fabrication des margarines et beurres allégés (saturation des huiles pour former des graisses saturées).

Les doubles liaisons C=O réagissent aussi avec le dihydrogène gazeux en présence de catalyseur métallique mais les conditions de réaction sont plus sévères que pour l'hydrogénation des doubles liaisons C=C (température entre 80 et 200°C et pression de 5 à 30 bar). Pour la réduction des fonctions carbonyles C=O, on préfère utiliser des hydrures H⁻ (borohydrure de sodium NaBH₄).



Méthode de Raney et de Sabatier

Le premier exercice étudie les éléments hydrogène et nickel (atomistique et cristallographie), le deuxième exercice s'intéresse aux alcènes (chimie organique), le troisième exercice à la méthode de préparation du nickel de Sabatier (thermodynamique), le quatrième exercice à la méthode de préparation du nickel de Raney (chimie des solutions), le cinquième exercice à l'hydrogénation des alcènes

(cinétique) et le sixième exercice à la réaction de réduction de la vanilline par le borohydrure de sodium (chimie organique).

Tous les exercices sont indépendants.

EXERCICE 1 : LES ELEMENTS NICKEL ET HYDROGENE

Données : Numéro atomique de H ($Z = 1$) de B ($Z = 5$)

Un atome d'hydrogène peut perdre un électron pour former l'ion hydronium H^+ ou gagner un électron pour former l'ion hydrure H^- .

- 1.1. Donner le numéro atomique des ions H^+ et H^- .
- 1.2. Donner un autre nom pour l'ion hydronium H^+ .
- 1.3. Qu'est-ce qu'un isotope ? Donner le nom d'un isotope de l'hydrogène.

L'ion tétrahydruoborate BH_4^- peut être considéré comme un donneur d'ion hydrure H^- en chimie organique. D'autres espèces peuvent être considérées comme des donneurs d'ions hydronium H^+ .

- 1.4. Donner la configuration électronique fondamentale de l'atome de bore B.
- 1.5. Représenter un schéma de Lewis pour l'ion tétrahydruoborate .
- 1.6. Proposer une géométrie pour l'ion tétrahydruoborate BH_4^- .
- 1.7. Comment appelle-t-on les espèces capables de donner un ion hydronium H^+ ?

Le dihydrogène H_2 est un gaz à 25°C et sous 1 bar.

- 1.8. Comment prépare-t-on industriellement le gaz dihydrogène ?
- 1.9. Comment prépare-t-on au laboratoire le gaz dihydrogène ? Comment caractériser la formation de dihydrogène au laboratoire ?
- 1.10. Citer une application industrielle de ce gaz.

Le nickel métal est décrit en cristallographie par un réseau cubique à faces centrées avec un paramètre de maille $a = 351$ pm. L'aluminium est aussi décrit par un réseau cubique à faces centrées.

- 1.11. Représenter une maille cubique conventionnelle du nickel en utilisant un modèle éclaté (les atomes de métal seront représentés par de gros points).
- 1.12. Représenter une face du cube précédent en assimilant les atomes de nickel à des sphères de rayon métallique R_{Ni} ? On indiquera clairement le contact des atomes.
- 1.13. Donner la relation entre le paramètre de maille a et le rayon métallique R_{Ni} puis calculer R_{Ni} .
- 1.14. Le rayon métallique de l'aluminium est $R_{Al} = 143$ pm. Prédire à quelle famille d'alliage appartient le nickel de Raney qui est un alliage Ni/Al.

EXERCICE 2 : LES ALCENES

On donne ci-dessous les propriétés physiques de quelques alcènes $C_nH_{2n+1}-CH=CH_2$.

alcène	Température d'ébullition sous 1 bar	Densité à 20°C
Éthène	- 104°C	0,97
Propène	- 48°C	1,48
But-1-ène	- 6°C	1,93
Pent-1-ène	30°C	0,64
Hex-1-ène	63°C	0,67
Hept-1-ène	95°C	0,70

2.1. Proposer une explication pour l'évolution de la température d'ébullition des alcènes en fonction de n.

2.2. Proposer une explication pour l'anomalie d'évolution de la densité située entre le but-1-ène et le pent-1-ène.

2.3. L'énergie de liaison à 25°C de la liaison simple C-C vaut $E_{C-C} = 346 \text{ kJ.mol}^{-1}$ et celle de la liaison double C=C vaut $E_{C=C} = 602 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Pourquoi a-t-on $E_{C=C} \neq 2 E_{C-C}$?

2.4. Les enthalpies standard d'hydrogénation à 25°C des butènes sont données ci-dessous :

butène	but-1-ène	(E) but-2-ène	(Z) but-2-ène
enthalpies standard d'hydrogénation en kJ.mol^{-1}	- 125,7	- 114,6	- 118,9

2.4.1. Donner le nom d'un autre isomère du butène (non cité dans le tableau).

2.4.2. Identifier les relations d'isomérisie entre les butènes cités dans le tableau.

2.4.3. Comparer la polarité du (E) but-2-ène et du (Z) but-2-ène. Expliciter votre raisonnement.

2.4.4. Que représente physiquement l'enthalpie standard d'hydrogénation ?

2.4.5. Pourquoi trouve-t-on des valeurs différentes pour les isomères du butène ?

2.5. Donner un test caractéristique de la liaison C=C.

EXERCICE 3 : LE NICKEL DE SABATIER

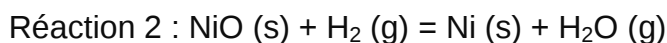
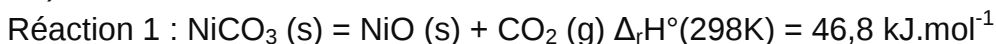
Données :

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

Grandeurs thermodynamiques à 298 K

	NiO (s)	H ₂ (g)	Ni (s)	H ₂ O (g)
Enthalpie standard de réaction en kJ.mol^{-1}	- 239,7	0	0	- 241,2
Entropie molaire standard en $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$	38,0	130,6	29,9	187,9

Le nickel de Sabatier est obtenu en deux étapes : on chauffe le carbonate de nickel (réaction 1) puis on réduit l'oxyde de nickel par le dihydrogène gazeux à 573 K (réaction 2).



- 3.1. Quelle est l'influence d'une augmentation de la température à pression constante sur l'équilibre de la réaction 1 ? Un raisonnement qualitatif est attendu.
- 3.2. Quelle est l'influence d'une augmentation de la pression à température constante sur l'équilibre de la réaction 1 ? Un raisonnement qualitatif est attendu.
- 3.3. Quelle est l'influence d'un ajout d'oxyde de nickel à température et pression constante sur l'équilibre de la réaction 1 ? Un raisonnement qualitatif est attendu.
- 3.4. Calculer la valeur de l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^\circ(298 \text{ K})$ à 298 K pour la réaction 2.
- 3.5. Calculer la valeur de l'entropie standard de réaction $\Delta_r S^\circ(298 \text{ K})$ à 298 K pour la réaction 2.
- 3.6. Rappeler l'hypothèse d'Ellingham puis utiliser cette hypothèse pour calculer la valeur de l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^\circ(573 \text{ K})$ et la valeur de l'entropie standard de réaction $\Delta_r S^\circ(573 \text{ K})$ à 573 K.
- 3.7. Calculer la valeur de l'enthalpie libre standard $\Delta_r G^\circ(573 \text{ K})$ à 573 K pour la réaction 2. En déduire la valeur de la constante d'équilibre $K^\circ(573 \text{ K})$ pour la réaction 2.
- 3.8. Déterminer les valeurs de pressions partielles en dihydrogène $\text{H}_{2(\text{g})}$ et eau $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ à l'équilibre (réaction 2) à 573 K pour une pression totale de 1,5 bar.

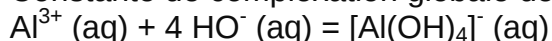
EXERCICE 4 : LE NICKEL DE RANEY

Données :

Produit de solubilité de $\text{Al}(\text{OH})_3$ solide à 25°C

$$pK_s = 32,3$$

Constante de complexation globale de $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ à 25°C :



$$\log \beta_4 = 33,4$$

Constante d'autoprotolyse de l'eau à 25°C

$$K_e = 10^{-14}$$

Potentieux rédox à 25°C

$$E^\circ (\text{H}^+ (\text{aq}) / \text{H}_2 (\text{g})) = 0 \text{ V}$$

$$E^\circ (\text{O}_2 (\text{g}) / \text{H}_2\text{O} (\text{l})) = 1,23 \text{ V}$$

$$RT \ln 10 / F = 0,06 \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Le nickel de Raney est obtenu par action de la soude concentrée (pour avoir $\text{pH} > 12$) sur un alliage nickel-aluminium de composition massique 50-50.

On donne en annexe 1 le diagramme E-pH à 25°C de l'élément nickel pour une concentration en espèces dissoutes $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. Il a été tracé en considérant les espèces $\text{Ni}_{(\text{s})}$, $\text{Ni}_2\text{O}_{3(\text{s})}$, $\text{NiO}_{2(\text{s})}$, $\text{Ni}(\text{OH})_{2(\text{s})}$ et $\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})}$.

- 4.1. Déterminer le degré d'oxydation du nickel dans les espèces citées ci-dessus puis attribuer chaque espèce à une lettre du diagramme (A à D). Ni est déjà placé.
- 4.2. Écrire la demi équation rédox puis la loi de Nernst pour le couple de l'eau $\text{H}^+_{(\text{aq})} / \text{H}_{2(\text{g})}$.
- 4.3. Écrire la demi équation rédox puis la loi de Nernst pour le couple de l'eau $\text{O}_{2(\text{g})} / \text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$.

4.4. En déduire les équations des droites frontières relatives aux couples de l'eau. On prendra $p(\text{O}_2) = p(\text{H}_2) = 1 \text{ bar}$.

4.5. Écrire la demi équation rédox relative au couple $\text{Ni}(\text{OH})_{2(s)}/\text{Ni}_{(s)}$ puis l'équation de Nernst relative à ce couple. Déterminer le coefficient directeur de la droite frontière puis une méthode de tracé rapide pour les droites frontières de l'eau à partir du diagramme E-pH du nickel.

4.6. On acidifie une solution contenant l'espèce B. Que se passe-t-il ? (aucune équation bilan n'est demandée).

On donne en annexe 1 le diagramme E-pH à 25°C de l'élément aluminium pour une concentration en espèces dissoutes $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. Il a été tracé en considérant les espèces $\text{Al}_{(s)}$, $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$, $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-_{(aq)}$ et $\text{Al}^{3+}_{(aq)}$.

4.7. Écrire l'équation de la réaction de formation du précipité $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ à partir des espèces de l'aluminium citées ci-dessus.

4.8. Écrire l'équation de la réaction de dissolution du précipité $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ à partir des espèces de l'aluminium citées ci-dessus.

4.9. Montrer que la constante d'équilibre de la réaction de dissolution peut s'exprimer en fonction de la constante de solubilité K_s de $\text{Al}(\text{OH})_3$ et de la constante de complexation globale β_4 de $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$. Calculer sa valeur numérique.

4.10. Calculer le pH de début de précipitation pour une solution d'ions aluminium $\text{Al}^{3+}_{(aq)}$ de concentration molaire $c_0 = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. C'est l'équation de la droite frontière entre $\text{Al}^{3+}_{(aq)}$ et $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ du diagramme E-pH.

4.11. Calculer le pH de fin de dissolution du précipité pour une solution d'ions aluminium $\text{Al}^{3+}_{(aq)}$ de concentration molaire $c_0 = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. C'est l'équation de la droite frontière entre $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ et $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-_{(aq)}$ du diagramme E-pH.

4.12. A partir des diagrammes E-pH de l'annexe 1, expliquer la méthode de synthèse du nickel de Raney.

4.13. Le nickel de Raney est conservé dans l'eau car il est pyrophorique quand il est sec. Que signifie pyrophorique ?

EXERCICE 5 : HYDROGENATION DES ALCENES

L'hydrogénation d'un alcène $\text{A}_{(g)}$ par le dihydrogène $\text{H}_{2(g)}$ est réalisée dans une enceinte fermée de volume V_0 à $T_0 = 800 \text{ K}$ à partir d'un mélange équimolaire d'alcène et de dihydrogène. On définit la vitesse de la réaction v de la manière suivante :

$$\text{A}_{(g)} + \text{H}_{2(g)} = \text{AH}_{2(g)}$$

$$v = -\frac{dp(\text{H}_2)}{dt} = -\frac{dp(\text{A})}{dt} = \frac{dp(\text{AH}_2)}{dt} \text{ où } p \text{ est la pression partielle du gaz.}$$

Si on considère que la réaction possède un ordre, la vitesse de réaction peut s'écrire avec a (ordre partiel de A), b (ordre partiel de H_2) et k la constante de vitesse :

$$v = k(T) \cdot p^a(\text{A}) \cdot p^b(\text{H}_2)$$

On mesure l'évolution de la pression partielle de dihydrogène $p(\text{H}_2)$ en fonction du temps. Les résultats sont les suivants :

t en s	0	100	180	300	510	800	2000
p (H ₂) en bar	1,0	0,90	0,83	0,75	0,64	0,53	0,31

5.1. En utilisant l'hypothèse des gaz parfaits, donner la relation entre la pression partielle p d'un gaz, n sa quantité de matière, T_0 et V_0 la température et le volume du réacteur et R la constante des gaz parfaits.

5.2. Donner la relation entre $p(A)$ et $p(H_2)$ à tout instant t . En déduire une équation différentielle vérifiée par $p(H_2)$.

5.3. A partir des différentes représentations des résultats expérimentaux proposées en annexe 2, déterminer l'ordre global ($a + b$) de la réaction.

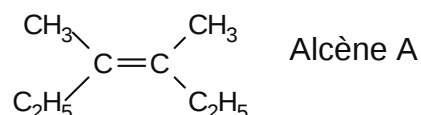
5.4. On a déterminé les temps de demi réaction pour différentes hydrogénations de A dans une enceinte fermée de volume V_0 à $T_0 = 800$ K en présence d'un excès de dihydrogène.

$p(A)$ en bar à $t = 0$	1,5	1,0	0,5
Temps de demi réaction en s	126	126	126

A partir de ces données, déterminer l'ordre partiel a de l'alcène puis l'ordre partiel b du dihydrogène.

5.5. Déterminer l'unité puis la valeur de la constante de vitesse k (800 K) à 800 K.

On considère l'hydrogénation de l'alcène A. Cette hydrogénation donne H_2A .



5.6. Donner le nom de l'alcène A.

5.7. Combien de stéréoisomères possède H_2A ? Les représenter en Newman en indiquant la configuration des carbones asymétriques éventuels selon la règle de Cahn, Ingold et Prelog. Identifier les relations d'isométrie entre ces composés.

L'hydrogénation catalytique de l'alcène A précédé par le nickel de Raney donne un produit majoritaire.

5.8. Rappeler la définition d'un catalyseur.

5.9. Donner la définition de la catalyse homogène et hétérogène.

5.10. L'annexe 3 propose un mécanisme pour l'hydrogénation de l'éthène. Donner le nom de chaque étape.

5.11. A partir de l'annexe 3, proposer une explication de la présence du produit majoritaire pour l'hydrogénation catalytique de l'alcène A par le nickel de Raney. Identifier ce produit.

D'autres métaux peuvent catalyser l'hydrogénation des alcènes : le palladium, le platine...

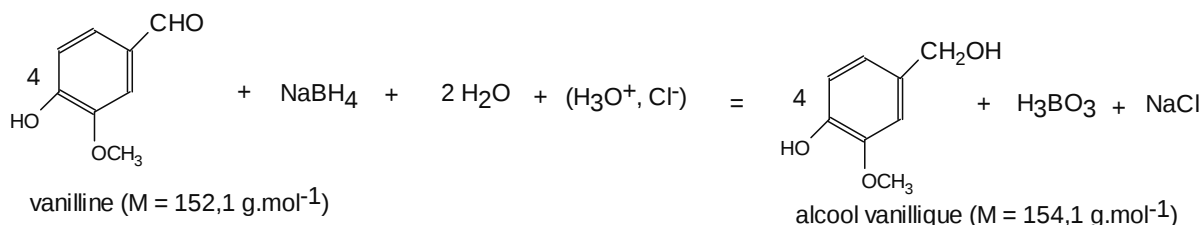
5.12. Que signifient les écritures Pd/C , $Pd/CaCO_3$ et $Pd/BaSO_4$ pour le catalyseur ?

5.13. Quelle est l'espèce catalytique pour le catalyseur de Adams PtO_2 .

5.14. Quel est le rôle de la quinoléine dans le catalyseur de Lindlar $Pd/CaCO_3$, quinoléine ? Citer un exemple d'utilisation de ce catalyseur.

EXERCICE 6 : REDUCTION DE LA FONCTION ALDEHYDE DE LA VANILLINE

La vanilline ou 4-hydroxy-3-méthoxybenzaldéhyde est le constituant essentiel de l'arôme de vanille. Sa fonction aldéhyde peut être réduite par le borohydrure de sodium NaBH_4 dans le méthanol et on obtient ainsi l'alcool vanillique. La réaction de réduction s'écrit :



Le borohydrure de sodium peut être considéré comme un donneur d'ion hydrure H^- : une mole de NaBH_4 donne 4 moles d'ions hydrure.

Le protocole est le suivant :

Dans un ballon bicol muni d'un réfrigérant à air, introduire $m_{\text{éch}} = 3,00 \text{ g}$ de vanilline puis 25 mL de méthanol et dissoudre le solide par agitation mécanique. Refroidir le ballon à 0°C à l'aide d'un bain glace/eau puis ajouter par petites portions $m_{\text{réd}} = 0,90 \text{ g}$ de borohydrure de sodium NaBH_4 . Maintenir sous agitation pendant 30 minutes à température ambiante.

Ajouter 10 mL d'une solution saturée de chlorure de sodium et 10 mL d'acide chlorhydrique 0,1 mol. L⁻¹. Chauffer légèrement au bain-marie à 40-50°C pendant 5 minutes. Procéder à une extraction avec le contenu du ballon et 3 fois 20 mL de diéthyldéther. Réunir les phases organiques dans un erlenmeyer et les laver avec 10 mL d'une solution d'hydrogénocarbonate de sodium NaHCO₃. Sécher la phase organique et éliminer le diéthyldéther.

On donne quelques caractéristiques des produits utilisés lors de la manipulation :

	T _{fusion} *	T _{ébullition} *	densité à 20°C	Masse molaire	autres
Vanilline	80-81°C	285°C	1,06	152,1 g.mol ⁻¹	Xn
Alcool vanillique	113°C	312°C	1,23	154,1 g.mol ⁻¹	Xi
Borohydrure de sodium	400°C	-	1,07	37,8 g.mol ⁻¹	T et F
diéthyléther	- 116°C	34,5°C	0,71	74,1 g.mol ⁻¹	F ⁺ et Xn

*sous 1 bar

- 6.1. Calculer les quantités de matière n (aldéhyde) et $n(\text{H}^-)$. Conclure.
- 6.2. Lors d'une manipulation, on a obtenu $m_{\text{produit}} = 2,2 \text{ g}$ d'alcool vanillique brut. Calculer le rendement de la réaction.
- 6.3. Que signifient les symboles X_n , X_i , T , F et F^+ ?
- 6.4. Qu'est-ce qu'un réfrigérant à air ?
- 6.5. Citer le matériel nécessaire à l'extraction et au lavage. La phase organique est-elle au dessus ou en dessous de la phase aqueuse ? Justifier votre réponse.
- 6.6. Comment sécher la phase organique ?

- 6.7. Comment éliminer le diéthyléther ?
- 6.8. Quel est l'intérêt de l'ajout de l'acide chlorhydrique ? On donne les potentiels rédox suivants : $E^\circ (H^+ / H_2) = 0 \text{ V}$ et $E^\circ (H_2 / H^-) = -2 \text{ V}$.
- 6.9. Calculer le pH de la solution d'acide chlorhydrique de concentration molaire $0,1 \text{ mol. L}^{-1}$.
- 6.10. Quel est l'intérêt de la solution saturée de chlorure de sodium ?
- 6.11. Quel est l'intérêt du lavage ? Qu'observe-t-on lors de ce lavage ?

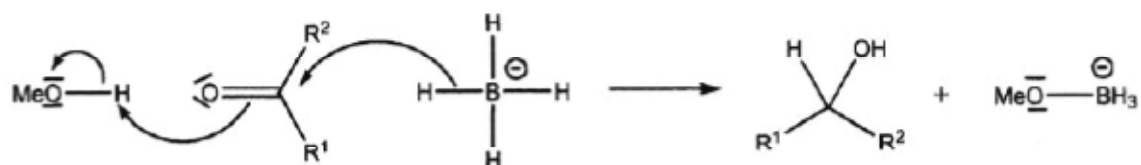
L'alcool vanillique brut peut être purifié par recristallisation dans l'éthanoate d'éthyle.

- 6.12. Expliquer le principe d'une recristallisation.
- 6.13. Citer le matériel nécessaire pour une recristallisation.
- 6.14. Comment peut-on vérifier l'efficacité d'une recristallisation ?

On donne en annexe 4 le chromatogramme d'une CCM obtenu avec trois dépôts sur une plaque recouverte de gel de silice (avec indicateur de fluorescence). La plaque a été déposée dans une cuve contenant un mélange de cyclohexane/éthanoate d'éthyle en proportion volumique 50/50 puis a été révélée sous UV.

- 6.15. Que signifie le sigle CCM ?
- 6.16. Qu'est ce que la fluorescence ?
- 6.17. Donner la formule chimique de la silice.
- 6.18. Quel nom donne-t-on au mélange de solvant ici ?
- 6.19. Quel est le nom du phénomène physique à l'origine de la montée du mélange solvant sur la plaque ?
- 6.20. Identifier le produit contenu dans le dépôt A puis celui dans le dépôt C. Proposer une explication pour les positions relatives de ces produits sur le chromatogramme.
- 6.21. Déduire à partir du chromatogramme du dépôt B si la réaction est terminée.
- 6.22. Définir la grandeur notée R_f . Déterminer cette grandeur pour la vanilline et l'alcool vanillique.
- 6.23. Comment évolue la grandeur R_f quand on augmente la proportion d'éthanoate d'éthyle dans le mélange de solvant ?

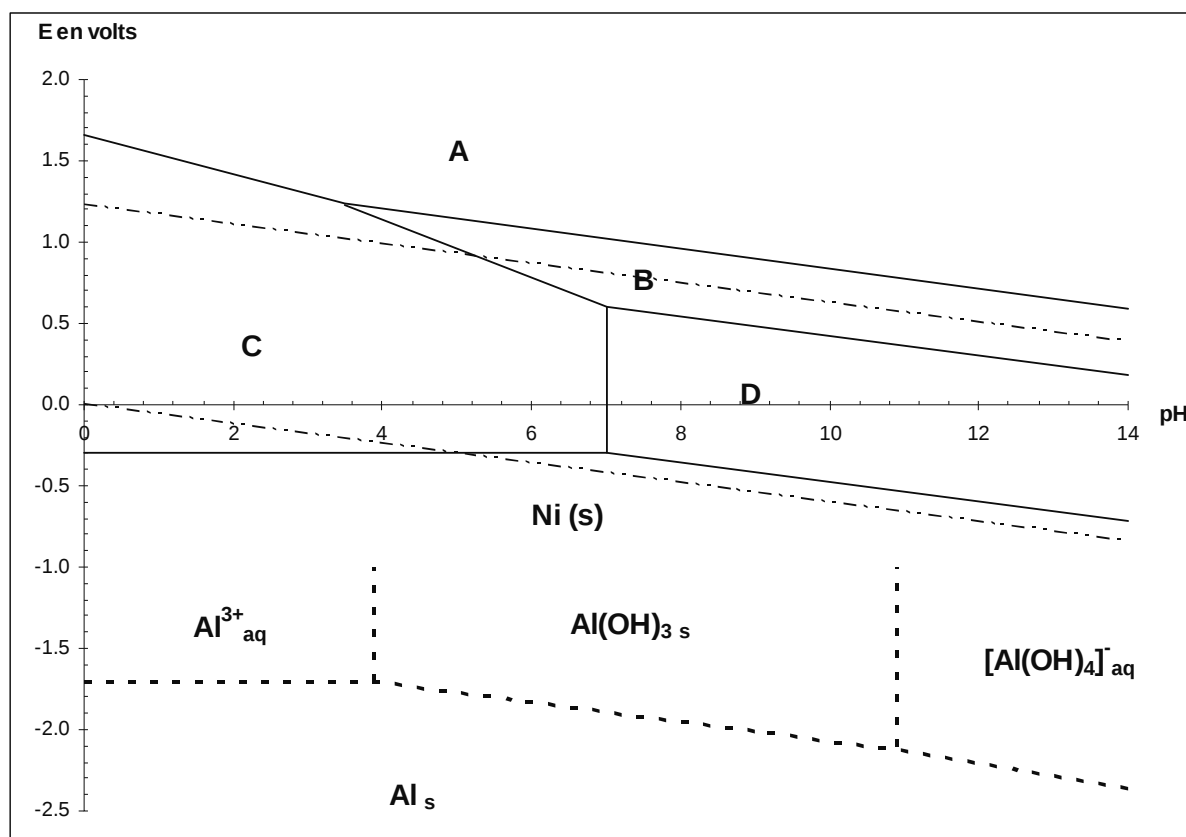
On propose ci-dessous le début du mécanisme de la réduction par NaBH_4 .



- 6.24. Quel nom peut-on donner à cette étape : addition, substitution, élimination ? électrophile, nucléophile, radicalaire ?
- 6.25. Citer un test caractéristique de la fonction aldéhyde puis de la fonction alcool.

ANNEXE 1

Diagrammes E - pH des éléments aluminium et nickel à 25°C

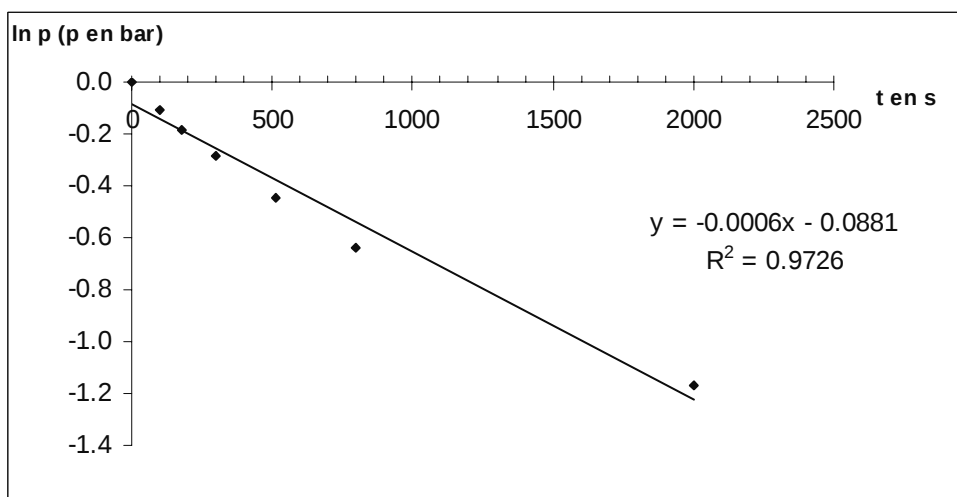
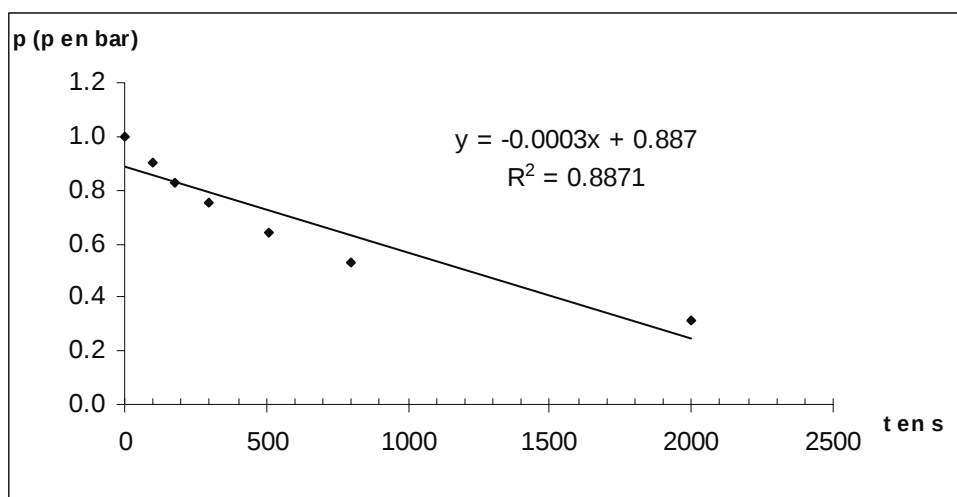


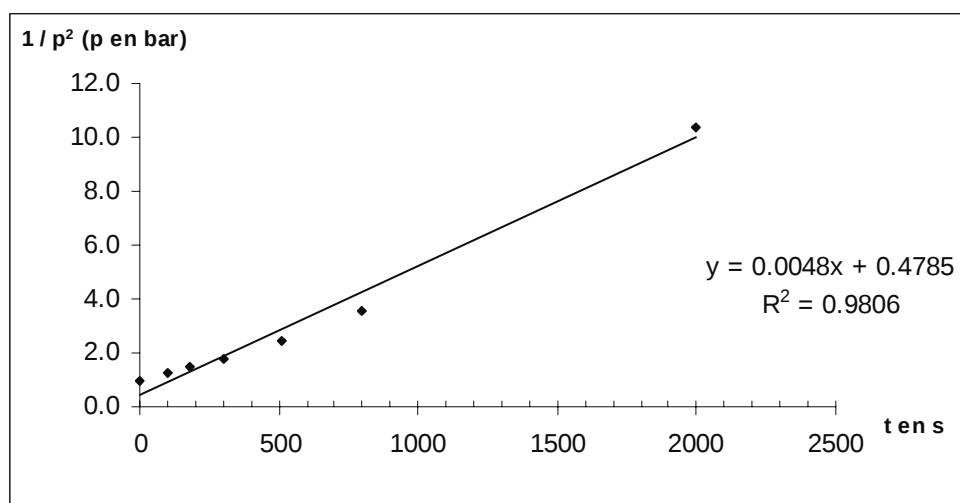
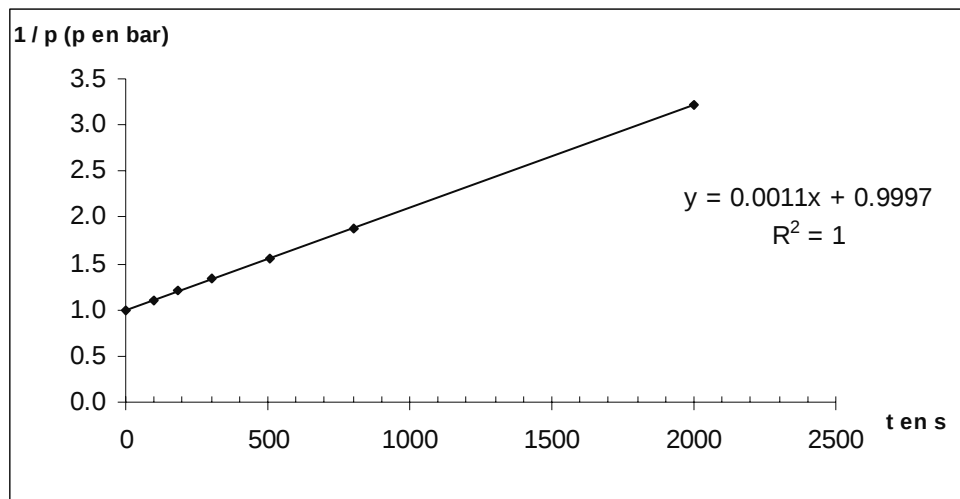
ANNEXE 2

Différentes représentations des résultats expérimentaux du tableau de données ci-dessous

t en s	0	100	180	300	510	800	2000
p (H ₂) en bar	1,0	0,90	0,83	0,75	0,64	0,53	0,31

Pour chaque représentation, une régression linéaire a été effectuée : la droite a été tracée et son équation ainsi que le coefficient de corrélation donnés.

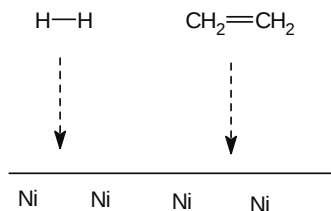




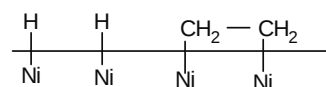
ANNEXE 3

Mécanisme de l'hydrogénation catalytique pour l'éthène

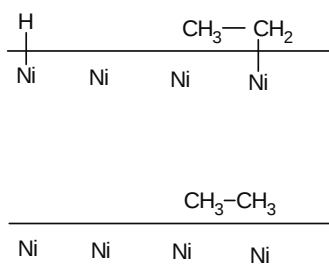
étape 1



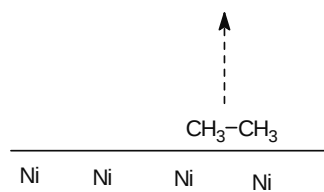
étape 2



étape 3 et 4

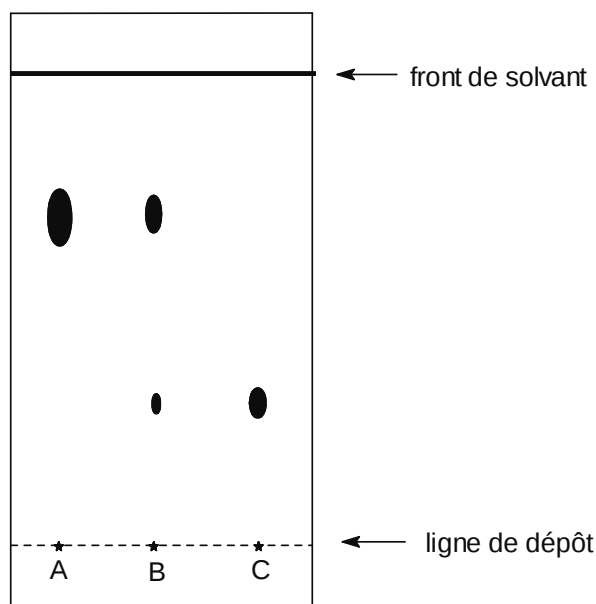


étape 5



ANNEXE 4

Chromatogramme de la CCM



A : prélèvement du milieu réactionnel avant ajout de NaBH_4

B : prélèvement du milieu réactionnel après ajout de NaBH_4 et avant ajout de l'acide chlorhydrique

C : solution du produit de réaction après recristallisation