

CONCOURS GENERAL DES LYCEES

SESSION 2017

TERMINALE S

PHYSIQUE-CHIMIE

RAPPORT DU JURY

Sommaire

1. Composition du jury de la session 2017	3
2. Statistiques pour la session 2017	4
3. Commentaires sur l'épreuve écrite.....	6
4. Annexes : sujet et corrigé	9

1. Composition du jury de la session 2017

OBERT Dominique, président, IGEN

SZYMCZAK Anne, vice-présidente, IGEN

BROMONT Valérie, professeure agrégée, académie de Paris

CARNIS Aurélie, professeure agrégée, académie de Versailles

DEBLIECK Clément, professeur agrégé, académie de Lille

FAYON Karine, professeure agrégée, académie de Créteil

FINET Audrey, professeure agrégée, académie de Versailles

FREULON Vincent, professeur agrégé, académie de Versailles

KILIC Senem, professeure agrégée, académie de Paris

MARCHAND Patricia, professeure agrégée, académie de Créteil

PEHLATE Christophe, professeur agrégé, académie de Versailles

SCHMITT Aline, professeure agrégée, académie de Lille

VAN BRACKEL Emmanuel, professeur agrégé, académie de Nantes

2. Statistiques pour la session 2017

Le concours général de physique-chimie a concerné en 2017 entre 1 et 2 % des élèves scolarisés en terminale S pour l'année scolaire 2016-2017, dans l'ensemble des lycées en France et à l'étranger.

2220 candidat(e)s ont composé, contre 2343 inscrits, ce qui montre que l'engagement fort et la motivation des élèves ayant décidé de préparer le concours général ne faiblit pas entre la période d'inscription (fin du premier trimestre) et le concours (mi-mars, fin du second trimestre). D'autre part, 1951 candidat(e)s avaient composé lors de la session 2016, l'augmentation du nombre de candidats est donc très significative cette année.

Les 2343 candidat(e)s inscrit(e)s au concours général de physique-chimie pour la session 2017 se répartissent de la manière suivante selon leur genre et leur origine territoriale.

	filles	Garçons
AIX-MARSEILLE	28	75
AMIENS	18	41
BESANÇON	13	21
BORDEAUX	21	48
CAEN	6	15
CLERMONT-FERRAND	1	16
CRETEIL	66	89
DIJON	12	41
GRENOBLE	21	50
GUADELOUPE	15	11
LA REUNION	12	14
LILLE	59	38
LIMOGES	3	3
LYON	46	79
MARTINIQUE	22	13
MAYOTTE	0	1
MONTPELLIER	28	78
NANCY-METZ	22	61
NANTES	18	54
NICE	28	52
ORLEANS-TOURS	20	44
PARIS	67	155
POITIERS	6	22
POLYNESIE FRANCAISE	3	4
REIMS	8	34
RENNES	18	29
ROUEN	18	43
STRASBOURG	4	41
TOULOUSE	26	81
VERSAILLES	84	191
Lycées français à l'étranger	62	144
Total hors lycées français à l'étranger	693	1444
Total général	755	1588

On dénombre donc plus de 32 % de filles parmi les inscrits (pour une représentation de 47 % dans la population des élèves des classes de terminale S).

Les candidats des lycées français à l'étranger (58 établissements représentés pour 34 pays) se répartissent de la manière suivante :

	filles	garçons
ALLEMAGNE	3	5
AUSTRALIE	0	1
AUTRICHE	0	3
CANADA	1	4
CHINE	2	8
COLOMBIE	2	5
COTE D'IVOIRE	2	7
DANEMARK	2	0
EMIRATS ARABES UNIS	4	2
ESPAGNE	3	7
ETATS-UNIS	1	5
GABON	2	3
GRECE	0	3
GUATEMALA	0	1
GUINEE	1	0
INDE	1	0
ITALIE	1	1
KENYA	0	2
LIBAN	6	17
LUXEMBOURG	1	5
MALAISIE	0	2
MAROC	20	37
MAURICE	0	2
PAYS-BAS	1	2
ROYAUME-UNI	2	5
SALVADOR	0	2
SENEGAL	2	0
SINGAPOUR	1	4
SUISSE	0	2
THAILANDE	0	1
TUNISIE	3	5
TURQUIE	1	2
VENEZUELA	0	1
Total	62	144

3. Commentaires sur l'épreuve écrite

L'épreuve de la session 2017, intitulée « Qui s'y frotte, s'y ... », traite des expériences de Coulomb sur les lois du frottement solide. Globalement, les première et deuxième parties ont été traitées dans toutes les copies, les troisième et quatrième parties plus rarement.

- Partie I -

1) Le schéma représentant les forces et les points d'applications associés est un outil essentiel au raisonnement en mécanique. Il faut prendre garde de ne pas oublier de forces par exemple le poids du traîneau ou la tension du fil sur le traîneau.

2 à 5) Ces questions sont bien traitées même par les candidats ayant proposé un schéma incomplet à la question 1. Notons qu'il est inexact de considérer que la réaction normale du support sur le traîneau est la force réciproque du poids du traîneau.

6) Le calcul du rapport T/N ne nécessite pas d'effectuer une conversion des masses en kg, ce qui fait gagner beaucoup de temps. L'application numérique doit être conduite avec soin : avec les résultats expérimentaux fournis, on ne peut pas se contenter d'affirmer que $T/N \approx 0,4$ pour les trois expériences.

7) Question bien traitée quoique de nombreux candidats se limitent à justifier l'existence d'un seuil d'amorçage du glissement, sans justifier que ce seuil est indépendant de la masse du traîneau.

10) Question bien traitée dans de nombreuses copies.

11 à 13) Ces questions sont bien traitées dans les meilleures copies. De nombreux candidats ont abordé la question 11) par une analyse dimensionnelle, ce qui peut être un bon réflexe en général, mais cela ne permet pas de trouver le facteur numérique 1/2. Le jury encourage les futurs candidats à s'entraîner à établir l'équation horaire d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

14) Un large spectre de propositions a été accepté à condition, toutefois, qu'elles soient pertinentes et suffisamment explicites.

16) Beaucoup de candidats comprennent que la valeur de α est la même pour tout mouvement uniformément accéléré, indépendamment des forces en présence.

17) Cette question nécessite de combiner des résultats obtenus dans plusieurs questions précédentes, ce qui n'est correctement fait que dans les meilleures copies. Dans de nombreuses copies, le système n'est pas clairement défini. Pourtant, cette précision est essentielle, car le bilan des forces n'est pas le même selon que l'on considère le système {traîneau seul}, ou bien {plateau seul}, ou bien {traîneau + plateau + la corde qui les relie}.

21) Cette question est abordée dans les bonnes copies. Souvent, les candidats obtiennent une estimation correcte de la vitesse atteinte, mais, peut-être par manque de confiance en eux, concluent à tort que cette valeur « pas si élevée que cela » doit être le fruit d'une erreur de calcul.

22 à 25) Bien traitées dans de nombreuses copies.

26) Le jury est satisfait de constater que de nombreuses copies ont proposé une estimation pertinente de la longueur du banc d'essai.

27 à 28) Bien traitées dans de nombreuses copies.

29) Cette question donne lieu à des réponses affirmatives ou négatives, qui sont acceptées si elles s'appuient sur un argument pertinent. Lorsque des vecteurs doivent être projetés sur des axes,

s'appuyer sur un schéma introduisant les angles et rappelant les axes de projection est une bonne démarche.

30) L'utilisation du théorème de l'énergie mécanique conduit à une impasse, puisqu'en l'absence de mouvement, l'énergie mécanique de la caisse est, certes, constante, mais les travaux des forces sont tous nuls. Si peu de candidats pensent à utiliser la dérivée pour chercher un extremum de $\mu_d \sin \alpha + \cos \alpha$ (α étant l'angle entre l'horizontale et la corde), quelques autres aboutissent au résultat en tâtonnant. Notons qu'un nombre important de copies cherche à prendre en compte l'angle α en inclinant la caisse par rapport à l'horizontale d'un angle α . Ce n'est pas parce que l'on tire sur une caisse avec un angle de 45° sur l'horizontale que la caisse s'incline de ce même angle.

Le jury souhaite attirer l'attention des futurs candidats sur l'importance de la phase d'analyse et de modélisation, étape cruciale pour la résolution de problèmes ouverts. Il faut prendre le temps de bien se représenter la situation physique, de tester (sur le papier ou mentalement) quelques configurations possibles pour bien identifier les paramètres clefs et les grandeurs qui sont influencées par des modifications de ces paramètres. Ici encore, un schéma de la situation physique constitue une étape essentielle pour définir clairement ces paramètres. Ayant identifié ces paramètres, on trouve plus facilement les lois/théorèmes qui les relient, et qui seront donc nécessaires à la résolution. C'est alors, seulement, que l'on peut chercher à écrire les équations et les résoudre pour répondre à la question posée.

- Partie II -

32) Certains candidats sont déroutés par l'apparition d'un nombre stœchiométrique non entier. Rappelons que les équations de réaction permettent d'établir des bilans de quantités de matière. Ici, un nombre stœchiométrique $u = 1/2$ pour le dioxygène traduit que lorsque l'avancement de la réaction augmente de 1 mol, 0,5 mol de dioxygène est consommée.

33) Question peu ou mal traitée. On ne peut pas se contenter d'évoquer l'échange d'électrons pour faire l'analogie avec une pile ; il faut mentionner la séparation spatiale des zones de réduction et d'oxydation, et la circulation d'électrons entre ces deux zones dans un conducteur ohmique.

36) Beaucoup de candidats affirment qu'il faut utiliser systématiquement une verrerie jaugée pour plus de précision. Le choix de la verrerie est guidé par la précision requise. Par exemple, dans ce protocole, il faut et il suffit que l'acide nitrique soit en excès, il n'est donc nullement besoin d'en prélever précisément 5,00 mL avec une pipette jaugée. Des volumes de 4,9 ou 5,2 mL, mesurés avec une éprouvette graduée, conviennent tout autant. L'utilisation d'une verrerie jaugée n'est pas pertinente dans ce cas.

37) La quantité d'acide nitrique concentré à prélever n'est correctement déterminée que dans peu de copies.

38) Même si ce n'est pas demandé, il est conseillé de prendre le temps d'équilibrer les demi-équations électroniques pour trouver ensuite l'équation de réaction. Aucun candidat proposant directement une équation de réaction (sans passer par les demi-équations électroniques) n'obtient de résultat correct.

40) Cette question donne lieu à de nombreuses erreurs, beaucoup de copies trouvant 1,4 % au lieu de 1,1 %.

41 à 43) Les spectres sont correctement analysés dans de nombreuses copies. Le dépouillement d'un spectre doit être effectué avec rigueur. Sur le spectre RMN, quelques candidats ne repèrent pas le singulet vers 12 ppm, déplacement caractéristique d'un proton d'acide carboxylique. Une erreur répandue est de ne pas inclure l'atome de carbone du groupe caractéristique de la fonction acide carboxylique dans le dénombrement des atomes constituant la chaîne principale et de nommer la molécule acide propanoïque.

46, 47) Questions assez bien traitées.

- Partie III -

48) Si les exemples proposés d'expériences illustrant les propriétés ondulatoires de la lumière sont très souvent justes, ceux qui témoignent des propriétés particulières sont plus rarement donnés.

49, 50) Lorsqu'une question conduit à deux réponses possibles seulement (ici « vers le haut » ou « vers le bas »), il faut fournir une justification (même sommaire) de la réponse donnée.

51 à 53) Il faut être vigilant sur les signes dans les expressions.

54) L'utilisation d'un théorème énergétique est la méthode la plus rapide pour répondre, puisqu'aucune durée n'est demandée.

55) Les frottements ne constituent pas une réponse valable, au vu de la question 59 (qui évoque le vide poussé qui règne dans l'enceinte où le faisceau électronique se propage).

57) La formule de de Broglie ne semble pas bien connue au moment de l'épreuve.

60) Question plutôt réussie par les candidats qui l'ont abordée.

- Partie IV -

62) Question plutôt bien traitée dans les copies l'ayant abordée.

64 à 68) Très peu de candidats pensent à une annulation de la dérivée pour chercher un extremum. La question 67 est souvent traitée en utilisant directement la relation de Wien et les valeurs fournies sur les courbes, ce qui est tout à fait acceptable.

Globalement, le jury constate avec satisfaction que les candidats réussissent bien à s'appropriier les informations fournies dans les nombreux extraits proposés, à s'adapter aux unités parfois inhabituelles qui y sont utilisées et à les combiner.

4. Annexes : sujet et corrigé

- **Sujet du concours général de physique-chimie de terminale S : session 2017**
- **Proposition de correction**

Le corrigé du sujet de la session 2017 proposé en annexe vise à aider les futurs candidats à se préparer au concours général des lycées de physique-chimie de la filière S. Il constitue une proposition et n'a donc aucune visée normative.

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/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.

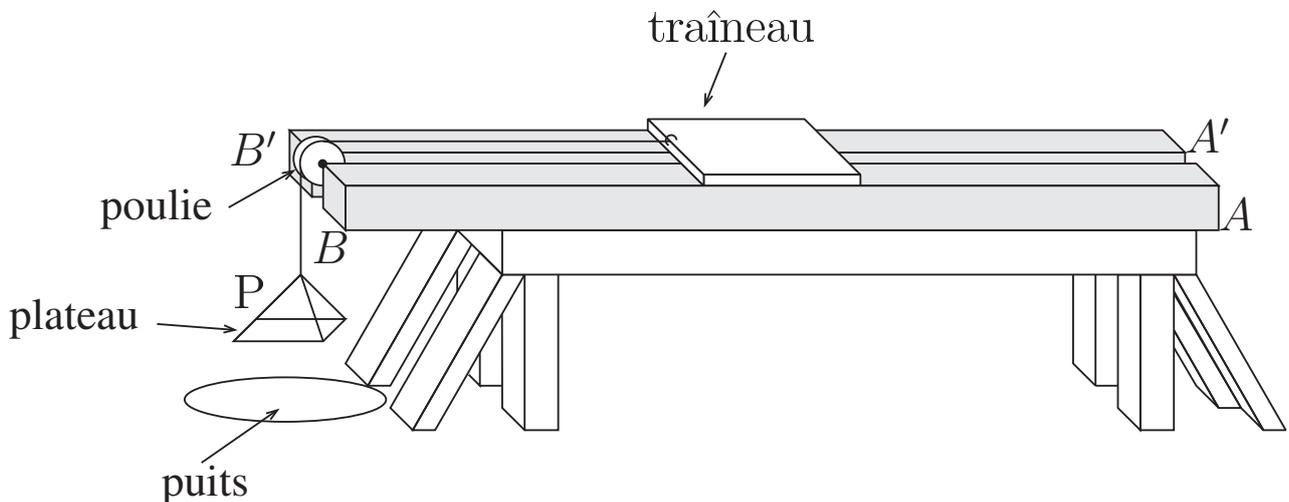
Si les parties II, III et IV sont indépendantes, les mesures qui y sont présentées font référence à la partie I.

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_{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_{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_{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 μ_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 μ_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 Δt_1 de parcours des 2 premiers pieds, puis celle notée Δt_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)	Δt_1 (s)	Δt_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 Δt_1 en fonction de d et a .

12 En déduire que $\Delta t_2 = \alpha \Delta t_1$ où α 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 μ_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 α dépend-elle des coefficients de frottement ?

17 Exprimer μ_d en fonction de Δt_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 μ_d pour chaque ligne du tableau (document 5). Commenter les résultats obtenus. En déduire une estimation du coefficient μ_d pour le frottement chêne/chêne.

19 Comparer μ_d et μ_s . Commenter qualitativement ce résultat.

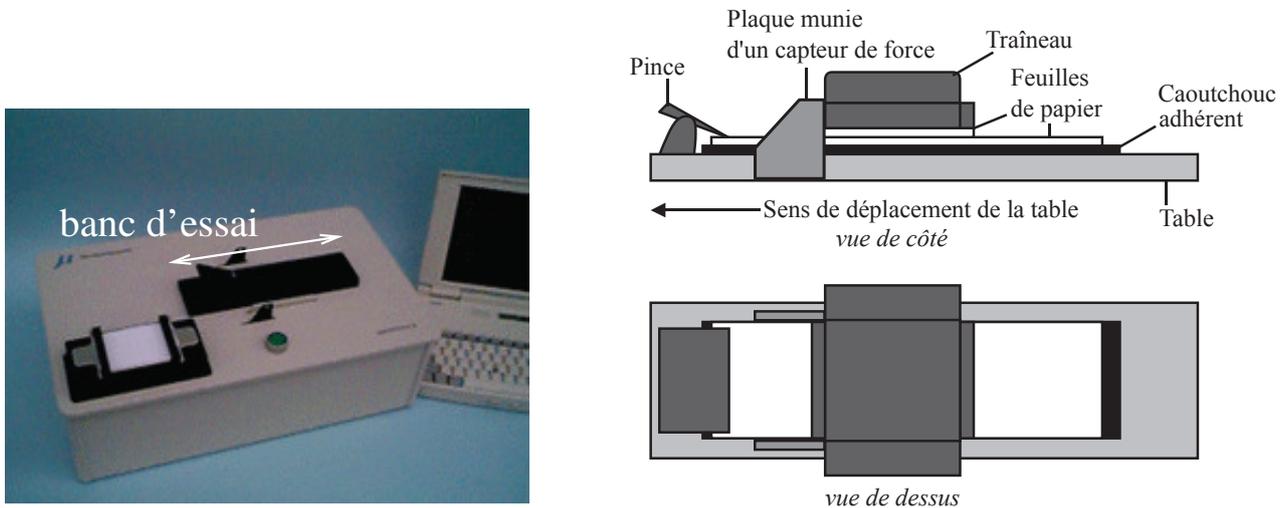
20 La valeur du coefficient μ_d dépend-elle de l'aire des surfaces en contact ?

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.

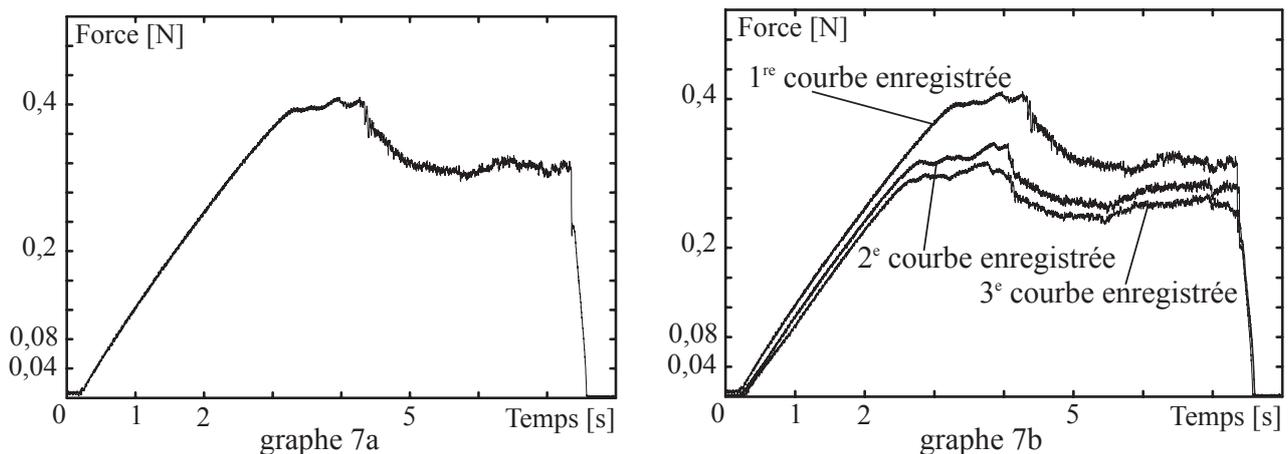
I.C Version moderne des expériences de Coulomb

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 μ_s et μ_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^{re}, puis la 2^e et enfin la 3^e.

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

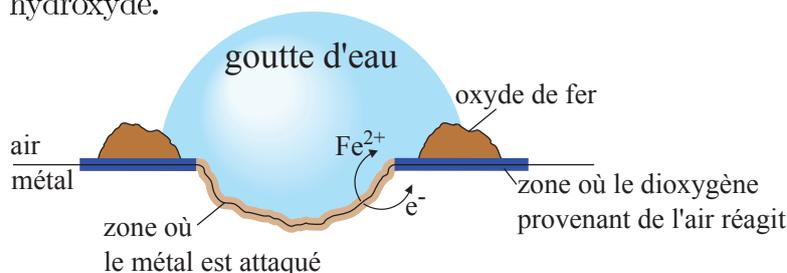
Doc.9 – Résultats de mesures au seuil de glissement pour différents métaux. La masse du plateau chargé est la masse minimale permettant de provoquer le glissement.

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.

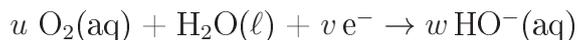


Les ions $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ formés réagissent à leur tour avec le dioxygène pour former un oxyde de fer.

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 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) 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 mol.L^{-1} , 25 mL d'eau distillée et chauffer sans faire bouillir pendant 45 min.
- Recueillir le solide humide H_2SnO_3 par filtration et le placer dans un creuset en porcelaine.
- Placer le creuset dans un four à 900°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 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 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 $\text{NO}_2(\text{g})$.

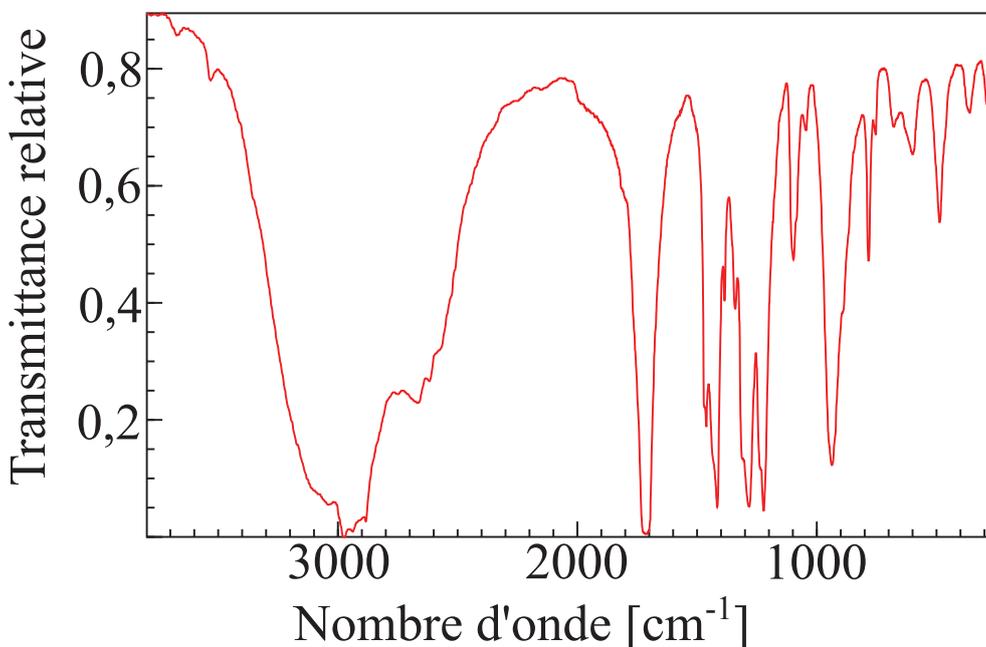
39 Le passage dans le four à 900°C (calcination) permet à la fois un séchage du solide et sa déshydratation en SnO_2 . Interpréter cette double opération en termes de transformation physique et de transformation chimique.

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

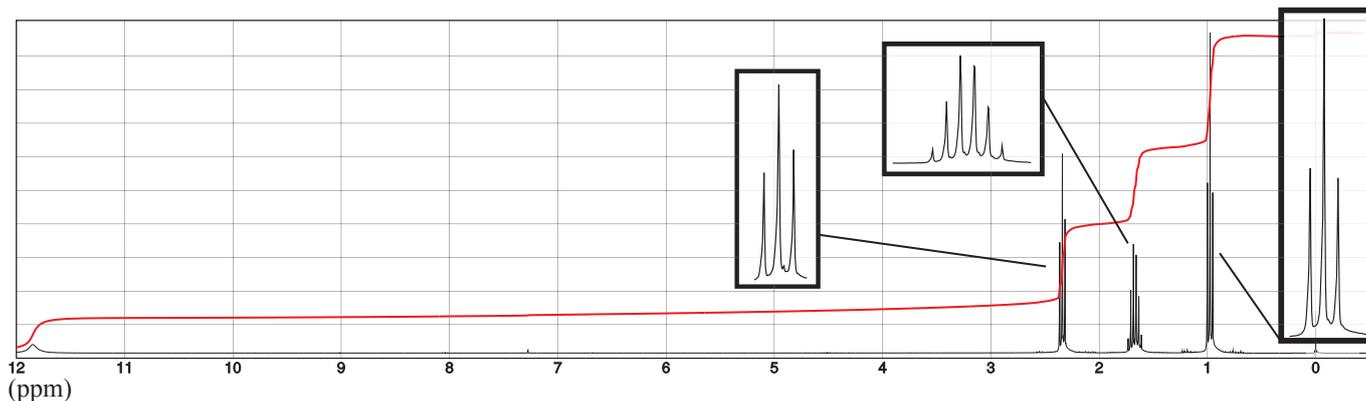
Si une première stratégie pour modifier le coefficient de frottement consiste à modifier l'état de surface en travaillant sur une éventuelle couche d'oxyde, on peut aussi envisager d'enduire les surfaces en contact d'une huile lubrifiante.

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**.

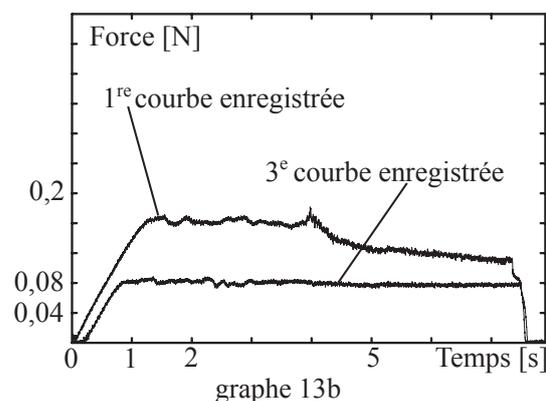
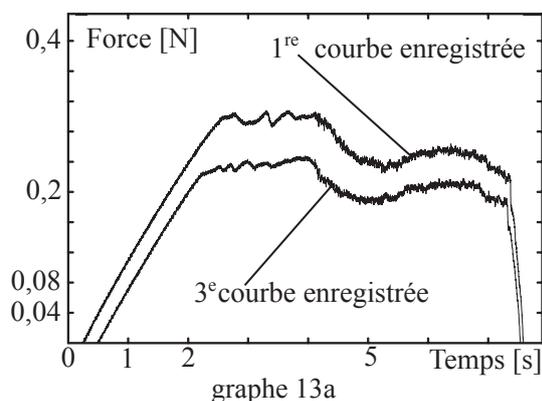


Doc.12 – Spectre RMN ^1H de la molécule **A**.

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.



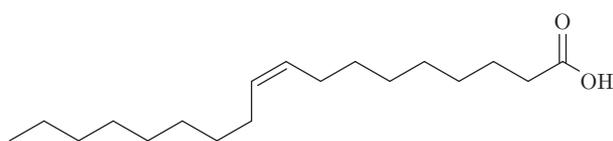
Doc.13 – Graphe 13a : courbes obtenues en enduisant le papier par une huile dérivée de la molécule **A**. Graphe 13b : courbes obtenues en enduisant le papier par une huile dérivée de l'acide élaïdique (adapté de *The Friction between Paper Surfaces*, N. Garoff 2002).

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

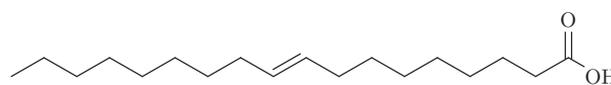
Les chercheurs ont également testé une huile dérivée de l'acide élaïdique (ou acide E-octadéc-9-énoïque), un acide gras dont la structure est proche de celle d'un acide gras présent dans l'huile d'olive, l'acide oléique (ou acide Z-octadéc-9-énoïque). Les courbes obtenues sont présentées sur le graphe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



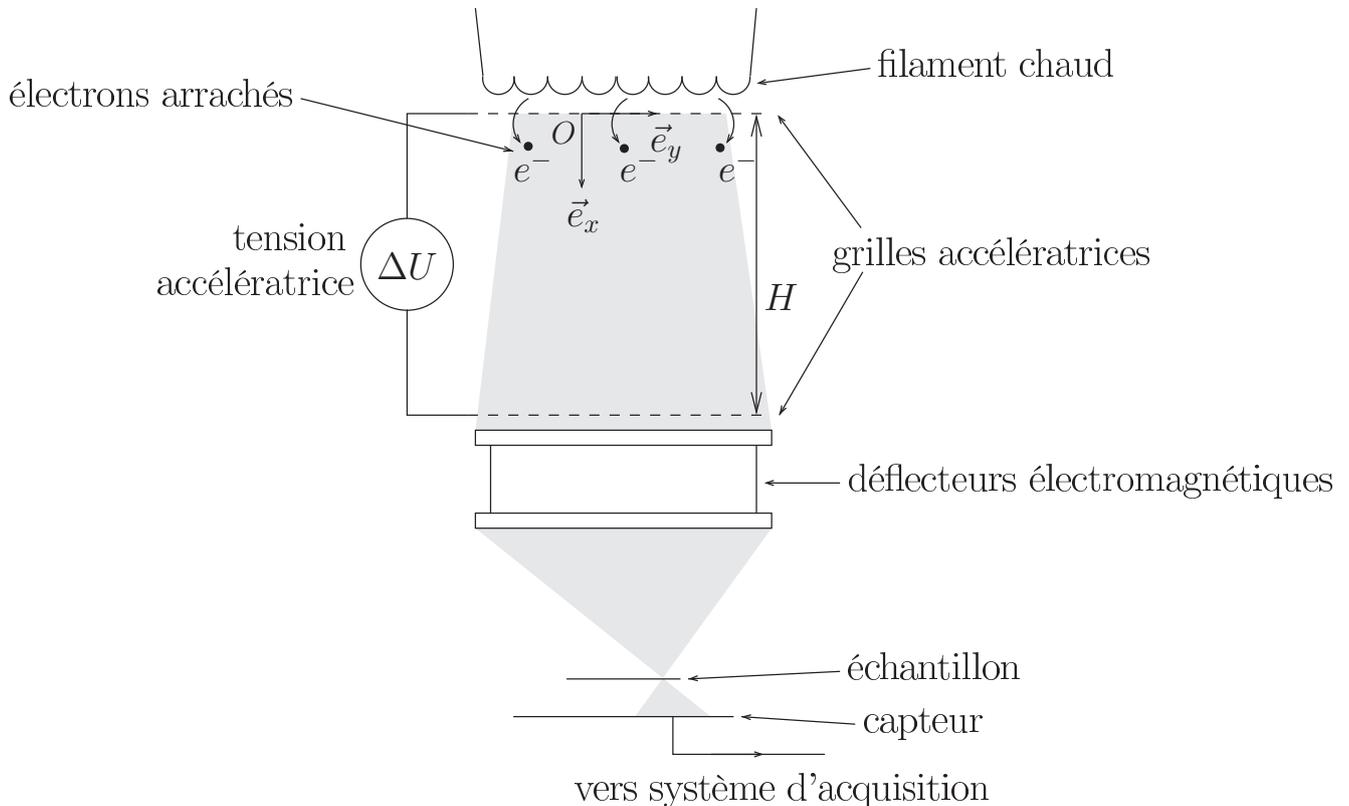
molécule 2

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 ΔU 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 ΔU 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 ΔU 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 ΔU , en fonction E et H .

54 Exprimer, en fonction de m , ΔU 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

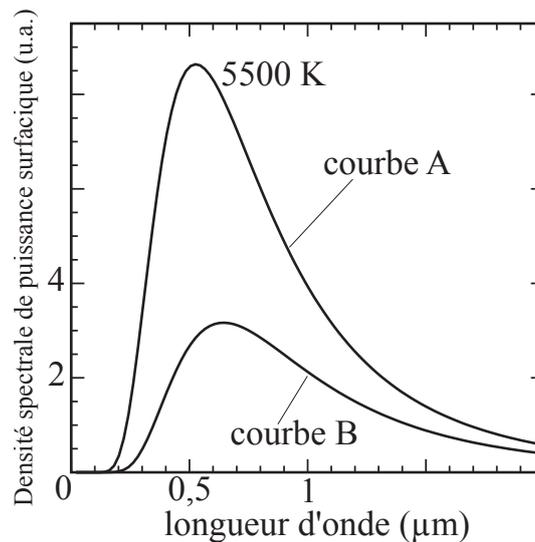
Un procédé physique utilisé pour modifier l'état de surface de l'acier est la trempe superficielle. Lorsqu'on observe, à l'aide d'un microscope adapté, l'agencement des atomes à la surface de l'acier, on constate qu'il possède un profil de surface très accidenté en l'absence de trempe superficielle, 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 λ 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 λ .



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 λ_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 β est un entier à préciser.

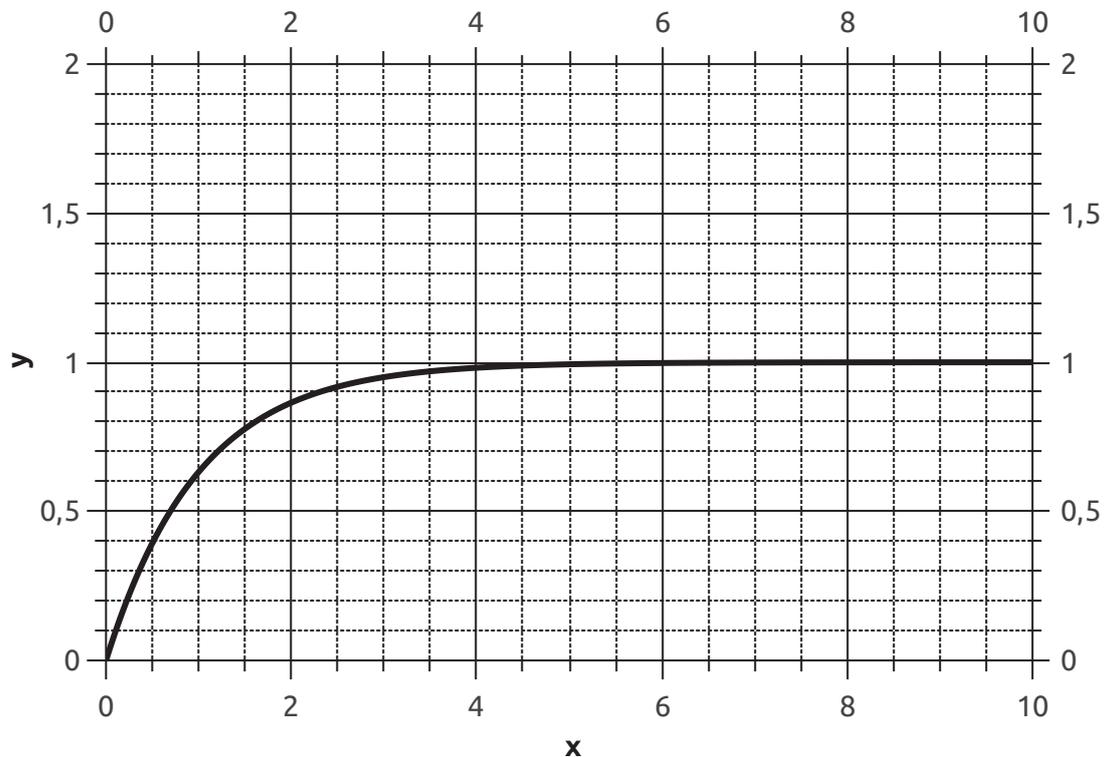
65 À l'aide du document 16, estimer la valeur numérique de x_m .

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

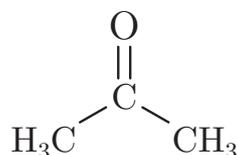
Table de conversion :

- 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 HNO_3 . Sa masse volumique à 20°C est de $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$.

Table des nombres d'onde en spectroscopie infrarouge :

liaison	nombre d'onde (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)
CH_3-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

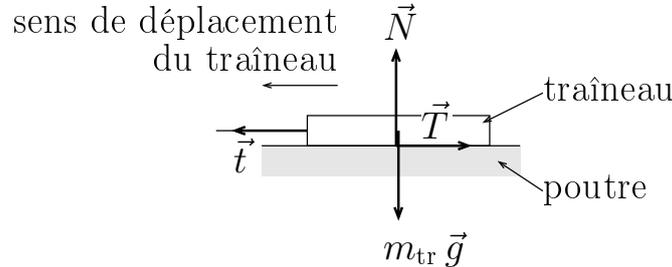
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Charge élémentaire : $e = 1,60\cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Masse de l'électron : $m = 9,11\cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Constante de Planck : $h = 6,63\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Constante d'Avogadro : $\mathcal{N}_A = 6,02\cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- 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°C sous 1 bar.

Partie I – Coulomb et les lois du frottement solide

I.A Coulomb et le frottement statique

1 En sus de \vec{T} et \vec{N} , on doit prendre en compte le poids du traîneau $m_{\text{tr}} \vec{g}$ et la tension de la corde \vec{t} .



2 D'après la loi de la quantité de mouvement appliquée dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen (en notant \vec{a} l'accélération du barycentre du traîneau) :

$$m_{\text{tr}} \vec{a} = \vec{T} + \vec{N} + m_{\text{tr}} \vec{g} + \vec{t} = \vec{0}$$

Le vecteur \vec{N} est orienté vers le haut car il compense le poids du traîneau qui est vers le bas.

En projection sur la verticale, on obtient en norme $N = m_{\text{tr}} g$.

3 En l'absence de mouvement, $\vec{T} + \vec{t} = \vec{0}$ donc $\vec{T} = -\vec{t}$, c'est-à-dire que \vec{T} est orienté dans le sens opposé à la tension du fil (ou vers la droite).

4 En appliquant la loi de la quantité de mouvement au plateau P (immobile), on obtient que $t = m_{\text{P}} g$ (en négligeant la masse de la corde).

5 En norme $T = t$ d'où $T = m_{\text{P}} g$.

6 À chaque fois, $\frac{T}{N} = \frac{m_{\text{P}}}{m_{\text{tr}}}$ (inutile de convertir les masses en kg) :

	exp. 1	exp. 2	exp. 3
$\frac{T}{N}$	0,41	0,47	0,45

Le rapport $\frac{T}{N}$ est approximativement constant pour ces trois expériences et compris entre 0,4 et 0,5.

7 Il n'y a pas glissement tant que la norme de la tension t est trop faible, c'est-à-dire tant que $T = t$ est inférieure à un certain seuil. D'après la question précédente, le collage cesse lorsque T atteint $\mu_s N$ (avec pour les trois expériences $\mu_s \simeq 0,4 - 0,5$) avec μ_s grossièrement indépendant de m_{tr} (puisque sa valeur est à peu près constante pour les trois expériences, alors que m_{tr} y change de plus d'un ordre de grandeur). On en déduit qu'il n'y a pas glissement tant que $T \leq \mu_s N$ avec μ_s grossièrement indépendant de m_{tr} .

8 $\mu_s \simeq 0,4 - 0,5$.

9 Calculons le coefficient de frottement statique pour les expériences 4 à 6.

	exp. 4	exp. 5	exp. 6
$\frac{T}{N}$	0,42	0,41	0,42

On obtient exactement les mêmes valeurs qu'à la question 4 et $\boxed{\mu_s \simeq 0,4}$.

Coulomb a fait modifier l'aire de la surface de contact mais obtient la même valeur de coefficient de frottement statique. Cela laisse penser que **μ_s ne dépend pas non plus de l'aire de la surface de contact.**

I.B Coulomb et le frottement dynamique

10 Coulomb indique que son pendule bat la demi-seconde. On peut donc penser que plus les durées sont longues devant la demi-seconde plus la mesure est précise. Si on suppose que les mesures de masse sont entachées d'une incertitude inférieure à celle des durées (en valeurs relatives), on peut penser que **les cinq dernières mesures sont plus fiables** que la première (puisque Δt_2 y est comparable à la période du pendule).

On peut aussi invoquer la non prise en compte de l'inertie de la poulie, qui peut introduire une correction sur les mesures aux plus petites masses (mais il est peu probable que ce soit ici réellement limitant, compte-tenu des masses en jeu).

11 La coordonnée x repère la position du traîneau sur l'horizontale. Après deux intégrations, on obtient $x(t) = a \frac{t^2}{2} + v(0)t + x(0)$ donc $d = a \frac{\Delta t_1^2}{2}$, car $a = C^{te}$ et $v(0) = 0$. Il s'ensuit que

$$\boxed{\Delta t_1 = \sqrt{\frac{2d}{a}}}.$$

12 En repartant de la formule précédente, on obtient que $2d = a \frac{(\Delta t_1 + \Delta t_2)^2}{2}$, si bien que $\sqrt{2}\Delta t_1 = \Delta t_1 + \Delta t_2$. Il s'ensuit que $\boxed{\Delta t_2 = (\sqrt{2} - 1)\Delta t_1}$ et $\alpha = \sqrt{2} - 1$.

13 Le coefficient $\alpha = 0,41$. En utilisant les résultats expérimentaux, on obtient :

Δt_1 (s)	1,5	14	5,5	4,5	3	4
α	0,3	0,43	0,45	0,44	0,5	0,63

On obtient un **accord qualitatif**, ce qui, en première approximation, **validerait le caractère uniformément accéléré.**

14 Pour pouvoir clairement trancher, il faudrait **augmenter le nombre de mesures** et remplacer la mesure de durée par un système de comptage plus précis (**utiliser des fourches optiques pour repérer les passages du traîneau**, remplacer le pendule par l'**horloge de l'ordinateur** qui pilote les mesures).

15 Puisque la corde est supposée tendue à tout instant (et inextensible), la norme du déplacement du traîneau durant dt est la même que celle du plateau, donc les deux objets ont la même vitesse et donc la **même accélération.**

16 Non car la valeur de α a été obtenue sans faire d'hypothèse sur la valeur des coefficients de frottement, ni même en précisant si l'on prend en compte le frottement. En particulier, l'égalité approchée $\alpha \simeq \mu_s$ est **purement fortuite !**

17 Loi de la quantité de mouvement système {plateau} (verticale descendante) donne

$$m_P a_P = -t + m_P g$$

D'après la question 15, $a_P = a$, donc $(m_{tr} + m_P) a = (m_P - m_{tr} \mu_d) g$. D'après la question 11,

$$a = \frac{2d}{\Delta t_1^2}, \text{ si bien que } \mu_d = \frac{m_P}{m_{tr}} - \frac{2d(m_{tr} + m_P)}{m_{tr} g \Delta t_1^2}.$$

18 $d = 2 \text{ pieds} = 59 \text{ cm}$. On obtient :

Δt_1 (s)	1,5	14	5,5	4,5	3	4
μ_d	0,15	0,089	0,091	0,094	0,11	0,098

Si on rejette la première mesure ($\Delta t_1 = 1,5 \text{ s}$), on peut affirmer que $\mu_d = 0,1$.

19 $\mu_d < \mu_s$. En accord avec l'expérience : il est plus « difficile » d'amorcer le glissement d'un objet, que de le maintenir en glissement, ce qui traduit que $T_{\max}^{\text{collage}} > T^{\text{glissement}}$, c'est-à-dire que $\mu_s > \mu_d$.

20 On constate que le coefficient μ_d est le même pour les deux aires étudiées dans le document 5. Il semble que μ_d soit **indépendant** de l'aire des surfaces en contact.

21 Deux approches possibles pour répondre à cette question (utiliser la loi de la quantité de mouvement ou un théorème énergétique). D'après le théorème de l'énergie cinétique (appliqué à {traîneau+plateau} dans la référence du laboratoire supposé galiléen),

$$(m_{tr} + m_P) \frac{v^2}{2} = (m_P - m_{tr} \mu_d) g L$$

où v est la vitesse du traîneau et $L = 3,0 \text{ m}$.

$$v = \sqrt{2 g L \left(\frac{m_P}{m_{tr} + m_P} - \frac{\mu_d m_{tr}}{m_{tr} + m_P} \right)} = 0,81 \text{ m/s}$$

vitesse comparable à celle de la marche d'un humain (pas si élevée), mais l'objet à stopper possède une masse de 800 kg ! On comprend pourquoi la manipulation devient dangereuse, car il était difficile d'arrêter le traîneau en bout de course.

I.C Version moderne des expériences de Coulomb

22 Le capteur permet de mesurer T .

23 Collage entre 0 et environ 4 s. Glissement entre 4 s et 7,5 s.

24 $\frac{T_{\max}^{\text{collage}}}{m_{tr} g} = \frac{0,40}{0,98}$ donc $\mu_s = 0,40$. $\frac{T^{\text{glissement}}}{m_{tr} g} = \frac{0,32}{0,98}$ donc $\mu_d = 0,33$.

25 **Oui**. Même valeur pour μ_s , mais valeur plus élevée pour μ_d .

26 Le texte indique que le glissement se fait à 20 mm/s et que cette phase dure un peu moins de 4 s. Il faut prévoir un banc d'essai d'**environ 10 cm**. Cette valeur semble en accord avec la photographie sur laquelle on voit un ordinateur portable dont la largeur est voisine du double de la longueur de la piste noire qui constitue le banc d'essai.

27 On constate que les différentes traces **ne se superposent pas**. Cela traduit l'**usure** de la surface de contact au fil des passages du traîneau.

28 À cause du phénomène d'usure, l'état de surface change et il est difficile de donner une valeur exacte des coefficients de frottement. Avec ces trois traces, on peut estimer que μ_s est compris entre 0,3 (voire moins) et 0,4. Le coefficient μ_d est compris entre 0,28 (voire moins) et 0,32.

Il

29 Plusieurs argumentations possibles :

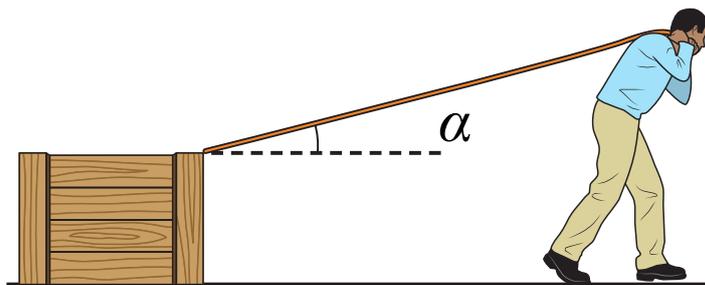
1) Si on cherche seulement à montrer expérimentalement les lois de Coulomb et l'indépendance des coefficients de frottement à la masse du traîneau (ou à la surface de contact) sans chercher à donner des valeurs numériques des coefficients de frottement, une horizontalité parfaite n'est pas requise. En revanche, il importe, dans ce cas, que toutes les expériences soient réalisées avec la même inclinaison : on mesure $\mu_s \cos \theta$ au lieu de μ_s , avec θ l'inclinaison des poutres sur l'horizontale, mais on vérifie toujours les lois de Coulomb.

2) Si on cherche à déterminer une valeur numérique pour μ_s , les poutres doivent être les plus horizontales possible (sinon on mesure $\mu_s \cos \theta$ au lieu de μ_s). Cependant, l'expérience est bien pensée. En effet, $\cos \theta \simeq 1$ (à mieux que 1% tant que θ reste inférieur à 0,14 rad soit 8° !), donc pour les petits angles, cette expérience est peu sensible à θ .

Dans tous les cas, on peut dire qu'une « bonne » horizontalité est souhaitable, mais ce n'est pas un paramètre critique pour l'expérience de Coulomb (surtout vu les incertitudes dues à la reproductibilité).

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

30 Hypothèse : on suppose le sol horizontal, on assimile la caisse à son barycentre (toute rotation autour d'une arête négligée). On se place dans le référentiel du sol supposé galiléen. On suppose qu'il y a glissement, à vitesse constante. Le système est la caisse.



Les forces prises en compte sont : le poids de la caisse (masse m), la force exercée par la corde sur la caisse (notée \vec{t}) [ou par l'homme sur la caisse s'il n'y a pas de corde], la réaction du sol. La loi de la quantité de mouvement projetée donne :

$$t \cos \alpha = T = \mu_d N \quad \text{et} \quad t \sin \alpha + N = mg$$

On en déduit que $t = \frac{mg}{\sin \alpha + \frac{\cos \alpha}{\mu_d}}$. On cherche à maximiser le dénominateur. On calcule la dérivée

de $\sin \alpha + \frac{\cos \alpha}{\mu_d}$ par rapport à α . La valeur de α qui annule la dérivée est telle que $\tan \alpha = \mu_d$.

Le résultat dépend du revêtement du sol puisqu'il dépend de μ_d . En prenant $\mu_d = 0,1$ (contact bois/bois), on obtient $\alpha \simeq 0,1$ rad soit environ 6° . Un parquet étant verni, on peut penser que l'angle idéal est plus faible. On peut insérer un tissu (ou des patins) entre la caisse et le parquet, ce qui modifie encore le coefficient de frottement et donc l'angle α .

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

II.A Expériences avec les métaux

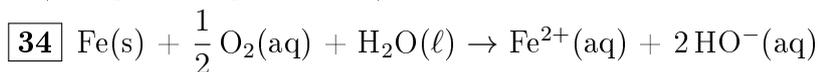
31 On détermine le coefficient de frottement statique μ_s . Pour le contact fer/fer, on obtient **0,28**. Pour le contact fer/bronze, on obtient **0,24**. Ces valeurs sont inférieures à celles du contact bois/bois ou papier/papier : il est plus facile d'amorcer le glissement entre deux surfaces métalliques qu'entre deux surfaces en bois ou couvertes de papier.

II.B Formation d'oxydes métalliques en surface

d'ions le donc des n'y a

32 $w = 2, v = 2$ et $u = \frac{1}{2}$.

33 Le système est le siège d'une réaction d'oxydo-réduction où **l'oxydation et la réduction se déroulent dans des zones spatialement séparées**, ce qui correspond exactement au fonctionnement d'une pile. La « zone où le métal est attaqué » est le siège de l'oxydation du fer en ions fer(II), c'est l'anode de la pile. La cœur de la goutte permet la circulation des ions, comme dans un pont salin, et les électrons circulent dans le métal. Ils rejoignent la cathode (zone de contact entre le bord de la goutte et le métal) et permettent la réduction du dioxygène dissous en ions hydroxyde HO^- (c.f. question précédente).



II.C Le cuivre jaune

35 D'après l'annexe, la molécule d'acétone contient une liaison $\text{C}=\text{O}$, qui lui confère une certaine polarité. L'acétone est donc susceptible de solubiliser les acides gras par des **interactions de Van der Waals**.

36 Comme les volumes versés d'acide nitrique et d'eau n'ont pas besoin d'être précis (il suffit que l'acide nitrique soit en excès par rapport à l'étain), on peut utiliser des éprouvettes graduées pour mesurer tous les volumes : une **éprouvette graduée de 25 ml** pour le prélèvement d'acide nitrique concentré et les deux prélèvements d'eau distillée, une **éprouvette graduée de 5 ml** pour prélever l'acide nitrique à 3 mol/L.

37 Le port de lunettes de protection et d'une blouse sont obligatoires. La manipulation d'acide nitrique concentré requiert également l'utilisation de gants jetables. Protocole possible :

- 1) S'équiper d'une blouse fermée et de lunettes de protection.
- 2) Placer une fiole jaugée de 25 ml sur une balance précise au 1/10 de gramme. Tarer la balance.

3) Mettre les gants. Dans un bécher de 25 ml, introduire un peu moins de 10 ml de la solution d'acide nitrique concentré. À l'aide d'une pipette Pasteur, prélever dans ce bécher la solution d'acide nitrique concentré et l'introduire jusqu'à ce que la balance affiche 5,9 g.

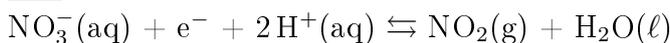
4) À l'aide d'une pissette d'eau distillée, compléter au trait de jauge. Boucher la fiole, puis la retourner plusieurs fois pour homogénéiser.

5) Enlever les gants et les jeter.

Remarques : 1) À l'étape 4, la dilution peut se faire en deux temps pour anticiper une contraction de volume.

2) $m = 5,9$ g d'acide nitrique concentré s'obtient avec $m = \frac{c \cdot V_{\text{fiole}} \cdot M_{\text{HNO}_3}}{0,80} = \frac{3,25 \cdot 10^{-3} \cdot 63}{0,80}$

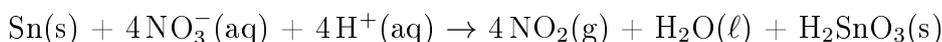
38 La demi-équation électronique impliquant le couple $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2$ est :



La demi-équation électronique impliquant le couple $\text{H}_2\text{SnO}_3/\text{Sn}$ est :



et l'équation de réaction est :



39 Le séchage est une **transformation physique** ($\text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ changement de l'environnement des molécules sans modification des liaisons au sein de la molécule, ou des noyaux). La déshydratation $\text{H}_2\text{SnO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{SnO}_2(\text{s})$ est une **transformation chimique** (modification des liaisons).

40 La masse d'étain $m(\text{Sn})$ dans l'échantillon est $m(\text{Sn}) = \frac{m(\text{SnO}_2)}{M_{\text{SnO}_2}} M_{\text{Sn}} = 11,3$ mg, ce qui conduit à un pourcentage massique de **1,1%**. Si on suppose que les masses molaires du cuivre, du zinc et de l'étain sont proches, ce pourcentage massique confirme que l'étain est effectivement présent en proportion moindre dans le laiton.

II.D Utilisation d'une huile lubrifiante

41 Bande forte vers $\sigma \simeq 1700 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \text{C}=\text{O}$ (ester ou acide);

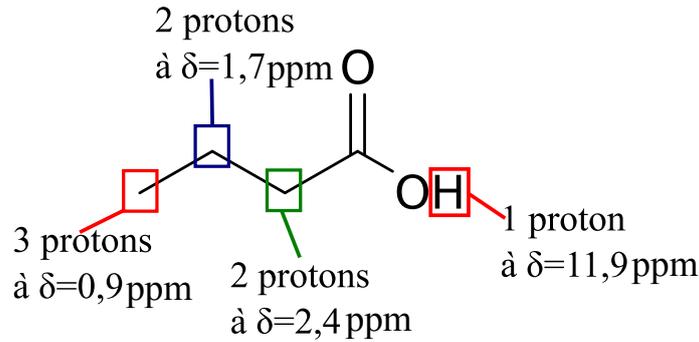
Bandes entre $\sigma \simeq 1000 \text{ cm}^{-1}$ et $1400 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \text{C}-\text{O}$;

Massif large à $\sigma \simeq 3000 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \text{O}-\text{H}$ (acide) et $\text{C}-\text{H}$;

42 Vers $\delta \simeq 12$ ppm, on identifie le proton d'un groupement $-\text{COOH}$. À l'aide de la courbe d'intégration, on trouve que :

- Le signal à $\delta \simeq 0,9$ ppm correspond à trois atomes d'hydrogène ; comme ce signal est un triplet, il s'agit sans doute d'un groupe CH_3 voisin d'un groupe CH_2 .
- Le signal à $\delta \simeq 2,4$ ppm compte pour deux protons, mais il s'agit d'un triplet, donc il s'agit sans doute d'un groupe CH_2 voisin d'un autre groupe CH_2 .
- Le signal à $\delta \simeq 1,7$ ppm compte pour deux protons et se présente sous la forme d'un sextuplet, qui équivaut à un couplage avec cinq atomes d'hydrogène voisins.

On conclut donc à un enchaînement $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}$, le dernier atome de carbone de la chaîne ne portant pas de proton.



43 Acide butanoïque.

44 En comparaison des courbes présentées sur le document 7, on constate que l'huile dérivée de l'acide butanoïque améliore le glissement tant du point de vue du coefficient μ_s qui est plus faible (on passe de 0,4–0,3 N à 0,3–0,24 N), que du coefficient μ_d (on passe de 0,32–0,24 N à 0,26–0,20 N).

45 Meilleure lubrification et surtout $\mu_s \simeq \mu_d$, autrement dit, il faut exercer la même force pour amorcer le glissement que pour l'entretenir.

46 Elles sont **diastéréoisomères**.

47 L'acide élaïdique correspond au stéréoisomère E, c'est donc la **molécule 2**.

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

48 Aspect ondulatoire : interférences avec les fentes de Young, irisation des bulles de savon, irisation d'une tache d'essence sur le sol; diffraction d'un faisceau laser par un cheveu,...

Aspect corpusculaire : expérience de Hanbury-Brown et Twiss (photon par photon), construction d'une figure de diffraction à l'aide d'une source de photons uniques.

49 \vec{E} est portée par \vec{e}_x donc vertical. Comme les électrons doivent être accélérés vers le bas et que $\vec{F} = -e\vec{E}$, il faut que \vec{E} soit vers le haut.

50 Comme \vec{E} est vers le haut, $\frac{dU(x)}{dx} > 0$ donc c'est **la grille inférieure qui est au potentiel le plus élevé**.

51 Après projection sur \vec{e}_x , $e \frac{dU(x)}{dx} = -\frac{dE_p(x)}{dx}$ donc $E_p = -eU + \text{Cte}$.

52 $\frac{dU(x)}{dx} = E > 0$ donc $U(x) = Ex + \text{Cte}'$.

53 $\Delta U = U(H) - U(0) = EH$

54 D'après le théorème de l'énergie cinétique appliqué à un électron dans le référentiel du laboratoire, supposé galiléen :

$$m \frac{v^2(H)}{2} = e \Delta U$$

si bien que $v(H) = \sqrt{\frac{2e \Delta U}{m}} \simeq 2.10^8 \text{ m/s}$ avec $m \simeq 10^{-30} \text{ kg}$.

55 Cette vitesse est **relativiste**, les calculs classiques ne sont donc pas valides.

56 L'estimation reste malgré tout valide car les ordres de grandeur sont les mêmes.

57 D'après la formule de de Broglie, $p = \frac{h}{\lambda}$ donc $\lambda \simeq \frac{h}{m v(H)} \simeq 4.10^{-12} \text{ m}$. En réalité, ici aussi, il ne s'agit que d'une estimation reposant sur un calcul classique qui n'est pas rigoureux.

58 Quelques 10^{-10} m .

59 Un vide poussé est réalisé dans l'enceinte où se propage le faisceau électronique de sorte que les électrons subissent le moins de collisions possible : cela évite une dispersion de leur direction de propagation.

60 On compare $mg \simeq 10^{-29} \text{ N}$ et $eE \simeq e \frac{\Delta U}{H} \simeq 10^{-13} \text{ N}$. Comme ces deux forces sont dans la même direction et que $mg \lll eE$, **on peut négliger le poids dans l'espace entre les grilles**.

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

61 **Oui** d'après la question 58 car la résolution du microscope est l'angstroem (taille typique des atomes).

62 Spectre **continu**. Exemple de source émettant un spectre continu : **lampes à filament**. Exemples de source émettant un spectre de raies : **lampe à vapeur de mercure/sodium, source laser**.

63 Sans dimension.

64 On cherche λ tel que $\frac{dp(\lambda)}{d\lambda} = 0$, soit $0 = -\frac{5}{\lambda_m} + \frac{hc}{\lambda_m^2 k_B T} \exp\left(\frac{hc}{\lambda_m k_B T}\right) \times \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda_m k_B T}\right) - 1}$.

Il s'ensuit que $5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda_m k_B T}\right) - 1 \right) = \frac{hc}{\lambda_m k_B T} \exp\left(\frac{hc}{\lambda_m k_B T}\right)$ d'où $5 (\exp x_m - 1) = x_m \exp x_m$. En divisant par $5 \exp x_m$, on obtient l'expression désirée avec $\beta = 5$.

65 Détermination graphique : on superpose $x \mapsto \frac{x}{5}$. L'intersection des deux courbes est en $x_m = 5,0$.

66 On en déduit que pour chaque valeur de T , il existe λ_m tel que $\lambda_m T = \frac{hc}{x_m k_B} \simeq 2,8.10^{-3} \text{ m.K}$.

67 Pour la courbe B, $\lambda_m = 6,3.10^{-7} \text{ m}$ donc $T_B = 4,4.10^3 \text{ K}$.

Remarque : on peut aussi répondre à cette question sans connaître la valeur de la constante. À l'aide du graphe (doc. 16), on a directement $T_B = \frac{\lambda_{mA}}{\lambda_{mB}} T_A$.

68 D'après l'annexe, la température de fusion est d'environ $1,4.10^3 \text{ }^\circ\text{C}$, donc à cette température $\lambda_m = 1,8.10^{-6} \text{ m}$. Le maximum de la courbe d'émission est situé dans l'infrarouge. Il est préférable d'utiliser un capteur dont la sensibilité maximale est située dans l'**infrarouge**.