

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2017

—

**COMPOSITION DE PHYSIQUE-CHIMIE**

(Classes de terminale S)

Durée : 5 heures

—

*L'usage de la calculatrice est autorisé*

**Consignes aux candidats**

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

Concours / Examen : CGL

Section/S spécialité/Série : PHYSI

Epreuve : 00101

Matière : PHCH

Session : 2017

# Qui s'y frotte, s'y...

Le candidat est invité à se référer régulièrement à l'annexe en fin d'énoncé. Celle-ci regroupe des données utiles à la résolution de certaines questions.

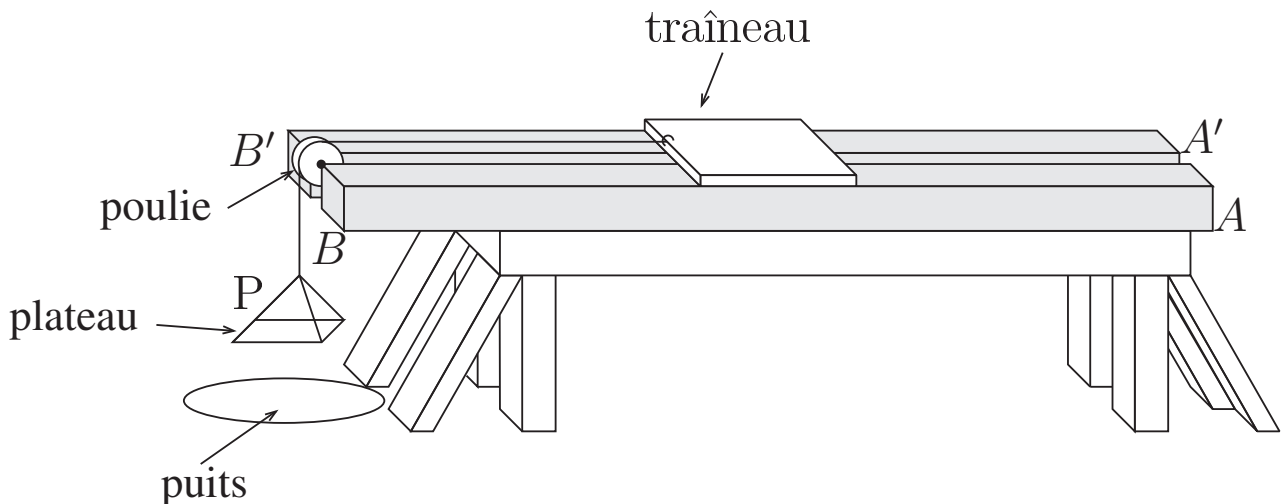
Si les parties II, III et IV sont indépendantes, les mesures qui y sont présentées font référence à la partie I.

## Partie I – Coulomb et les lois du frottement solide

### I.A Coulomb et le frottement statique

En 1781, Charles-Augustin Coulomb reçut le prix de l'Académie des sciences pour ses travaux expérimentaux sur les lois du frottement solide. Le compte rendu de ces recherches très rigoureuses constitue un impressionnant recueil intitulé *Théorie des machines simples*. Dans cet ouvrage, il décrit soigneusement les expériences qu'il a réalisées et les résultats obtenus. Les documents suivants en présentent quelques extraits adaptés.

Nous avons fait construire une table très solide (...), sur laquelle on a posé deux poutres de bois de chêne  $AB$ ,  $A'B'$  (...); à l'extrémité  $BB'$  des pièces de bois, l'on a placé, dans le vide qui les sépare, une poulie en bois (...): sous cette poulie l'on a creusé un puits pour pouvoir y laisser descendre le plateau  $P$ .



L'on a fait successivement glisser sur les pièces de bois de chêne un traîneau. Lorsqu'on veut diminuer les surfaces de contact, on cloue sous le traîneau des règles de différentes largeurs (...). Un crochet fixé à une extrémité du traîneau sert à attacher la corde qui passe par la poulie, et porte le plateau  $P$ .

**Doc.1** – Extrait, adapté des pages 5 à 7, de la *Théorie des machines simples*.

Dans le frottement, il faut distinguer avec soin la force nécessaire pour le vaincre lorsque les surfaces sont posées l'une sur l'autre depuis un certain temps, de la force nécessaire pour entretenir une vitesse uniforme lorsque les surfaces ont un mouvement respectif.

#### SECTION PREMIÈRE

*Des frottements des surfaces qui glissent à sec l'une sur l'autre, suivant le fil du bois, sans aucune espèce d'enduit, mais seulement avec le degré de poli que l'art peut leur donner.*

*Bois de chêne sur bois de chêne.*

Le traîneau a 2 pieds 3 pouces de longueur ; les poutres de chêne ont une largeur telle que la surface de contact traîneau/poutre est de 3 pieds carrés. L'on veut déterminer le frottement après un certain temps de repos, sous différents poids.

#### Première expérience

Le traîneau sans être chargé d'aucun poids, pesant 74 livres, (...) il a fallu une traction de 30 livres pour vaincre le frottement.

#### Deuxième expérience

Le traîneau chargé, son propre poids compris, pèse 874 livres. Il a fallu une traction de 406 livres pour vaincre le frottement.

#### Troisième expérience

Le traîneau chargé, son propre poids compris, pèse 2474 livres. Il a fallu une traction de 1116 livres pour vaincre le frottement.

**Doc.2** – Extrait, adapté des pages 8 à 9, de la *Théorie des machines simples*.

Le document 2 distingue donc deux situations : celle où le traîneau, soumis à la tension du fil, reste immobile et celle où ce même traîneau, également soumis à la tension du fil, glisse sur les deux poutres.

Il est usuel de décomposer la force exercée par le support (ici les poutres) sur le traîneau à l'aide de deux composantes : l'une tangentielle (parallèle) au support et notée  $\vec{T}$ , l'autre, normale (perpendiculaire) au plan du support et notée  $\vec{N}$ .

**1** À l'aide d'un schéma, représenter les forces auxquelles le traîneau est soumis.

On note  $T$  la norme du vecteur  $\vec{T}$  et  $N$  celle du vecteur  $\vec{N}$ . On se place dans la situation où le traîneau est immobile (on parle alors de phase de collage).

**2** Justifier l'orientation (direction et sens) du vecteur  $\vec{N}$ . Relier  $N$ , la masse  $m_{\text{tr}}$  du traîneau éventuellement chargé et  $g$  l'intensité de la pesanteur.

**3** Justifier l'orientation du vecteur  $\vec{T}$ .

**4** En raisonnant sur un système, que l'on définira, relier la norme de la tension de la corde à la masse  $m_{\text{p}}$  du plateau avec son chargement et à  $g$  l'intensité de la pesanteur. On supposera que la corde est toujours tendue et que la norme de la tension exercée par la corde sur le plateau est la même que celle exercée par la corde sur le traîneau.

**5** En déduire une relation entre  $T$ ,  $g$  et  $m_{\text{p}}$ .

- 6 Calculer le rapport  $\frac{T}{N}$  pour chaque expérience du document 2.

Une des lois du frottement solide, énoncée par Coulomb, stipule qu'il existe un coefficient statique  $\mu_s$  indépendant de  $m_{tr}$ , tel que  $T \leq \mu_s N$  tant qu'il n'y a pas glissement.

- 7 Expliquer comment les expériences précédentes ont conduit Coulomb à formuler cette loi.

L'égalité  $T = \mu_s N$  est atteinte juste au seuil d'amorçage du glissement.

- 8 Estimer la valeur du coefficient  $\mu_s$  pour le frottement chêne/chêne étudié dans le document 2.

Sous le traîneau de 15 pouces de longueur, j'ai fait clouer deux petits prismes triangulaires de bois de chêne de 15 pouces de longueur, mais dont l'angle qui portait sur les poutres  $AB$  et  $A'B'$  était arrondi.

#### Quatrième expérience

Le traîneau chargé, son poids compris, a une masse de 250 livres. L'on trouve que la traction nécessaire pour vaincre le frottement est de 106 livres.

#### Cinquième expérience

Le traîneau chargé, son poids compris, a une masse de 450 livres. L'on trouve que la traction nécessaire pour vaincre le frottement est de 186 livres.

#### Sixième expérience

Le traîneau chargé, son poids compris, a une masse de 856 livres. L'on trouve que la traction nécessaire pour vaincre le frottement est de 356 livres.

**Doc.3** – Extrait, adapté de la page 10, de la *Théorie des machines simples*.

- 9 En s'appuyant sur des évaluations quantitatives et éventuellement sur un schéma, expliquer ce qu'apportent les expériences 4 à 6 (document 3) par rapport aux expériences 1 à 3 (document 2).

## I.B Coulomb et le frottement dynamique

Nous allons chercher à déterminer le frottement, lorsque les surfaces se meuvent avec une vitesse quelconque. Voici la manière dont les expériences ont été conduites lorsque le traîneau était placé sur les poutres, et qu'il était chargé du poids sous lequel on voulait l'éprouver ; l'on chargeait successivement le plateau P de différents poids, et l'on ébranlait le traîneau (...) en pressant par derrière. L'on avait divisé de pouce en pouce, avec beaucoup d'exactitude, le côté de la poutre  $AB$  ; au cours du mouvement, l'extrémité du traîneau tenait lieu d'index et mesurait les espaces parcourus : la durée des mouvements s'observait au moyen d'un pendule qui battait les demi-secondes.

**Doc.4** – Extrait, adapté des pages 36 et 37, de la *Théorie des machines simples*.

Dans ces expériences, les mesures sont effectuées sur une distance parcourue par le traîneau de 4 pieds (environ 1,20 m). Il ne s'agit donc plus d'étudier une phase de collage, mais une phase de glissement. Coulomb fait relever la durée notée  $\Delta t_1$  de parcours des 2 premiers pieds, puis celle notée  $\Delta t_2$  des deux derniers. Ces résultats sont résumés dans le tableau du document 5.

masse du traîneau chargé (livres)	masse du plateau P chargé (livres)	$\Delta t_1$ (s)	$\Delta t_2$ (s)	surface de contact
47	9	1,5	0,5	36 pouces carré
1647	162	14	6	36 pouces carré
1647	166	5,5	2,5	36 pouces carré
1647	172	4,5	2	36 pouces carré
874	105	3	1,5	3 pieds carré
2474	270	4	2,5	3 pieds carré

**Doc.5** – Résultats des mesures de durées de phases de glissement pour le contact chêne/chêne.

**10** Discuter de la qualité des résultats expérimentaux présentés dans le tableau du document 5.

Le but des questions qui suivent est d'exploiter les résultats fournis par le document 5. On note  $d$  la distance qui sépare deux points éloignés de 2 pieds, et  $a$  l'accélération du traîneau lors du mouvement. Coulomb fait l'hypothèse que le mouvement du traîneau est uniformément accéléré.

**11** Exprimer  $\Delta t_1$  en fonction de  $d$  et  $a$ .

**12** En déduire que  $\Delta t_2 = \alpha \Delta t_1$  où  $\alpha$  est un nombre que l'on déterminera.

**13** Cette valeur est-elle en accord avec les résultats de Coulomb ? En déduire qu'aux incertitudes de mesure près, le mouvement est effectivement uniformément accéléré.

**14** Comment améliorer le dispositif de Coulomb, en utilisant du matériel moderne, pour pouvoir trancher sur le caractère uniformément accéléré du mouvement ?

**15** Montrer que la norme de l'accélération du plateau est égale à celle du traîneau au cours du mouvement.

Il est usuel d'introduire un second coefficient de frottement, noté  $\mu_d$  et appelé coefficient de frottement dynamique, qui relie  $N$  et  $T$  lorsqu'il y a glissement, et tel que  $T = \mu_d N$ .

**16** La valeur de  $\alpha$  dépend-elle des coefficients de frottement ?

**17** Exprimer  $\mu_d$  en fonction de  $\Delta t_1$ ,  $d$ ,  $g$ ,  $m_{tr}$  et  $m_P$  (où  $m_{tr}$  et  $m_P$  sont les masses introduites au paragraphe I.A).

**18** Calculer la valeur du coefficient  $\mu_d$  pour chaque ligne du tableau (document 5). Commenter les résultats obtenus. En déduire une estimation du coefficient  $\mu_d$  pour le frottement chêne/chêne.

**19** Comparer  $\mu_d$  et  $\mu_s$ . Commenter qualitativement ce résultat.

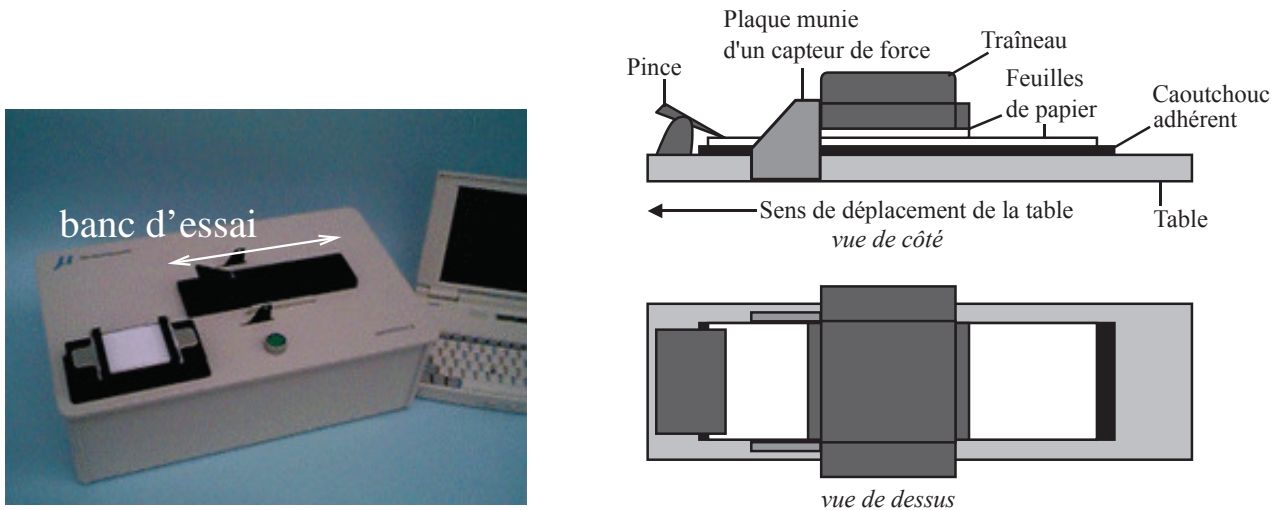
**20** La valeur du coefficient  $\mu_d$  dépend-elle de l'aire des surfaces en contact ?

Initialement, Coulomb avait envisagé de laisser le traîneau avancer sur 12 pieds (au lieu de 4), mais il s'est rapidement rendu compte qu'au bout d'une telle distance parcourue, l'expérience devenait dangereuse.

**21** Estimer la vitesse atteinte par le traîneau chargé, de masse totale environ 800 kg, au bout de 3,0 m de course (avec une vitesse initiale négligeable et un plateau P chargé de masse totale environ 90 kg). Commenter le résultat.

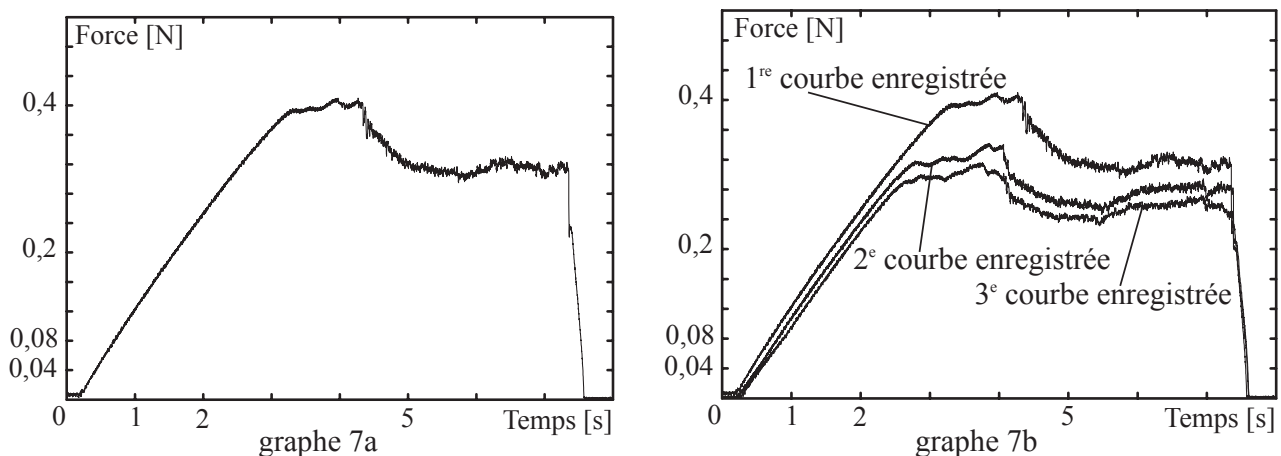
### I.C Version moderne des expériences de Coulomb

Les technologies modernes permettent de reproduire les expériences de Coulomb en améliorant la précision. À l'aide du banc d'essai suivant (document 6), on peut estimer les coefficients de frottement pour le contact papier/papier, entre deux feuilles de papier. La connaissance de ces coefficients joue un rôle majeur dans l'industrie du papier, pour le réglage de chaînes d'impression par exemple.



**Doc.6** – Photographie et schémas du banc d'essai Amontons II.

L'appareil est composé d'une table qui se déplace par rapport au sol le long d'un axe, et d'un traîneau (de masse  $1,0 \cdot 10^2$  g) qui est maintenu fixe par rapport au sol, par une plaque munie d'un capteur de force. Une pince maintient une première bande de papier sur une surface adhérente, en caoutchouc, solidaire de la table. Une seconde bande de papier est fixée sur la face inférieure du traîneau au moyen d'un dispositif de serrage (non représenté sur la figure). Au début d'une mesure, le traîneau est abandonné sans vitesse sur la surface d'essai. On pousse alors lentement la table. Le capteur de force enregistre la courbe suivante en fonction du temps :



**Doc.7** – Courbes adaptées de *The Friction between Paper Surfaces*, N. Garoff 2002.

On s'intéresse d'abord au graphe 7a (document 7). Durant la phase de glissement, la table a une vitesse d'environ  $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , alors que lors de la phase de collage sa vitesse est approximativement de  $60 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**22** Le capteur de force qui équipe le banc d'essai permet-il de mesurer  $T$  ou  $N$  ?

**23** Situer sur le graphe 7a (document 7), que l'on reproduira sur la copie, les phases de glissement et de collage.

**24** À partir du graphe, estimer les valeurs des coefficients de frottement statique et dynamique pour le contact papier/papier.

**25** Retrouve-t-on la même inégalité entre les coefficients  $\mu_s$  et  $\mu_d$  pour le contact papier/papier, que pour le contact chêne/chêne ?

**26** Estimer la taille minimale à prévoir pour le banc d'essai pour réaliser cette expérience. Commenter cette valeur.

On s'intéresse maintenant au graphe 7b (document 7). Il présente trois courbes enregistrées successivement (toujours pour un même sens de déplacement de la table) : d'abord la 1<sup>re</sup>, puis la 2<sup>e</sup> et enfin la 3<sup>e</sup>.

**27** Quelle propriété remarquable ce graphe fait-il ressortir ? Comment expliquer ce phénomène ?

On fournit usuellement un intervalle de valeurs pour chaque coefficient de frottement.

**28** Le graphe 7b (document 7) permet-il de comprendre ce choix ? Proposer un intervalle de valeurs pour les coefficients de frottement étudiés.

Dans son rapport, Coulomb n'indique pas s'il a pris soin de vérifier l'horizontalité des faces supérieures des pièces de bois  $AB$  et  $A'B'$ .

**29** Une parfaite horizontalité est-elle essentielle au vu des résultats de cette étude ? On attend des éléments de raisonnement quantitatif.

### **I.D Quelle meilleure stratégie pour faire glisser une caisse ?**

Un déménageur cherche à déplacer une caisse en bois remplie, posée sur du parquet. Il veut la faire glisser en la tirant.

**30** Comment doit-on tirer la caisse pour exercer la force la plus faible possible : horizontalement ? verticalement ? à l'oblique ? Dans ce dernier cas, on précisera l'angle. Ce résultat dépend-il de la nature du revêtement au sol ?

*Pour répondre à cette question, il appartient au candidat de modéliser la situation. Il est notamment attendu de sa part :*

- *qu'il schématise la situation expérimentale ;*
- *qu'il introduise les grandeurs pertinentes et qu'il associe à chacune d'elles une notation ;*
- *qu'il précise les lois physiques qu'il est amené à utiliser ainsi que les hypothèses et approximations qu'il est amené à formuler ;*
- *que les calculs soient menés littéralement mais qu'ils aient pour but final d'obtenir une valeur numérique typique pour des conditions expérimentales réalistes ;*
- *qu'il critique le résultat.*

## Partie II – Influence de l'état de surface d'un matériau sur le frottement

### II.A Expériences avec les métaux

L'état de surface d'un matériau modifie ses propriétés vis-à-vis du frottement.

#### SECTION TROISIÈME

##### *Du frottement des métaux.*

L'on a fait polir avec le plus grand soin deux règles de fer de 4 pieds de longueur et de 2 pouces de largeur ; on les a fixées par leurs extrémités au traîneau. L'on a fait faire quatre autres règles, deux de fer et deux de cuivre jaune, de 15 pouces de longueur et de 18 lignes de largeur (...).

**Doc.8** – Extrait, adapté des pages 85 et 86, de la *Théorie des machines simples*.

Lors de l'étude du contact métal/métal, Coulomb réitère les mesures de la partie I.A et obtient les résultats résumés dans le tableau suivant (document 9).

nature du contact	masse du traîneau chargé (livres)	masse du plateau P chargé (livres)
fer/fer	53	15
fer/fer	453	125
fer/cuivre jaune	52	12,5
fer/cuivre jaune	452	110

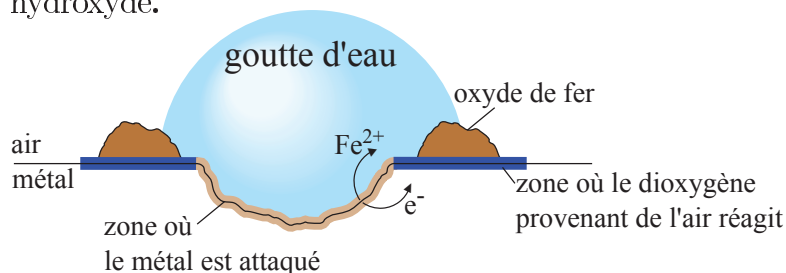
**Doc.9** – Résultats de mesures au seuil de glissement pour différents métaux. La masse du plateau chargé est la masse minimale permettant de provoquer le glissement.

**31** À l'aide du document 9, estimer la valeur du coefficient de frottement statique pour le contact fer/fer, puis pour le contact fer/cuivre jaune. Commenter ces valeurs.

### II.B Formation d'oxydes métalliques en surface

Coulomb faisait polir les règles de fer pour en éliminer la couche de rouille. La rouille est un mélange complexe de produits solides d'oxydation du fer. Le document 10 décrit un modèle simplifié d'oxydation d'une pièce métallique contenant du fer.

La surface externe de pièces en fer ou en acier (clous, tiges, poutres,...) présente des irrégularités à l'échelle microscopique, dues à des contraintes mécaniques imposées lors de leur fabrication. À proximité de ces irrégularités, le métal est plus facilement attaqué en milieu acide. Dans ces zones, des atomes de fer se transforment en ions  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$  et libèrent des électrons, qui circulent dans le métal vers d'autres zones où ils s'associent avec le dioxygène provenant de l'air, ce qui conduit notamment à la formation d'ions hydroxyde.



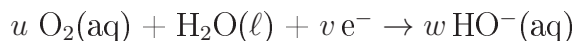
Les ions  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$  formés réagissent à leur tour avec le dioxygène pour former un oxyde de fer.

**Doc.10** – Extrait librement traduit et adapté de *Chemistry*, Zumdahl.



Les questions suivantes portent sur le document 10.

**32** L'une des demi-équations électroniques intervenant dans le processus s'écrit



où  $u$ ,  $v$  et  $w$  sont des nombres. Identifier l'oxydant et donner les valeurs des coefficients  $u$ ,  $v$  et  $w$ .

Le système décrit dans le document 10 peut être modélisé par une pile.

**33** Justifier cette modélisation.

**34** Donner l'équation de la réaction de fonctionnement de cette pile.

## II.C Le cuivre jaune

Le cuivre forme de nombreux alliages, dont les laitons, communément appelés « cuivre jaune » par comparaison à l'appellation impropre de « cuivre rouge » que l'on donne parfois au métal cuivre pur à cause de sa couleur orangée naturelle. Les laitons sont des alliages constitués principalement de cuivre et de zinc, et contiennent en quantité moindre des métaux comme le plomb, l'étain, le nickel, qui leur donnent des propriétés physiques et chimiques particulières. On peut déterminer le pourcentage d'étain d'un laiton par gravimétrie, selon le protocole simplifié donné ci-dessous. Lors du traitement d'un laiton par l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ , l'étain qu'il contient est oxydé en acide métastannique  $\text{H}_2\text{SnO}_3(\text{s})$ , composé non soluble dans ce milieu, alors que toutes les autres espèces présentes le sont. Ce solide est filtré, lavé et calciné sous forme de d'oxyde d'étain(IV)  $\text{SnO}_2$ .

On réalise l'expérience sur trois échantillons en parallèle.

- Rincer le laiton avec de l'acétone pour éliminer toute trace de graisse.
- Peser un échantillon d'environ 1 g à  $\pm 0,1$  mg et le placer dans un bécher de 250 mL couvert d'un verre de montre, sous hotte.
- Ajouter prudemment environ 15 mL d'acide nitrique concentré et 10 mL d'eau distillée. Laisser agir au moins 30 min. Évaporer la solution en chauffant doucement jusqu'à un volume résiduel de 5 mL.
- Ajouter environ 5 mL d'acide nitrique à  $3 \text{ mol.L}^{-1}$ , 25 mL d'eau distillée et chauffer sans faire bouillir pendant 45 min.
- Recueillir le solide humide  $\text{H}_2\text{SnO}_3$  par filtration et le placer dans un creuset en porcelaine.
- Placer le creuset dans un four à  $900^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que la masse de produit soit constante.

Une expérience a donné les résultats suivants : le traitement d'un échantillon de masse 1024,6 mg de laiton a conduit à l'obtention de 14,3 mg d'oxyde d'étain sec  $\text{SnO}_2$ .

**35** Proposer une explication à l'utilisation de l'acétone pour nettoyer l'échantillon de métal en précisant le type d'interactions intermoléculaires envisageables.

**36** Avec quelles pièces de verrerie mesure-t-on les volumes de liquide utilisés dans ce protocole ?

**37** Proposer un protocole expérimental de préparation de la solution d'acide nitrique à  $3 \text{ mol.L}^{-1}$  à partir de la solution d'acide nitrique concentré. On veillera à indiquer précisément le matériel à utiliser et les précautions à prendre.

**38** Proposer une équation de réaction traduisant l'action oxydante des ions nitrate  $\text{NO}_3^- (\text{aq})$  issus de l'acide nitrique sur l'étain solide  $\text{Sn}(\text{s})$ . On considèrera que les ions nitrate sont transformés en dioxyde d'azote  $\text{NO}_2(\text{g})$ .

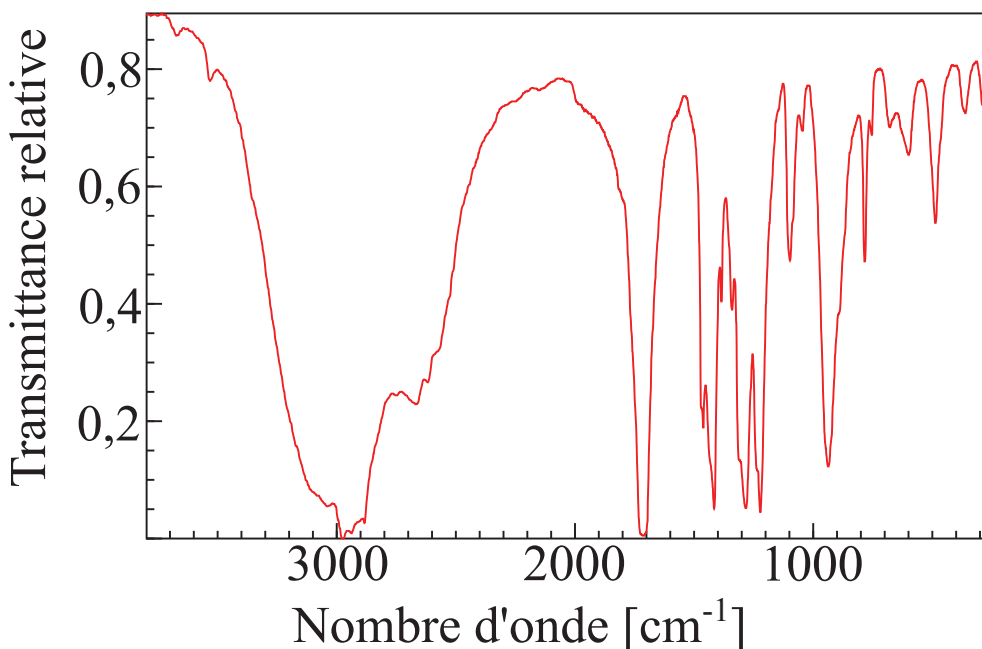
**39** Le passage dans le four à  $900^\circ\text{C}$  (calcination) permet à la fois un séchage du solide et sa déshydratation en  $\text{SnO}_2$ . Interpréter cette double opération en termes de transformation physique et de transformation chimique.

**40** Calculer le pourcentage massique d'étain présent dans le laiton étudié pour lequel on donne un résultat d'expérience. Commenter.

## II.D Utilisation d'une huile lubrifiante

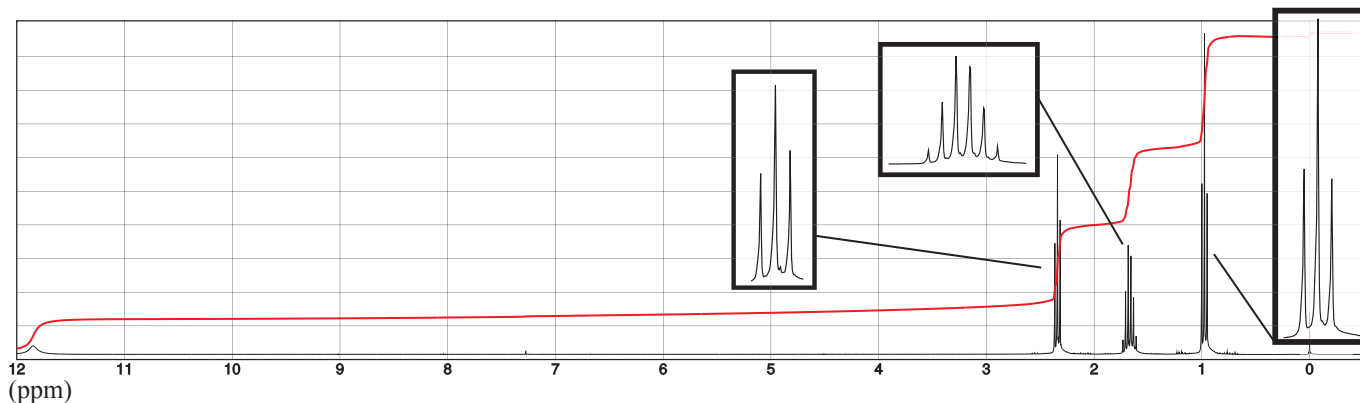
Si une première stratégie pour modifier le coefficient de frottement consiste à modifier l'état de surface en travaillant sur une éventuelle couche d'oxyde, on peut aussi envisager d'enduire les surfaces en contact d'une huile lubrifiante.

L'huile étudiée à la fin de ce paragraphe est dérivée de la molécule **A** dont le spectre infrarouge est fourni ci-dessous (document 11).



Doc.11 – Spectre infrarouge de la molécule **A**.

**41** Analyser le spectre infrarouge de la molécule **A**.

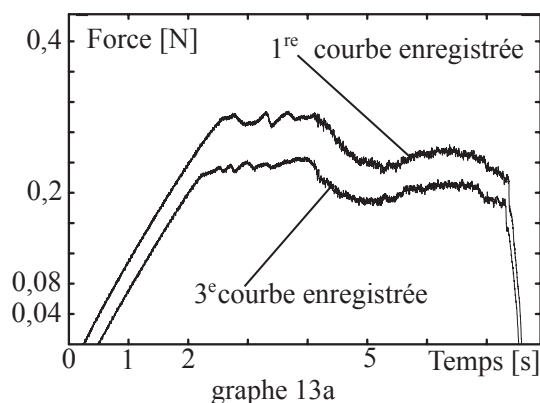


**Doc.12** – Spectre RMN  $^1\text{H}$  de la molécule **A**.

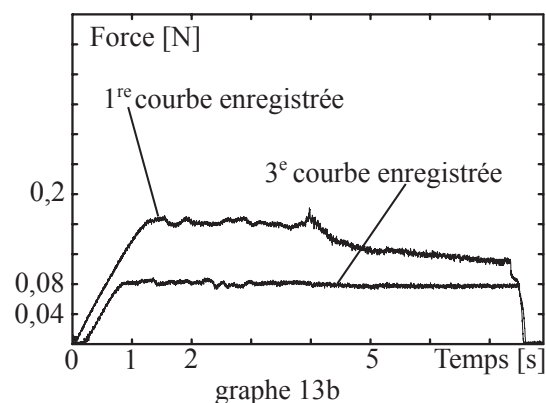
**42** Exploiter le spectre RMN fourni et proposer une formule topologique pour la molécule **A**.

**43** Nommer la molécule **A**.

On renouvelle l'expérience présentée dans la partie I.C, mais cette fois, on enduit les bandes de papier d'une huile dérivée de la molécule **A**. On réalise des acquisitions analogues à celles de la partie I.C. On obtient les courbes du graphe 13a du document 13.



graphe 13a



graphe 13b

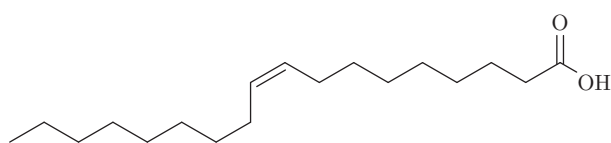
**Doc.13** – Graphe 13a : courbes obtenues en enduisant le papier par une huile dérivée de la molécule **A**. Graphe 13b : courbes obtenues en enduisant le papier par une huile dérivée de l'acide élaïdique (adapté de *The Friction between Paper Surfaces*, N. Garoff 2002).

**44** Discuter l'intérêt d'utiliser l'huile lubrifiante dérivée de la molécule **A**.

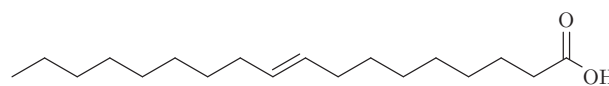
Les chercheurs ont également testé une huile dérivée de l'acide élaïdique (ou acide E-octadéc-9-énoïque), un acide gras dont la structure est proche de celle d'un acide gras présent dans l'huile d'olive, l'acide oléique (ou acide Z-octadéc-9-énoïque). Les courbes obtenues sont présentées sur le graphe 13b du document 13.

**45** Discuter l'intérêt d'utiliser l'huile dérivée de l'acide élaïdique.

On considère les deux molécules suivantes. L'une correspond à l'acide élaïdique et l'autre à l'acide oléique.



molécule 1



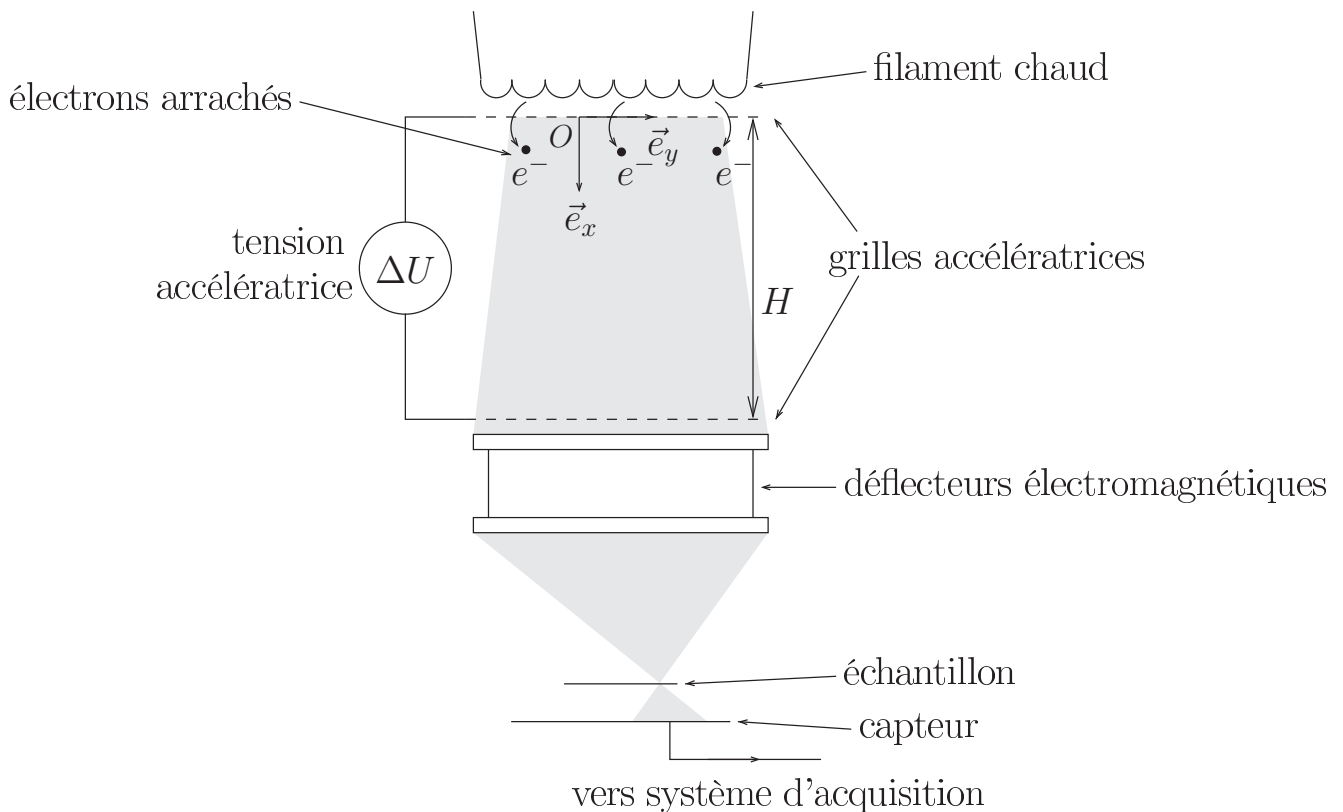
molécule 2

46 Quel lien existe-t-il entre ces deux molécules ?

47 Identifier l'acide élaïdique.

### Partie III – Observer l'état de surface d'un matériau

Les parties précédentes suggèrent que l'état de surface des matériaux impacte directement le frottement. On peut observer l'état de surface d'un matériau métallique (ou métallisé) à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Cette technique repose sur le fait que les électrons présentent, comme la lumière, des aspects ondulatoires et particuliers. Ils peuvent se comporter comme une onde de longueur d'onde donnée par la relation de de Broglie. Il est possible de dévier et focaliser un faisceau d'électrons grâce à des déflecteurs électromagnétiques, après qu'ils ont été arrachés d'un filament chaud puis accélérés. On note  $m$  la masse d'un électron et  $\vec{v}$  son vecteur vitesse. Le schéma de principe d'un microscope électronique à balayage est donné sur le document 14.



**Doc.14** – Schéma simplifié du microscope électronique à balayage. Les grilles accélératrices sont symbolisées par des traits pointillés. Un générateur de tension impose une tension  $\Delta U$  entre les deux grilles.

48 Citer une expérience s'interprétant à partir de l'aspect ondulatoire de la lumière et une autre expérience s'interprétant à partir de son aspect particulaire.

Une fois extraits du filament chaud, les électrons de charge électrique  $-e$ , supposés initialement au repos, sont accélérés grâce à une tension  $\Delta U = 100 \text{ kV}$  imposée entre les deux grilles accélératrices. En effet, la présence de la tension  $\Delta U$  entraîne la présence d'un champ électrique  $\vec{E}$ , que l'on

supposera uniforme entre les grilles. Dans ce cas, avec les orientations définies sur le schéma, le champ électrique  $\vec{E}$  est donné par la relation :

$$\vec{E} = -\frac{dU(x)}{dx} \vec{e}_x$$

où  $U(x)$  est le potentiel électrique en un point situé entre les deux grilles à l'abscisse repérée par  $x$  (on prendra  $x = 0$  au niveau de la grille supérieure). La tension  $\Delta U$  est la différence entre les potentiels de la grille inférieure et de la grille supérieure. La distance  $H$  entre les deux grilles vaut environ 10 cm.

**49** Préciser la direction et le sens du champ  $\vec{E}$  dans la zone accélératrice.

**50** Indiquer laquelle des deux grilles accélératrices est au potentiel le plus élevé.

Le potentiel  $U(x)$  permet de définir une énergie potentielle pour les électrons, liée à la présence du champ électrique  $\vec{E}$ .

Une énergie potentielle  $E_p$  est associée à la force  $\vec{F}$  (dirigée selon le vecteur unitaire  $\vec{e}_x$ ) si ces deux grandeurs sont reliées par une expression de la forme

$$\vec{F} = -\frac{dE_p(x)}{dx} \vec{e}_x$$

**51** Exprimer cette énergie potentielle notamment en fonction de  $U(x)$  et d'une constante additive que l'on ne cherchera pas à déterminer.

**52** Exprimer  $U(x)$  en fonction de  $x$ ,  $E = \|\vec{E}\|$  et d'une constante additive que l'on ne cherchera pas à déterminer.

**53** En déduire l'expression de  $\Delta U$ , en fonction  $E$  et  $H$ .

**54** Exprimer, en fonction de  $m$ ,  $\Delta U$  et  $e$ , la vitesse  $v(H)$  acquise par les électrons lors de la traversée de la grille inférieure. En déduire une estimation numérique de  $v(H)$ .

**55** Pourquoi l'expression obtenue n'est-elle probablement pas correcte ?

La vitesse réelle atteinte par les électrons est  $1,6 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

**56** Que penser finalement de l'estimation faite à la question 54 au regard de la valeur réelle de la vitesse atteinte ?

**57** Proposer une estimation de la longueur d'onde de de Broglie associée à l'électron ainsi accéléré.

Il existe une limitation physique de la résolution des microscopes électroniques à balayage. On estime que cette limite est atteinte pour des objets dont la taille est environ égale à 100 fois la longueur d'onde de de Broglie.

**58** Estimer numériquement la valeur de la limite de résolution de ce microscope électronique.

**59** Un vide poussé est réalisé dans l'enceinte où se propage le faisceau électronique. À quoi cela sert-il ?

**60** Dans tout ce qui précède, la pesanteur a été négligée. Est-ce légitime ? On s'appuiera sur une application numérique.

## Partie IV – Procédé physique de modification de l'état de surface d'un acier

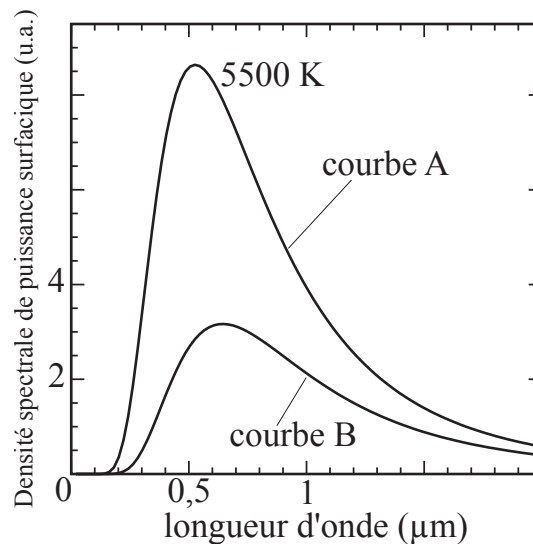
Un procédé physique utilisé pour modifier l'état de surface de l'acier est la trempe superficielle. Lorsqu'on observe, à l'aide d'un microscope adapté, l'agencement des atomes à la surface de l'acier, on constate qu'il possède un profil de surface très accidenté en l'absence de trempe superficielle, ce qui entraîne une valeur élevée du coefficient de frottement. La trempe superficielle consiste à chauffer le métal jusqu'à ce qu'il fonde en surface, puis à le refroidir brutalement.

**61** Le microscope électronique à balayage étudié dans la partie précédente permet-il d'observer le métal à l'échelle atomique ?

L'objectif de la trempe superficielle est de faire fondre l'acier en surface seulement, car la pièce traitée doit garder sa forme initiale. Pour ce faire, le chauffage doit être stoppé dès que la température en surface atteint la température de fusion puis on refroidit immédiatement. Pour connaître la température de surface, on peut observer le rayonnement émis par le matériau. Le physicien Max Planck a montré que sous certaines hypothèses (que l'on supposera vérifiées dans la suite), la densité spectrale  $p(\lambda)$  de puissance surfacique rayonnée par un corps de température de surface  $T$ , en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement émis, s'écrit :

$$p(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

La représentation de cette fonction pour deux températures différentes est fournie par le document 15. Qualitativement, cette fonction renseigne sur la puissance électromagnétique rayonnée par un corps de température de surface  $T$ , à chaque longueur d'onde  $\lambda$ .



**Doc.15** – Courbes donnant, en fonction de la longueur d'onde, l'allure de la densité spectrale de puissance surfacique rayonnée (en unité arbitraire) par un corps de température de surface 5500 K (courbe A), et de température de surface inconnue (courbe B).

**62** À quel type de spectre d'émission ce spectre appartient-il ? Citer une source lumineuse présentant un spectre du même type et une source présentant un spectre de type différent.

**63** Quelle est la dimension de la quantité  $x = \frac{hc}{\lambda k_B T}$  ?

Sur le document 15, il apparaît que pour les deux températures considérées,  $p(\lambda)$  présente un maximum pour une longueur d'onde que l'on notera  $\lambda_m$ , qui dépend de  $T$ .

**64** Montrer que  $x_m = \frac{hc}{\lambda_m k_B T}$  est solution de l'équation  $1 - \exp(-x_m) = \frac{x_m}{\beta}$  où  $\beta$  est un entier à préciser.

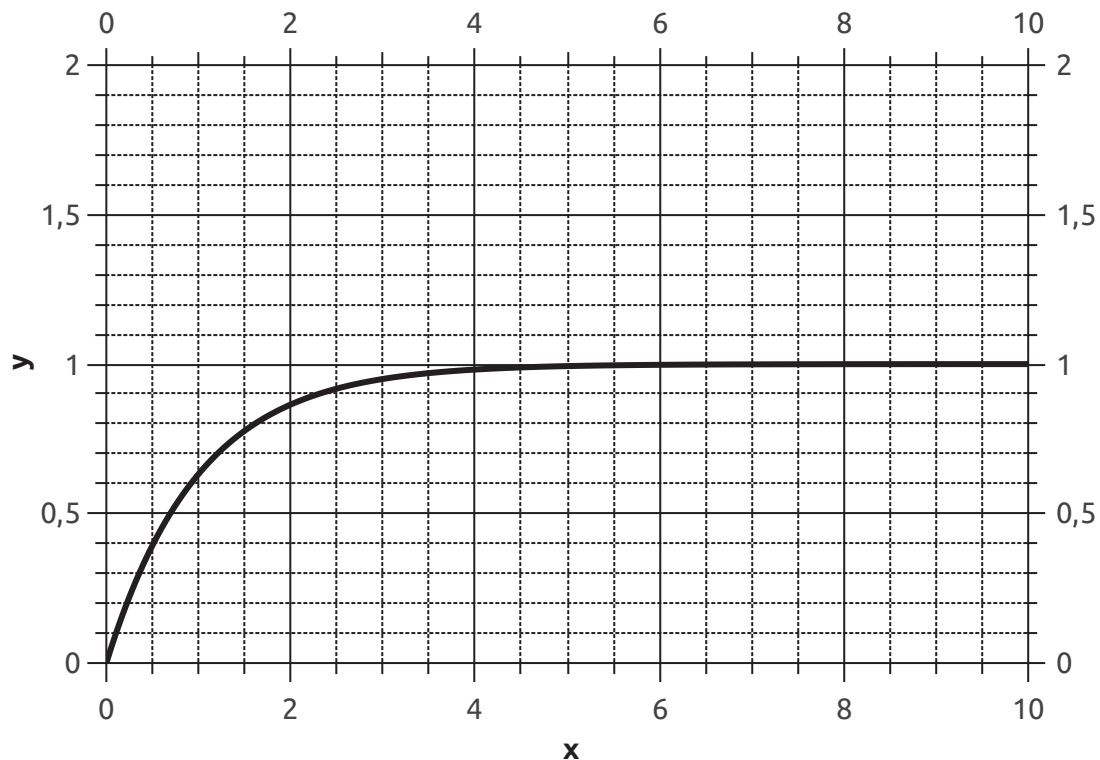
**65** À l'aide du document 16, estimer la valeur numérique de  $x_m$ .

**66** En déduire que le produit  $\lambda_m \times T$  est égal à une constante (c'est-à-dire indépendante de  $T$ ) que l'on calculera.

**67** Estimer la valeur de la température de surface du corps dont la densité spectrale de puissance rayonnée est donnée par la courbe  $B$ .

On cherche à déterminer le type de capteur à utiliser pour suivre l'évolution de la température de surface d'un acier au cours d'une trempe superficielle.

**68** Pour optimiser la précision est-il préférable d'utiliser un capteur d'ondes électromagnétiques dont la sensibilité maximale est située dans le domaine ultraviolet ? visible ? infrarouge ?



**Doc.16** – Courbe de la fonction  $y : x \mapsto 1 - \exp(-x)$ .

– FIN DE L'ÉNONCÉ –

## Annexe – Données utiles

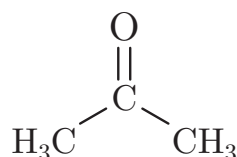
Table de conversion :

- 1 livre correspond à 490 g ;
- 1 pied correspond à 295 mm ;
- 12 pouces correspondent à 1 pied ;
- 12 lignes correspondent à 1 pouce.

Masses molaires atomiques :

- $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g/mol}$  ;
- $M(\text{N}) = 14,0 \text{ g/mol}$  ;
- $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g/mol}$  ;
- $M(\text{Sn}) = 118,7 \text{ g/mol}$ .

L'acétone est, à température ambiante, un liquide incolore, à odeur caractéristique, qui est miscible avec l'eau, l'éthanol, l'éther, les esters, la plupart des huiles et de nombreuses molécules organiques. C'est un composé polaire, de formule :



L'acide nitrique concentré est une solution aqueuse contenant 80% en masse d'acide nitrique de formule  $\text{HNO}_3$ . Sa masse volumique à  $20^\circ\text{C}$  est de  $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Table des nombres d'onde en spectroscopie infrarouge :

liaison	nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ )	intensité
O–H (alcool)	3200 - 3700	forte, bande large
N–H	3100 - 3500	moyenne à forte
C–H	3000 - 3300	moyenne à forte
O–H (acide)	2500 - 3200	forte, bande large
C=O (ester)	1700 - 1740	forte
C=O (aldéhyde, cétone)	1650 - 1730	forte
C=O (acide)	1680 - 1710	forte
C=N	1600 - 1680	forte
N–H	1560 - 1640	moyenne à forte
C–O	1050 - 1450	forte
C–N (amine)	1020 - 1360	moyenne à forte



Table des déplacements chimiques en RMN du proton :

Protons d'un groupe  $-\text{CH}_3$

proton	déplacement chimique (ppm)
$\text{CH}_3-\text{C}$	0,9
$\text{CH}_3-\text{C}-\text{O}$	1,4
$\text{CH}_3-\text{CO}-\text{O}-\text{R}$	2,0
$\text{CH}_3-\text{CO}-\text{N}-\text{R}$	2,0
$\text{CH}_3-\text{CO}-\text{R}$	2,2
$\text{CH}_3-\text{O}-\text{R}$	3,0

Protons d'un groupe  $-\text{CH}_2-$

proton	déplacement chimique (ppm)
$\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}$	1,3
$\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{O}$	1,9
$\text{C}-\text{CH}_2-\text{CO}-\text{O}-\text{R}$	2,2
$\text{C}-\text{CH}_2-\text{CO}-\text{R}$	2,4
$-\text{C}-\text{CH}_2-\text{N}$	2,5
$\text{C}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{R}$	3,4
$\text{C}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{H}$	3,6

Proton d'un groupe  $-\text{CH}<$

proton	déplacement chimique (ppm)
$\text{C}-\text{CH}-\text{C}$	1,5
$\text{C}-\text{CH}-\text{C}-\text{O}$	2,0
$\text{C}-\text{CH}-\text{CO}-\text{R}$	2,7
$\text{C}-\text{CH}-\text{N}$	2,8
$\text{C}-\text{CH}-\text{O}-\text{R}$	3,7
$\text{C}-\text{CH}-\text{O}-\text{H}$	3,9

Proton autre

proton	déplacement chimique (ppm)
$\text{R}-\text{NH}-$	0,6 - 5
$\text{R}-\text{OH}$	0,7 - 5,5
$\text{R}-\text{CO}-\text{NH}-$	5 - 8,5
$\text{H}-\text{CO}-\text{N}$	8,0
$\text{H}-\text{CO}-\text{O}-$	8,0
$-\text{CO}-\text{OH}$	8,5 - 13

- Intensité de la pesanteur :  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Charge élémentaire :  $e = 1,60\cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Masse de l'électron :  $m = 9,11\cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Constante de Planck :  $h = 6,63\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Constante d'Avogadro :  $\mathcal{N}_A = 6,02\cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Constante de Boltzmann :  $k_B = 1,38\cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

Température de fusion de l'acier considéré dans la partie IV :  $1370^\circ\text{C}$  sous 1 bar.





