

Lycée Baimbridge, MP 2026-2027

19 septembre 2026

Physique Chimie

DS 2

Types Mines

Durée : 4 heures

*Calculatrice **interdite***

Le sujet est constitué de trois parties totalement indépendantes. Les sous-parties 1.1 et 1.2 sont indépendantes. Il n'est pas nécessaire de les aborder dans l'ordre.

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

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

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

1 Expérimenter avec un morceau de scotch (Centrale)

Conditionné sous forme de rouleau, un ruban adhésif (généralement désigné par le terme Scotch®) est constitué de deux couches solidaires l'une de l'autre : une couche molle sur la face interne (celle qui colle) et une couche dure sur la face externe du rouleau (qui paraît néanmoins souple car très fine). L'épaisseur de l'ensemble est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres.

On propose d'étudier dans ce problème quelques expériences mettant en jeu les propriétés des rubans adhésifs.

1.1 Pelage d'un ruban adhésif collé sur un substrat plan

1.1.1 Principe de l'essai de pelage

Pour tester les propriétés d'adhésion d'un ruban adhésif, on réalise généralement des essais de *pelage*. Pour cela, on commence par coller le ruban adhésif à tester sur un support rigide. Puis on mesure la force $F_p = \|\vec{F}_p\|$ qu'il est nécessaire d'appliquer à l'extrémité du ruban pour le décoller du support tout en maintenant un angle θ constant entre le support et la portion de ruban décollée.

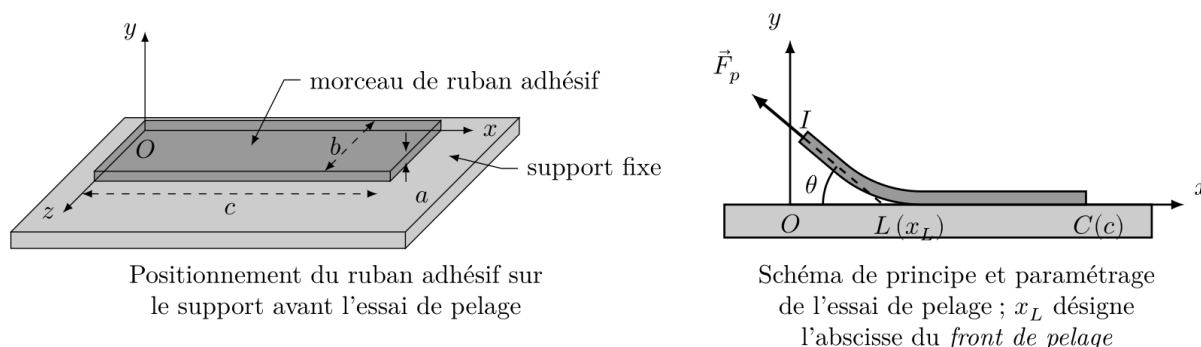


Figure 1: Pelage d'un morceau de ruban adhésif.

□ 1 – Au niveau microscopique, les interactions qui permettent l'adhésion du ruban sur le support sont des liaisons de van der Waals. Citer un autre type de liaison chimique et comparer qualitativement l'énergie de liaison de ce type de liaison à celle d'une liaison de van der Waals.

En première approximation, la force de van der Waals entre deux molécules distantes de r dérive du potentiel de Lennard-Jones $E_{LJ}(r) = \frac{\alpha}{r^{12}} - \frac{\beta}{r^6}$, où α et β sont deux constantes positives.

□ 2 – Identifier, en justifiant la réponse, le caractère attractif ou répulsif de chacun des deux termes figurant dans cette expression.

□ 3 – Représenter l'allure de E_{LJ} en fonction de r . Indiquer graphiquement à quoi correspond l'énergie de liaison entre les deux molécules.

□ 4 – Justifier qualitativement que le travail W_{adh} que doit fournir l'opérateur pour décoller le ruban adhésif du support est proportionnel à l'aire A de la surface de contact entre le ruban et son support.

Pour la suite du problème, on note $W_{adh} = \gamma A$, où γ est une constante positive caractéristique du ruban et du support mis en contact.

On considère dans les deux questions suivantes que le décollement se fait de façon quasi-statique et que le ruban est parfaitement inextensible. Le problème étant invariant par translation selon Oz , on raisonne dans le plan Oxy . On rappelle que l'angle θ reste constant au cours de cette opération.

□ 5 – Exprimer le déplacement élémentaire $d\vec{\ell}_I$ du point I (point d'application de la force $\vec{F}_p$) lorsque le front de pelage progresse de dx_L , ainsi que le travail δW_p de la force de pelage associé à cette progression.

□ 6 – En déduire l'expression de la force de pelage F_p en fonction de γ , b et θ .

1.1.2 Dispositif de pelage

Le dispositif utilisé en pratique est représenté sur la figure suivante. Le pelage est réalisé au moyen d'une tige horizontale, de rayon r_0 , en rotation autour de son axe, et sur laquelle s'enroule le ruban au cours de l'essai (l'axe de la tige est fixe dans le référentiel du laboratoire et situé à une hauteur ℓ_0 au-dessus du support). Le support sur lequel est collé l'autre extrémité du ruban est animé d'un mouvement de translation horizontale à la vitesse constante $\vec{V}_0$ dans le référentiel du laboratoire.

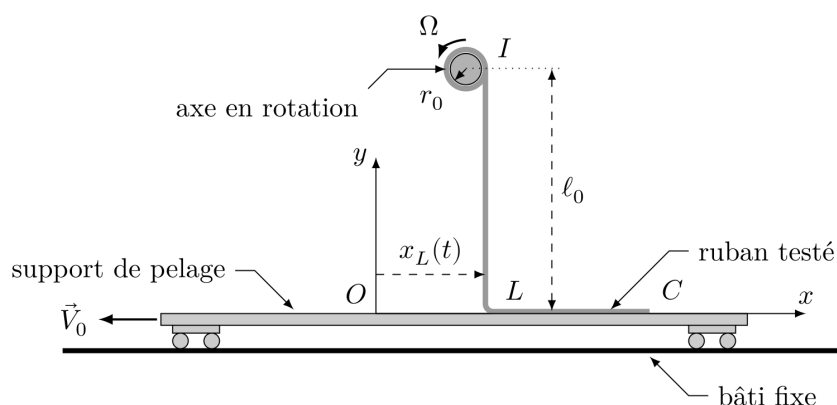


Figure 2: Schéma du dispositif pratique utilisé pour l'essai de pelage. Le repère Oxy est lié au support de pelage. Les points I et L correspondent aux limites entre les parties collée et décollée du ruban.

□ 7 – Le repère Oxy étant lié au support, quelle loi d'évolution $x_L(t)$ devrait-on observer si l'angle θ reste constant ?

□ 8 – On rappelle que le ruban est supposé inextensible. Comment doit-on choisir Ω et $\|\vec{V}_0\|$ pour maintenir un angle de pelage constant au cours de l'essai ?

□ 9 – Initialement, le ruban est positionné de sorte à avoir un angle de pelage $\theta \approx 90^\circ$. Commenter ce choix.

1.1.3 Modélisation du comportement dynamique du ruban au cours de l'essai

La loi d'évolution de $x_L(t)$ prévue précédemment n'est pas toujours observée en pratique car le ruban présente un comportement légèrement élastique. Au début de l'essai, le ruban commence en effet par se tendre sans se décoller. Puis, lorsque la tension est suffisante, le décollement se produit brutalement, réduisant par conséquent la tension. Le décollement s'arrête alors spontanément, jusqu'à ce que la poursuite du mouvement tende suffisamment le ruban pour que le décollement reprenne, et ainsi de suite... Ce phénomène périodique, connu sous le nom de *stick-slip* (ou *collé-glissé*), est à l'origine du bruit caractéristique du décollement d'un ruban adhésif : *scriiich*.

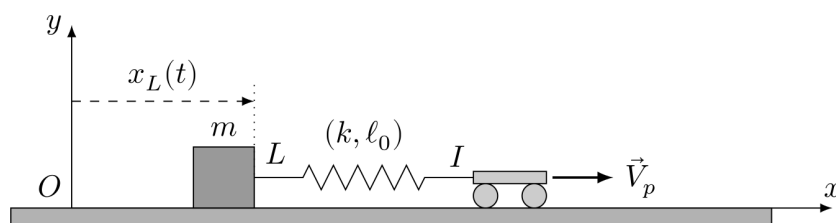


Figure 3: Système modèle pour l'étude du mouvement stick-slip

Dans le référentiel $\mathcal{R}$ lié au support de pelage, la dynamique du front de pelage s'apparente à celle du système masse-ressort représenté sur la figure. La portion de ruban au contact du support est modélisée par la masse m tandis que la portion décollée du ruban est modélisée par le ressort de raideur k , de longueur à vide ℓ_0 et dont l'extrémité I est animée d'un mouvement rectiligne et uniforme à la vitesse $\vec{V}_p = -\vec{V}_0$. L'action du support sur le ruban est modélisée par une force de frottement $\vec{f} = f\vec{u}_x$ obéissant aux lois suivantes :

- la masse m ne glisse pas sur le support tant que $\|\vec{f}\| < F_p$;
- lorsque la masse m glisse sur le support, la force $\vec{f}$ s'oppose au glissement et $\|\vec{f}\| = (1 - \varepsilon) F_p$ (avec ε une constante telle que $0 < \varepsilon < 1$).

On néglige l'action de la pesanteur sur l'évolution du système.

□ 10 – Le référentiel $\mathcal{R} (Oxyz)$ lié au support de pelage peut-il être considéré comme galiléen ?

□ **11** – Commenter la modélisation de la force vis-à-vis des lois de Coulomb du frottement solide. Relier ϵ aux coefficients de frottement statique et dynamique.

□ **12** – À l'instant $t = 0$, on a $x_L(0) = 0$ et $\ell(0) = \ell_0$. Exprimer la longueur $\ell(t)$ du ressort pour $t > 0$, en fonction de ℓ_0 , $V_p = \|\vec{V}_p\|$, $x_L(t)$ et t .

□ **13** – On suppose de plus que $\dot{x}_L(0) = 0$. Montrer que l'évolution du système pour $t > 0$ commence nécessairement par une phase de *stick* (le ruban se tend sans se décoller). Déterminer à quel instant t_0 se termine cette phase.

□ **14** – Établir l'équation du mouvement de la masse m lors de la phase suivante (phase de *slip*). Identifier la pulsation propre ω_0 du système.

La solution de l'équation précédente s'écrit sous la forme

$$x_L(t') = C_1 \cos(\omega_0 t') + C_2 \sin(\omega_0 t') + V_p t' + C_3 \quad \text{avec} \quad t' = t - t_0$$

□ **15** – Déterminer les expressions des constantes C_1 , C_2 et C_3 correspondant à cette phase du mouvement.

Une simulation numérique permet de représenter l'évolution de la solution *mathématique* $x_L(t')$ précédente pour différentes valeurs de la vitesse de pelage V_p . Les paramètres choisis pour réaliser cette simulation sont :

$$\epsilon = 0.15 \quad \frac{F_p}{k} = 1.0 \text{ mm} \quad \omega_0 = 1.0 \cdot 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Les courbes correspondant à $V_p = 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $V_p = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sont reproduites sur les figures du document-réponse. Ces courbes sont accompagnées des portraits de phase du système, pour lesquels on représente $v_L(t') = \frac{dx_L}{dt'}(t')$ en fonction de $\ell(t') - \ell_0$.

□ **16** – Faire apparaître, sur chacun des deux portraits de phase du document-réponse, le point représentatif de l'instant $t' = 0$. Indiquer, en le justifiant, quel est le sens de parcours de ces portraits de phase.

□ **17** – En justifiant votre raisonnement par des *considérations graphiques précises*, indiquer, pour chacune des deux vitesses de pelage, si la phase de *slip* perdure indéfiniment ou si elle cesse à un instant t'_1 que l'on identifiera clairement sur les courbes.

□ **18** – Dans le(s) cas où la phase de *slip* cesse, représenter (directement sur les figures du document réponse) l'allure de la solution *physique* $x_L(t')$ réellement obtenue et du portrait de phase associé.

1.2 Exfoliation du graphène

Le graphène est un cristal bidimensionnel, constitué d'atomes de carbone répartis régulièrement sur un réseau hexagonal en forme de nid d'abeille. En appliquant un simple morceau de Scotch sur un cristal de graphite, les physiciens Konstantin Novoselov et Andre Geim ont réussi, en 2004, à isoler et à observer une unique feuille de graphène. Ils ont reçu le prix Nobel de physique en 2010 pour ces travaux. Le graphène s'est avéré être un matériau fascinant, aux propriétés électroniques exceptionnelles et donne lieu, depuis 2004, à des recherches variées à la fois en physique fondamentale et en physique appliquée.

1.2.1 Le carbone

Le carbone présente des isotopes : les carbones 12, 13 et 14 de masses molaires respectivement $12.0000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $13.0000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et $14.0000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

□ **19** – Qu'est-ce qu'un isotope ? On pourra s'aider d'un exemple autre que le carbone.

□ **20** – Sachant que la masse molaire du carbone naturel est de $12.0111 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et en supposant que celui-ci ne contient pas de carbone 14, donner les fractions massiques des carbones 12 et 13.

□ **21** – Donner la position du carbone ($Z = 6$) et de l'oxygène ($Z = 8$) dans le tableau périodique, ainsi que leur nombre d'électrons de valence.

□ **22** – Donner la représentation de Lewis de ces deux éléments et proposer une structure de Lewis pour les molécules de CO_2 et de CO .

□ **23** – La molécule de CO_2 (linéaire) présente-t-elle un caractère dipolaire ? Et celle de CO ? Justifier.

1.2.2 Diagramme de phases du carbone

Le carbone solide existe sous deux variétés allotropiques aux propriétés physico-chimiques très différentes : le diamant (dur, cassant, transparent, isolant) et le graphite (mou, noir, conducteur). On donne sur la figure ci-dessus le diagramme d'état du carbone.

□ **24** – Quelle est la forme stable du carbone à 0°C sous 1 bar ?

□ **25** – Sous quelles pressions le graphite peut-il se transformer en diamant ? Où peut-on rencontrer de telles pressions ?

□ **26** – Comment expliquer que des diamants puissent être achetés dans des bijouteries ?

Structure cristallographique du diamant

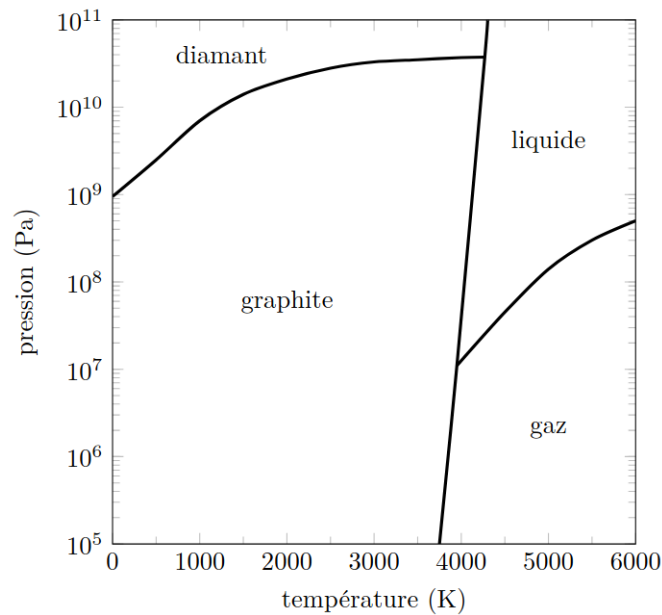


Figure 4: Diagramme de phases du carbone.

Le diamant cristallise dans une structure cubique telle que les atomes de carbone forment un réseau cubique à faces centrées et occupent un site tétraédrique sur deux en alternance.

- ☐ **27** – Dessiner la maille du diamant.
- ☐ **28** – Quelle est la compacité de l'édifice en supposant qu'il y a tangence entre atomes de carbone les plus proches ?
- ☐ **29** – La masse volumique du diamant vaut $3250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. En déduire la distance séparant deux atomes de carbone.

Structure cristallographique du graphite

Le graphite présente une structure en feuillets superposés de type ABAB. Au sein d'un même feuillet, les carbones ont une géométrie trigonale plane avec des angles de 120° et des longueurs de liaison de 141 pm. La maille hexagonale associée à la structure est représentée ci-dessous.

- ☐ **30** – Déterminer le nombre d'atomes en propre par maille.
- ☐ **31** – La densité du graphite étant d'environ 2,1, en déduire une estimation de la distance entre deux feuillets. (*Cette question demande une certaine prise d'initiative*)
- ☐ **32** – En comparant les différentes distances entre atomes de carbone rencontrées dans cette partie, discuter la nature des liaisons C-C dans le diamant, dans les feuillets du graphite et entre les feuillets du graphite. Commenter.

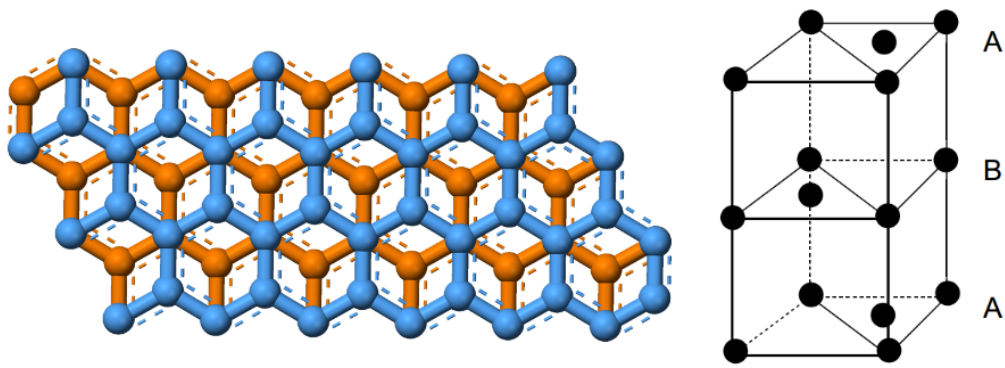


Figure 5: A gauche : représentation schématique des feuillets de graphite vus de dessus. A droite : maille hexagonale du graphite.

1.2.3 Du graphite au graphène

Le graphène correspond à un unique feuillet d'atomes de carbones constituant le graphite. La figure ci-dessous explique comment obtenir un tel feuillet à partir d'un bloc de graphite (tiré d'une mine de crayon par exemple) et d'un morceau de ruban adhésif.

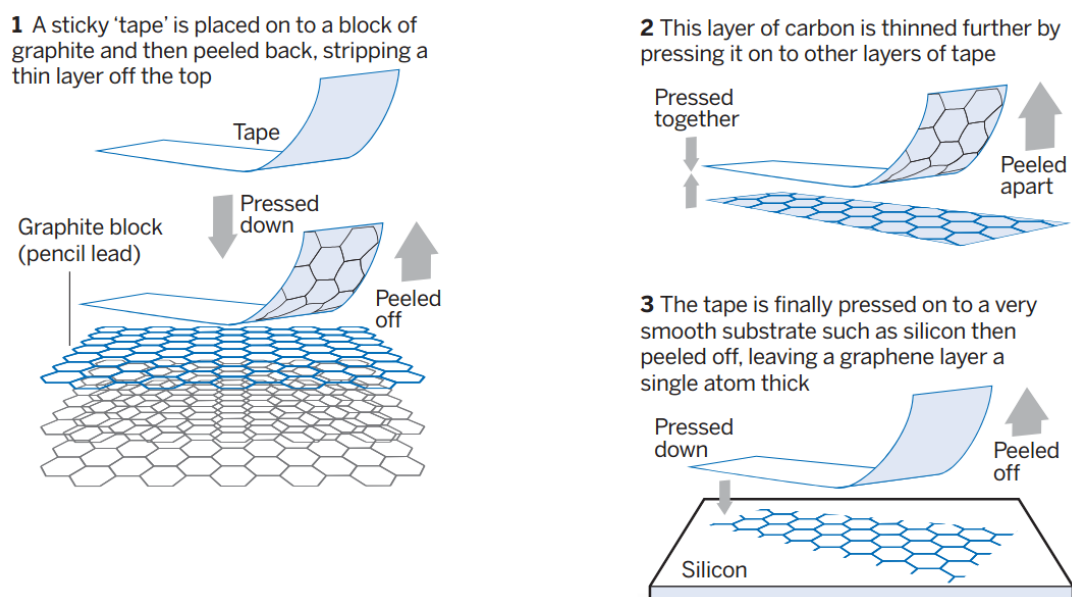


Figure 6: Illustration extraite de l'article *Faster, stronger, bendier* de Clive Cookson, publié dans *Financial Times* du 28 janvier 2013

- **33** – À partir d'arguments qualitatifs uniquement, justifier la faisabilité d'un tel procédé.
- **34** – Dans le domaine de la recherche, le graphène est particulièrement étudié pour ses propriétés électroniques exceptionnelles. Comment expliquer simplement les propriétés conductrices du graphène ?

2 Fonctionnement d'un accéléromètre par effet capacitif (X/ENS)

Une centrale inertielle est un ensemble d'accéléromètres et de gyromètres qui mesure l'accélération et la vitesse angulaire d'un mobile et permet de le positionner dans l'espace. La miniaturisation et le désormais faible coût de ces capteurs permettent de les intégrer dans de nombreux dispositifs électroniques embarqués. On les retrouve par exemple dans les systèmes de navigation automobile pour pallier la perte momentanée du signal GPS, dans les disques durs d'ordinateurs portables pour prévenir des chocs éventuels et protéger les têtes de lecture, dans les smartphones ou dans les manettes de jeu vidéo pour détecter les mouvements du joueur.

Les accéléromètres sont généralement constitués d'une masse attachée à un ressort. En mesurant la position de la masse d'épreuve, il est possible de déterminer l'accélération de l'appareil.

On étudie ici le système de détection du déplacement de la masse d'épreuve de l'accéléromètre. Une première méthode est la détection capacitive dont le principe est présenté sur la figure ci-dessous. Une électrode est déposée sur la masse d'épreuve et fait face à une électrode fixe, le tout formant un condensateur. Un mouvement de la masse d'épreuve modifie la distance entre les électrodes et donc la capacité de ce condensateur.

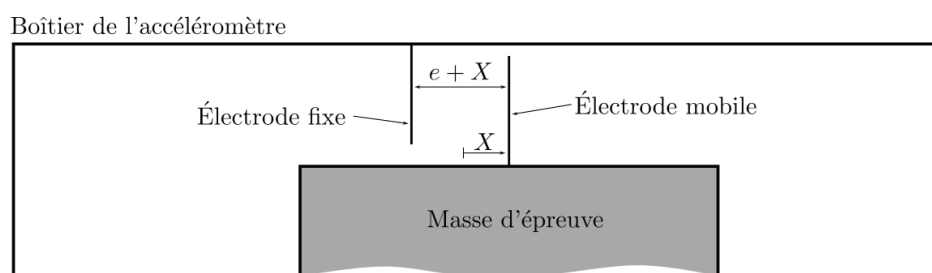


Figure 7: Mesure capacitive de la position de la masse d'épreuve.

La mesure du déplacement de la masse d'épreuve revient donc à une mesure électronique de la capacité d'un condensateur. On assimile les deux électrodes à deux plans infinis parallèles séparés d'une distance $e + X$. La différence de potentiel entre l'électrode fixe et l'électrode mobile est U .

□ **35** – Etablir l'expression du champ électrique entre les deux électrodes du condensateur en fonction de U, e, X . On précisera la méthode et les arguments de symétrie employés.

□ **36** – En déduire l'expression de la capacité C_1 du condensateur formé par les deux électrodes. On exprimera le résultat en fonction de e, X , et de la capacité C du condensateur pour $X = 0$, dont on précisera l'expression.

Cette méthode capacitive est couramment utilisée pour détecter des déplacements d'objets massifs. Cependant la capacité C_1 ne dépend pas linéairement du déplacement X et dans les accéléromètres miniatures la force électrostatique produite par le système de détection peut se révéler gênante.

□ **37** – Donner la force qu'exerce l'électrode fixe sur l'électrode mobile en fonction de U, e, X , et C . On précisera si cette force est attractive ou répulsive.

Les caractéristiques typiques d'un accéléromètre miniature sont $C = 0.1 \text{ pF}$, $e = 1 \text{ }\mu\text{m}$, $U = 1 \text{ V}$ et la masse d'épreuve est de $1 \text{ }\mu\text{g}$.

□ **38** – Pour $X = 0$, donner l'ordre de grandeur de la force électrostatique s'exerçant sur l'électrode mobile et discuter de la possibilité de réaliser une mesure capacitive du déplacement de la masse d'épreuve d'un accéléromètre prévu pour mesurer des accélérations de $1g$.

Dans les systèmes miniatures tels que l'accéléromètre ADLX, une seconde électrode fixe est placée symétriquement par rapport à $X = 0$ (voir figure). La distance entre cette électrode et l'électrode mobile est donc $e - X$. La première électrode fixe est portée au potentiel V_s , la seconde au potentiel $-V_s$. On mesure alors le potentiel de l'électrode mobile.

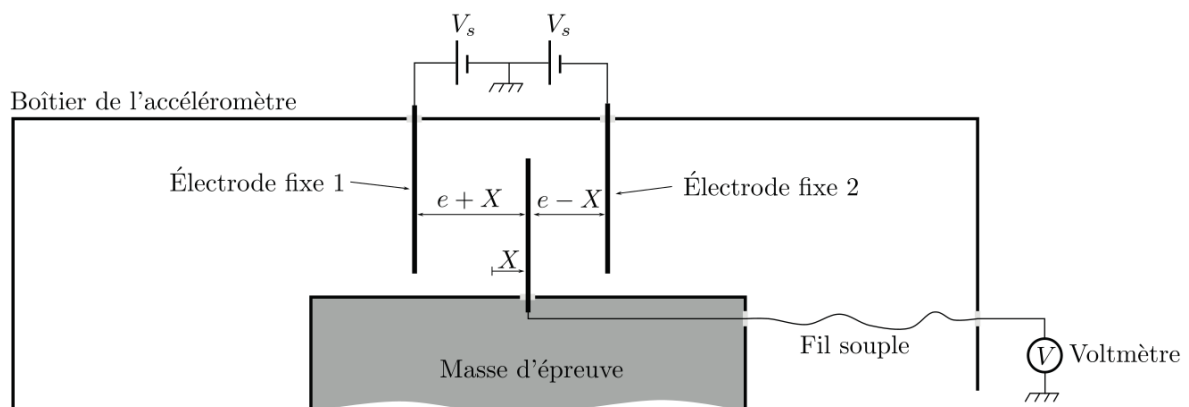


Figure 8: Mesure électrostatique de la position à deux électrodes fixes.

□ **39** – En considérant que l'électrode mobile reste isolée et globalement neutre, donner le potentiel V de l'électrode mobile en fonction X, e , et V_s .

□ **40** – Dans cette configuration, quelle est la force électrostatique s'exerçant sur l'électrode mobile ?

□ **41** – Dédurre des deux questions précédentes l'avantage d'un système possédant 2 électrodes fixes par rapport à celui à une seule électrode fixe.

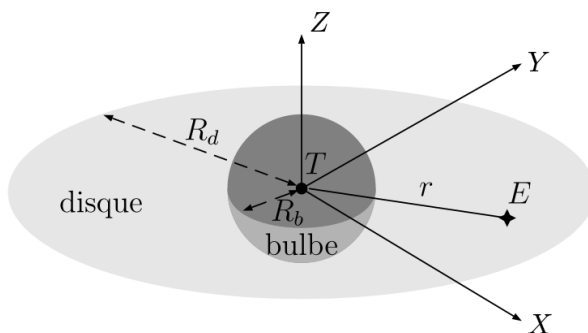
3 Étude des galaxies (Mines)

3.1 Répartition de masse

On modélise une galaxie comme la Voie Lactée par un bulbe sphérique de rayon $R_b = 2 \text{ kpc}$ entouré d'un disque de rayon $R_d = 15 \text{ kpc}$ (cf figure suivante). Au centre de la galaxie se trouve un trou noir ponctuel T de masse $M_T = 4 \cdot 10^6 M_\odot$ où $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ désigne la masse du Soleil.



(a) Photographie d'une galaxie par le télescope Hubble



(b) Schéma simplifié et annoté

Figure 9: Photo et modélisation d'une galaxie.

On considère dans un premier temps une étoile E de masse $M_\odot$ qui ne serait soumise qu'à la seule attraction gravitationnelle du trou noir T . Elle décrit une trajectoire circulaire de rayon r dans le plan du disque (T, XY) .

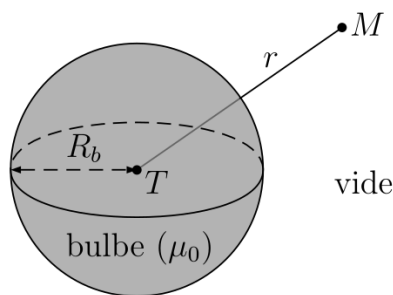
□ **42** – Montrer que le mouvement est uniforme. Exprimer la vitesse $v(r)$ et la période τ du mouvement de l'étoile en fonction de r et des données.

□ **43** – Pour le Soleil, situé à 8 kpc du centre galactique, des observations fournissent une vitesse de $200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Le trou noir seul peut-il en être la cause ?

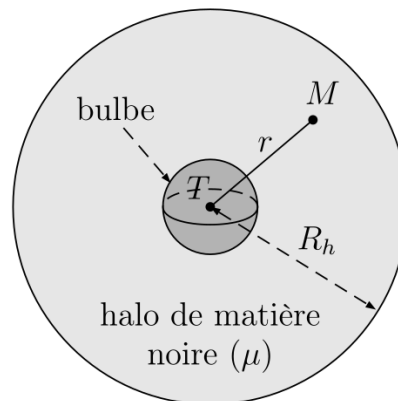
On néglige dorénavant l'influence gravitationnelle du trou noir devant celle du bulbe de masse $M_b = 2 \cdot 10^{11} M_\odot \gg M_T$. On repère un point M de l'espace par ses coordonnées sphériques de centre T et le vecteur $\overrightarrow{TM} = r\vec{u}_r$. Pour une galaxie, on adopte le modèle suivant :

- Bulbe, $r \in [0, R_b]$: boule de matière répartie uniformément de masse volumique μ_0 ;
- Disque, $r \in [R_b, R_d]$: infiniment mince et très faible densité de matière, assimilée au vide.

□ **44** – Grâce à une analogie électrostatique, justifier que le théorème de Gauss pour le champ gravitationnel $\vec{g}$ s'écrit $\oint_S \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{\text{int}}$ où M_{int} désigne la masse située à l'intérieur de la surface fermée S .



(a) Influence gravitationnelle du bulbe



(b) Présence de matière noire

Figure 10: Modèles galactiques.

□ **45** – Déterminer, en fonction notamment de M_b , le champ gravitationnel créé en un point M de l'espace, selon que $r \leq R_b$ ou $R_b \leq r \leq R_d$.

□ **46** – En déduire la vitesse v_0 d'une étoile en mouvement circulaire de rayon r dans ces deux domaines, puis tracer l'allure de la courbe $v_0(r)$. Justifier quel domaine suit les lois de Kepler.

Le modèle précédent s'appuie sur la répartition de masse de la matière visible (étoiles et gaz interstellaire). Il n'est pas compatible avec les observations, car les étoiles situées dans le disque ($R_b \leq r \leq R_d$) possèdent une vitesse de rotation indépendante de r . Pour interpréter ce fait, on postule l'existence d'un gigantesque halo de matière non visible, appelée matière noire, entourant le bulbe. Les caractéristiques de ce nouveau modèle sont les suivantes :

- La matière noire est sensible à l'interaction gravitationnelle ;
- Le halo de matière noire, de forme sphérique, s'étend de R_b à $R_h = 100 \text{ kpc}$ avec une masse volumique $\mu(r)$;
- à l'intérieur du halo de matière noire, le bulbe n'a aucun effet gravitationnel ;
- Les étoiles du disque décrivent des mouvements circulaires de vitesse v_1 constante.

□ **47** – A partir du théorème de Gauss, déterminer, en tout point M de l'espace, $\mu(r)$ dans le halo en fonction de v_1 , G et r . Retrouver ce résultat, à un préfacteur numérique près, par analyse dimensionnelle.

□ **48** – Pour $v_1 = 200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, exprimer puis calculer la masse de matière noire dans la galaxie en unités de masses solaires. Quel pourcentage de la masse galactique représente-t-elle ?

3.2 Formation d'étoiles

Les galaxies sont connectées entre elles par une grande "toile cosmique" résultant de la compétition entre l'expansion de l'univers, qui tend à le disperser, et la gravitation, qui tend à le concentrer. La capacité d'une galaxie à produire de nouvelles étoiles résulte également de cette compétition :

- L'apport de matière issu notamment des filaments de la toile cosmique qui confèrent sa masse à la galaxie ;
- La consommation de matière dans les étoiles déjà formées.

La figure suivante regroupe des résultats de mesure pour des galaxies situées dans l'environnement proche de la Voie Lactée. Ils montrent que le taux de formation d'étoiles $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$ (en $M_\odot/\text{an}$) au sein d'une galaxie est lié à la masse m de l'ensemble des étoiles qu'elle contient (en $M_\odot$). En échelle logarithmique, les galaxies se répartissent principalement le long d'une droite appelée séquence principale.

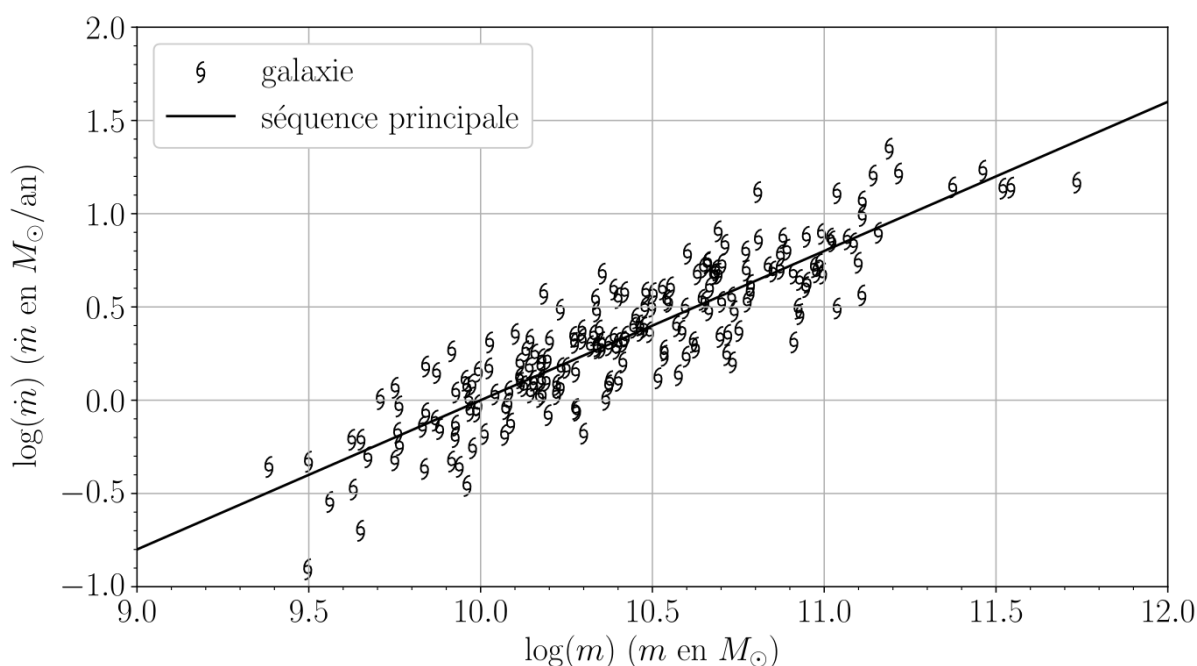


Figure 11: Séquence principale des galaxies.

□ **49** — Pour des galaxies de la séquence principale, écrire l'équation différentielle vérifiée par $m(t)$ sous la forme $\dot{m} = \alpha_0 m^{\beta_0}$ où α_0 et β_0 sont des paramètres numériques à estimer en conservant les unités du graphe.

□ **50** — Justifier pourquoi la création d'étoiles est plus efficace dans les galaxies les moins massives. Quelle inégalité devrait vérifier β_0 pour que ce ne soit plus le cas ?

On note m_0 la masse d'une galaxie à un instant $t = 0$ pris comme origine des temps.

□ **51** – Déterminer $m(t)$ puis tracer et commenter l'allure de la courbe correspondante. On montrera notamment l'existence de deux régimes limites liés à une durée caractéristique τ_0 à introduire.

On quantifie l'éloignement d'une galaxie à la nôtre, dû à l'expansion de l'Univers, par un paramètre $z \geq 0$ appelé redshift. Chaque valeur de z correspond à une certaine durée Δt écoulée depuis l'origine de l'univers appelée Big Bang :

- $z = 0$ désigne l'instant présent soit $\Delta t = 13.8$ milliards d'années après le Big Bang ;
- $z \rightarrow +\infty$ caractérise le Big Bang soit $\Delta t = 0$;
- Pour $z > 1$ cette correspondance est donnée par la relation approchée :

$$\frac{1}{1+z} \approx \frac{3}{4} (H_0 \Delta t)^{2/3} \quad \text{avec} \quad H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

H_0 est appelée constante de Hubble.

La figure précédente, obtenue pour des galaxies dans l'environnement proche de la Voie Lactée, fournit une image de la séquence principale dans le présent ($z = 0$). Récemment, l'observation de galaxies très lointaines a permis de tracer cette même séquence à $z = 2$. Son évolution est représentée sur la figure suivante.

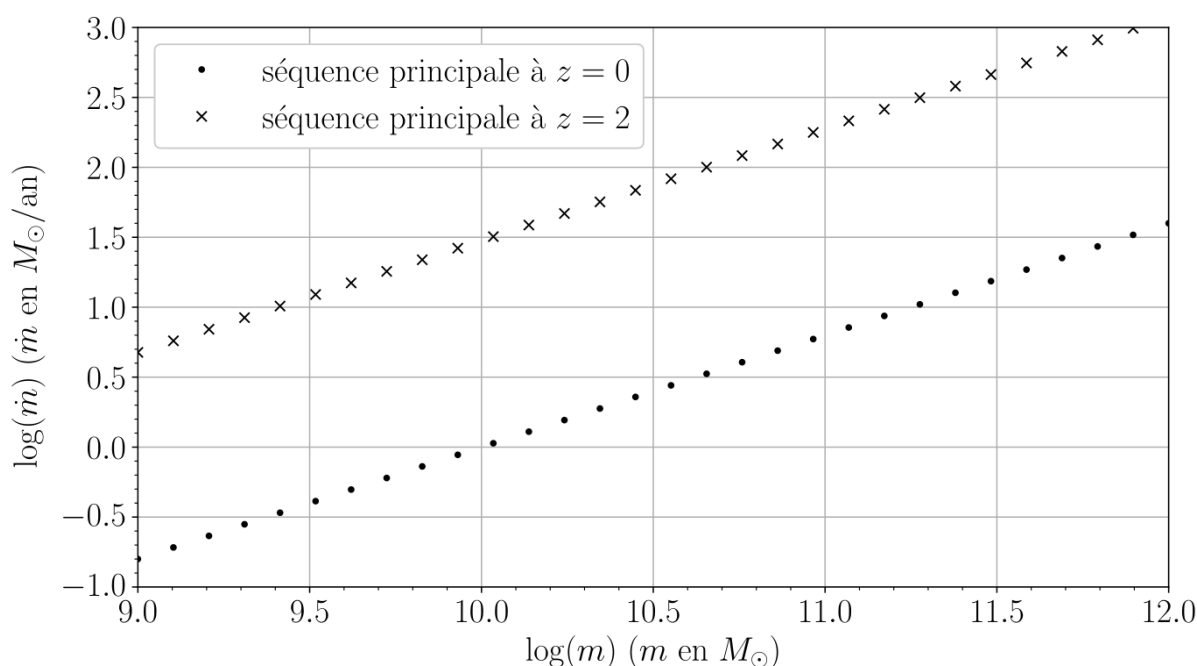


Figure 12: Evolution du taux de formation d'étoiles en fonction du redshift z .

□ **52** – En milliards d'années, quelle durée s'est écoulée depuis le Big Bang, pour des mesures effectuées à $z = 2$?

□ **53** – Dans quelle proportion le taux de formation d'étoiles a-t-il évolué entre $z = 2$ et $z = 0$? Proposer une explication à cette observation.

Données numériques

- Constante de gravitation : $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
- Le parsec est une unité de longueur utilisée en astronomie :

$$1 \text{ pc} = 3 \times 10^{16} \text{ m} \quad 1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc} \quad 1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$$

- Masse du Soleil : $1M_{\odot} = 2^{30} \text{ kg}$
- On prendra 1 année = $3 \times 10^7 \text{ s}$