BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

ÉPREUVE D'ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

SESSION 2026

PHYSIQUE-CHIMIE

Jour 1

Durée de l'épreuve : **3 heures 30**

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.

L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collège » est autorisé.

Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.

Ce sujet comporte 12 pages numérotées de 1/12 à 12/12.

EXERCICE 1 - Synthèse d'une Coumarine (9 points)

La synthèse de la coumarine fut l'une des premières synthèses réalisées vers la fin du XIX^{e} siècle par le chimiste anglais William H. Perkin. Les coumarines possèdent des propriétés anticoagulantes. La famille des coumarines est formée des composés dérivés de la coumarine simple de formule brute $C_9H_6O_2$, dont la formule topologique est représentée en **Figure 1**.

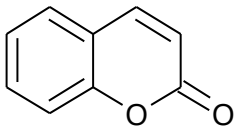


Figure 1. Formule topologique de la coumarine simple

L'objectif de cet exercice est de comparer deux méthodes de synthèse d'une coumarine ainsi que leurs rendements. L'une de ces méthodes met en jeu de l'acide sulfamique, dont les propriétés sont étudiées en première partie, les deux autres parties étant consacrées aux méthodes de synthèse proprement dites.

1. Étude de l'acide sulfamique par pH-métrie

Donnée :

- concentration en quantité de matière standard $c^o = 1\ \text{mol·L}^{-1}$.

Q1. Montrer que pour une solution aqueuse d'un acide fort quelconque AH appartenant à un couple AH/A^- de concentration en quantité de matière apportée en acide fort C, le pH de la solution s'exprime par la relation : $pH = -\log\left(\frac{C}{c^o}\right)$.

On souhaite s'assurer que l'acide sulfamique, de formule NH_2SO_3H, a un comportement d'acide fort par des mesures de pH. Cet acide appartient au couple acide-base $NH_2SO_3H(aq)$ / $NH_2SO_3^-(aq)$.

On commence par préparer, à partir d'une solution S d'acide sulfamique de concentration en quantité de matière $C = 1{,}0\times10^{-1}\ \text{mol·L}^{-1}$, une solution S_1 d'acide sulfamique de volume $V_1 = 100{,}0$ mL et de concentration $C_1 = 1{,}0\times10^{-2}\ \text{mol·L}^{-1}$.

Q2. Calculer le volume V' de solution S à prélever et détailler le protocole pour préparer la solution S_1.

Q3. Écrire l'équation modélisant la réaction entre l'acide sulfamique et l'eau.

On réalise ensuite plusieurs solutions aqueuses S_n d'acide sulfamique de concentrations C_n en quantités de matière différentes dont on mesure la valeur du pH. L'évolution du pH mesuré en fonction de $-\log\left(\frac{C_n}{c^o}\right)$ est représentée sur la **Figure 2**.

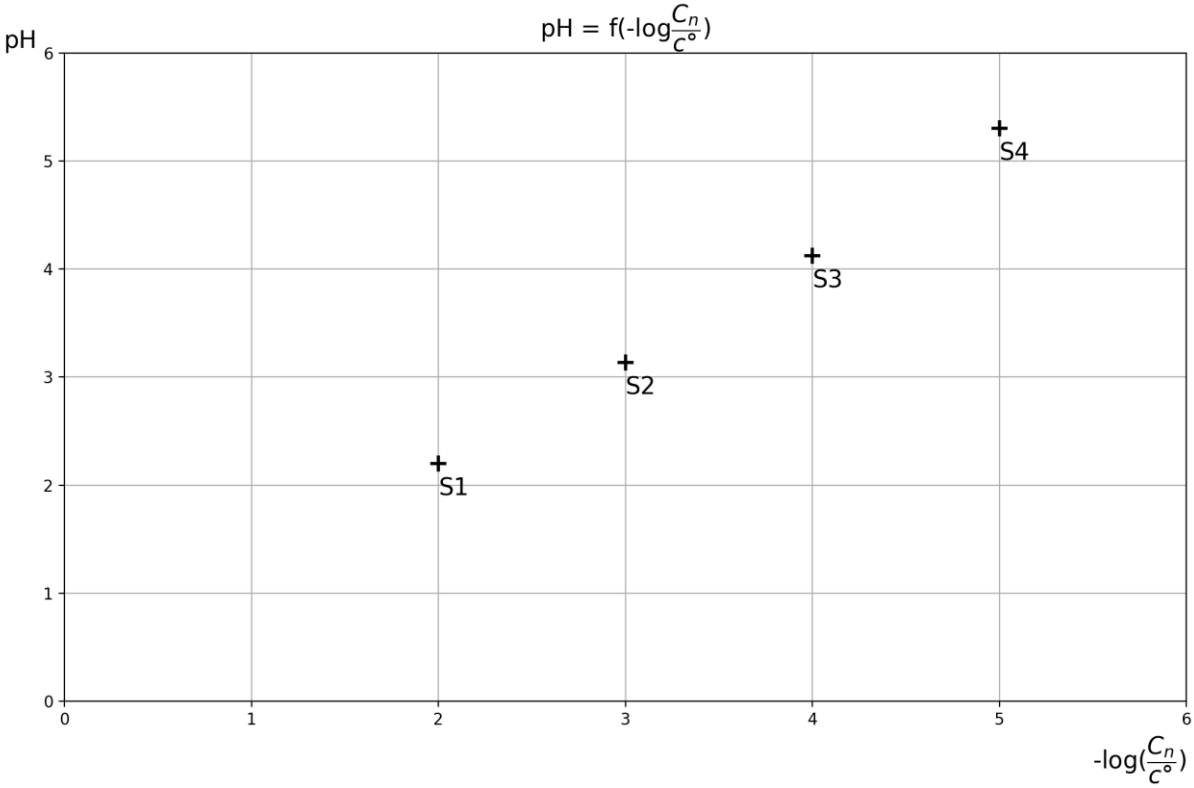
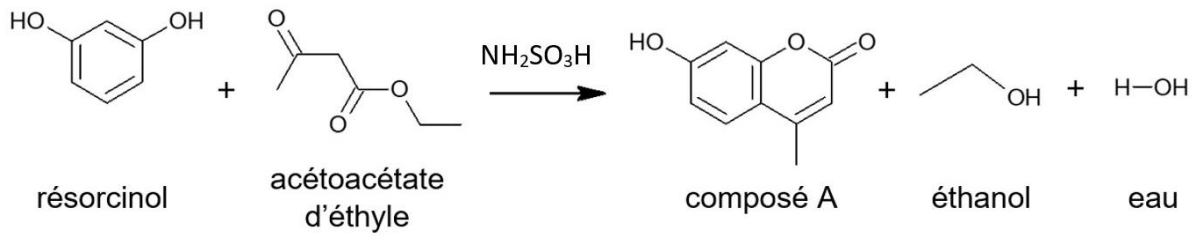


Figure 2. Évolution de la valeur du pH en fonction de –log ($\frac{C_n}{c°}$)

Q4. À l'aide de la **Figure 2**, vérifier que l'acide sulfamique peut être considéré comme un acide fort.

2. Synthèse d'une coumarine en présence d'acide sulfamique

On étudie la synthèse du composé 7-hydroxy-4-méthylcoumarine, dérivé de la coumarine simple et noté « composé A », en présence d'acide sulfamique. La transformation chimique est modélisée par l'équation de réaction représentée ci-dessous.



Cette transformation est effectuée en 20 minutes à la température de 130°C.

On réalise le spectre infrarouge du produit obtenu, il est représenté **Figure 3**.

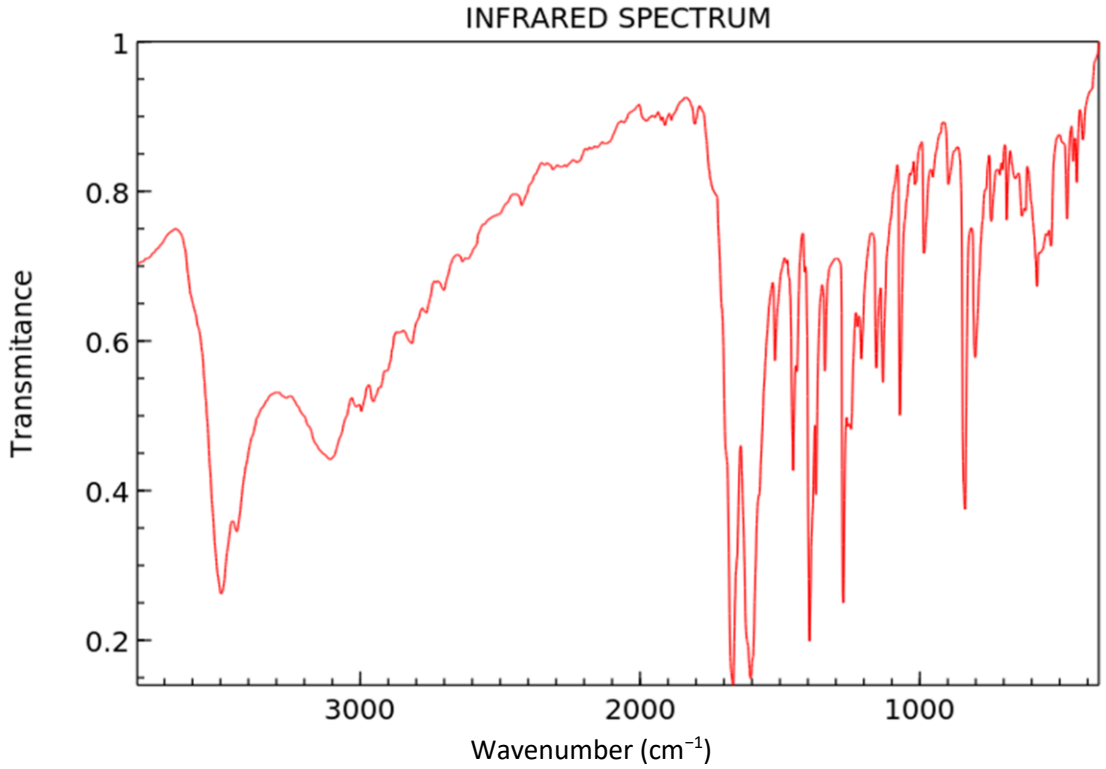


Figure 3. Spectre infrarouge du produit obtenu

Données : Table de données pour la spectroscopie infrarouge

Liaison	**σ (cm^{-1})**	**Intensité**
O − H	3500 − 3700	Forte, fine
O − H acide carboxylique	2500 − 3200	Forte à moyenne, large
C = O	1650 − 1740	Forte
C − O	1040 − 1300	Forte à moyenne
N − H	1560 − 1640	Forte à moyenne

Q5. Montrer que le spectre infrarouge du produit obtenu est compatible avec la structure de la molécule de la 7-hydroxy-4-méthylcoumarine (composé A).

Les propriétés physicochimiques des divers composés considérés sont présentées dans le tableau ci-après.

	Résorcinol	**Acétylacétate d'éthyle**	**Composé A 7-hydroxy-4-méthylcoumarine**
Formule chimique	$C_6H_6O_2$	$C_6H_{10}O_3$	$C_{10}H_8O_3$
Masse molaire M ($g \cdot mol^{-1}$)	110	130	176
Densité d	1,08	-	-

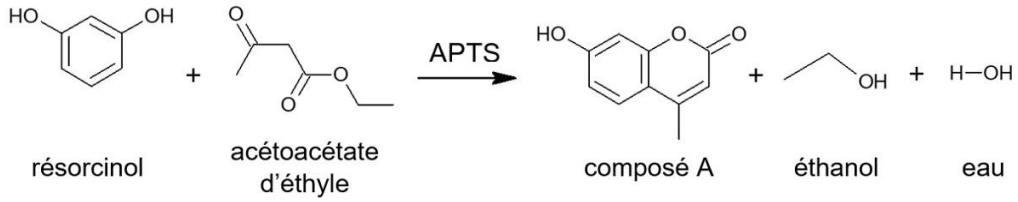
On réalise la réaction en introduisant dans un ballon un volume V_R = 11,1 mL de résorcinol et une masse m_{AE} = 14,2 g d'acétylacétate d'éthyle.

Le produit obtenu, après purification, est sous forme de cristaux de masse : m = 12,4 g**.**

Q6. Calculer la valeur du rendement η_1 de cette synthèse.

3. Synthèse d'une coumarine en présence d'acide paratoluènesulfonique

Dans un deuxième schéma de synthèse du composé A, le résorcinol réagit avec l'acétoacétate d'éthyle en présence d'un acide organique fort, l'acide paratoluènesulfonique (APTS). La transformation chimique est modélisée par l'équation de réaction représentée ci-dessous.



Q7. Recopier la formule topologique de l'acétoacétate d'éthyle, entourer les deux groupes caractéristiques sur la copie et nommer les familles fonctionnelles correspondantes.

Le début du mécanisme de la synthèse est proposé **Figure 4** :

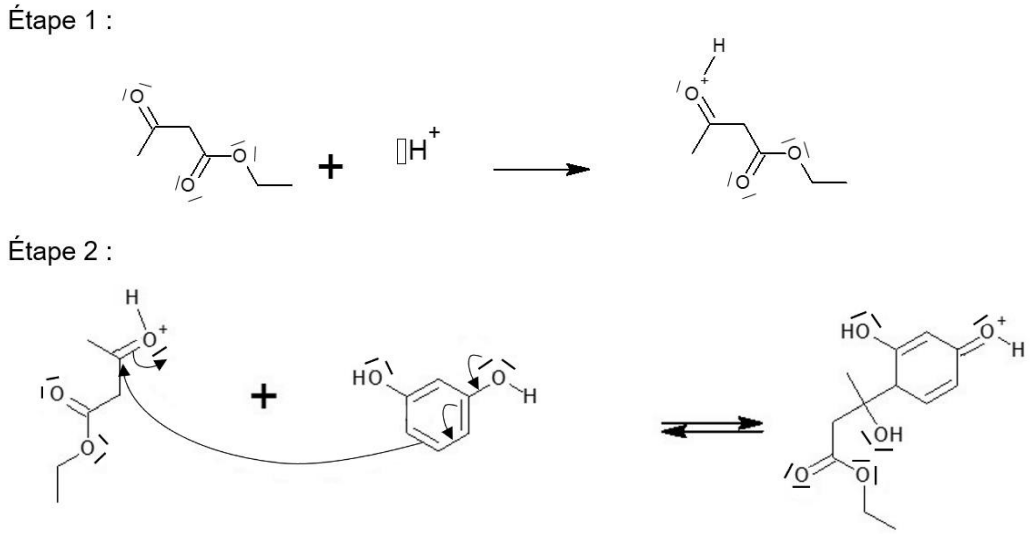


Figure 4. Les deux premières étapes du mécanisme de la synthèse

Q8. Recopier l'étape 1 du mécanisme sur la copie et y placer la flèche courbe expliquant le mécanisme.

Q9. Identifier la catégorie de réaction de l'étape 2 représentée **Figure 4** parmi les suivantes : addition, élimination ou substitution.

L'APTS joue le rôle de catalyseur dans la synthèse du composé A.

Q10. Donner la définition d'un catalyseur.

Le mode opératoire, décrit ci-après, utilisé pour cette synthèse, a été mis au point par deux chercheurs japonais :

- Préparer un bain-marie d'eau tiède dans un cristallisoir, dont la température doit être au voisinage de 60-70 °C.
- Dans un erlenmeyer de 50 mL, introduire un barreau aimanté puis les masses m_r = 2,20 g de résorcinol, m_{AE} = 2,60 g d'acétoacétate d'éthyle et m_{APTS} = 0,18 g d'APTS.
- Placer l'erlenmeyer dans le bain-marie et maintenir, sous agitation magnétique, une température voisine de 60 °C pendant une durée de 10 minutes. Le milieu devient un liquide homogène.
- Refroidir avec un cristallisoir rempli d'eau glacée. Laisser refroidir à l'air libre l'erlenmeyer contenant le mélange réactionnel.
- Sous agitation magnétique, y ajouter progressivement 15 mL d'eau distillée. On observe qu'un solide cristallise. Refroidir pour achever la cristallisation et obtenir des cristaux bruts.

Pour récupérer des cristaux purifiés du composé A formés lors de la synthèse, on procède de la manière suivante :

- Sous pression réduite, collecter le solide dans un entonnoir Büchner garni d'un filtre rond.

- Rincer le solide à l'aide de 3 × 5 mL d'eau froide. Recueillir les cristaux bruts dans une boîte de Pétri préalablement tarée.
- Recristalliser le produit dans un mélange éthanol-eau. Une très faible quantité de solvant doit être utilisée.
- Collecter les cristaux purifiés. Les recueillir sur un verre de montre taré.

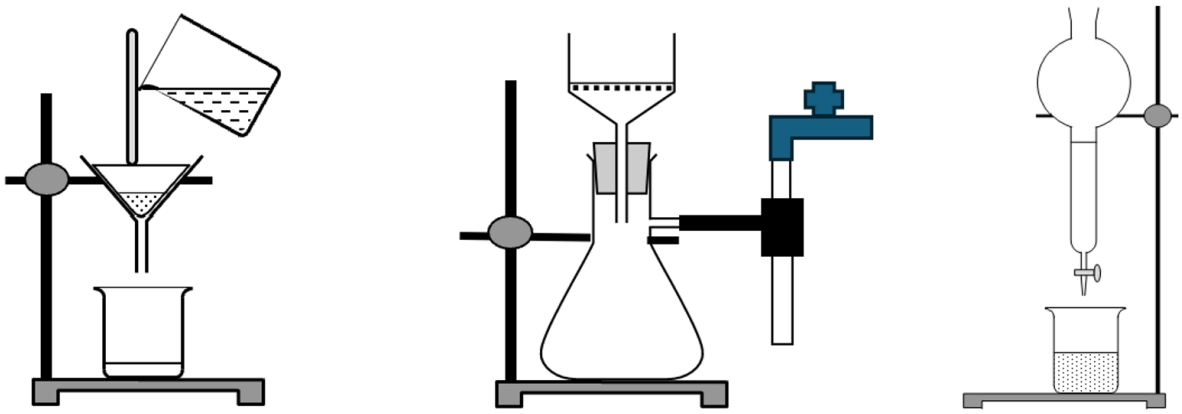
Données : Tableau des solubilités des espèces en fonction du solvant

	Résorcinol	Acétoacétate d'éthyle	APTS	Composé A
Eau	Insoluble	Insoluble	Soluble	Insoluble
Éthanol	Soluble	Soluble	Soluble	Peu soluble à froid Soluble à chaud

Q11. Indiquer le rôle de l'eau dans la cristallisation du produit brut obtenu qu'on recueille dans la boîte de Pétri.

Suite à la recristallisation, on observe une perte de masse du solide récupéré.

Q12. En supposant que la transformation n'est pas totale, indiquer les espèces éliminées du solide après recristallisation dans le mélange éthanol-eau.



Montage A Montage B Montage C

Figure 5. Montages proposés pour la filtration des cristaux obtenus

Q13. Indiquer, parmi les montages A, B et C proposés **Figure 5** celui utilisant une pression réduite et un entonnoir de Büchner.

Données :

➢ masses molaires des différentes espèces chimiques :

Acétoacétate d'éthyle M_{AE} = 130 g·mol^{-1}, Résorcinol M_r = 110 g·mol^{-1}, Composé A recristallisé M_A = 176 g·mol^{-1}.

On note n_{AE} la quantité de matière en acétoacétate d'éthyle et n_r la quantité de matière en résorcinol.
Q14. À l'aide des données du protocole, vérifier que les réactifs ont été introduits en proportions stœchiométriques.

On recueille une masse de produit m_A = 2,0 g de composé A purifié.
Q15. Calculer la valeur du rendement η_2 de cette synthèse.

Q16. Discuter d'un avantage et d'un inconvénient de chaque voie de synthèse.

EXERCICE 2 - La scintigraphie cardiaque (5 points)

La scintigraphie cardiaque est un examen indolore, réalisé par le cardiologue ou le médecin nucléaire pour évaluer la santé cardiaque d'un patient. L'examen dure environ 15 à 30 minutes et consiste en l'injection intraveineuse de thallium 201 radioactif. Le thallium 201 émet des rayons γ captés par une caméra à scintillation.

L'objectif de cet exercice est d'analyser les propriétés du thallium 201 utilisé pour analyser le fonctionnement cardiaque, ainsi que son comportement dans l'organisme lors de son injection et de son élimination au cours d'une scintigraphie du cœur.

Le thallium 201 ($^{201}_{81}\text{Tl}$), utilisé pour la scintigraphie peut se désintégrer en mercure 201 selon l'équation :

$$^{201}_{81}\text{Tl} \rightarrow {}^{201}_{80}\text{Hg}^{*} + {}^{0}_{1}\text{e} ,$$

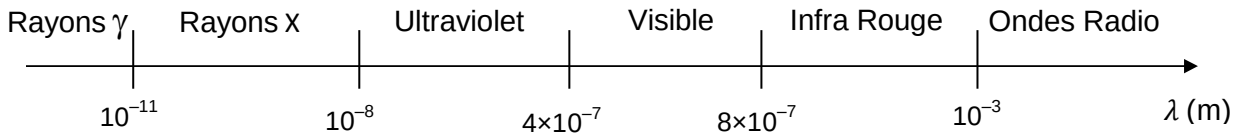
où $^{201}_{80}\text{Hg}^{*}$ représente un état excité du $^{201}_{80}\text{Hg}$**.**

Q1. Préciser à quel type de désintégration correspond cette transformation nucléaire.

Le $^{201}_{80}\text{Hg}^{*}$ se désexcite très rapidement en émettant un photon γ d'énergie *E* égale à 135 keV.

Données :

- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3{,}00\times10^{8}$ m·s^{-1} ;
- constante de Planck : $h = 6{,}63\times10^{-34}$ J·s ;
- électronvolt : 1 eV = $1{,}60\times10^{-19}$ J ;
- relation entre l'énergie et la longueur d'onde dans le vide λ_v : $E = \frac{hc}{\lambda_v}$;
- domaines spectraux des ondes électromagnétiques.



Q2. À l'aide des données, exprimer puis calculer la longueur d'onde λ_v de ce rayonnement d'énergie *E* dans le vide.

Q3. Retrouver alors le domaine du spectre auquel appartient ce rayonnement lors de la désintégration du thallium 201.

Q4. Citer une méthode de protection contre ces rayonnements ionisants.

Données et rappels :

- L'activité d'un échantillon de noyaux radioactifs est le nombre de désintégrations radioactives par unité de temps dans cet échantillon.
- L'activité $A(t)$ à l'instant t est ici liée au nombre de nombre de noyaux $N(t)$ restant à l'instant t par la relation : $A(t) = \lambda N(t)$, dans laquelle λ est la constante radioactive de la désintégration.
- La loi de décroissance radioactive relative à l'activité est $A(t) = A_0 e^{-\lambda . t}$;

- Demi-vie (ou période) du thallium 201 : $t_{1/2}$ = 3,04 jours.
- 1 jour = 86400 s

Lors d'une scintigraphie du cœur, on injecte une solution stérile de chlorure de thallium 201. L'examen du patient considéré nécessite l'injection par voie intraveineuse d'une dose présentant une activité A_0 = 78 MBq.
Après l'administration du chlorure de thallium, il est conseillé de boire beaucoup d'eau pour éliminer le thallium restant par voie urinaire.

Q5. Donner la relation entre l'activité $A(t)$ d'un échantillon et la dérivée temporelle du nombre de noyaux radioactifs $N(t)$, notée $\frac{dN(t)}{dt}$, dans cet échantillon.

Q6. Établir l'équation différentielle régissant la population de noyaux radioactifs $N(t)$ sous la forme $\frac{dN(t)}{dt} + \lambda N(t) = 0$.

Q7. Vérifier que $N(t) = N_0 e^{-\lambda \cdot t}$ est solution de l'équation différentielle précédente, avec N_0 le nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon.

Q8. Établir l'expression de la constante radioactive en fonction du temps de demi-vie $t_{1/2}$. En déduire que la valeur de la constante radioactive λ du thallium 201 est $2{,}64 \times 10^{-6}\ s^{-1}$.

Q9. Calculer l'activité restante A_r chez le patient deux heures après l'injection. Conclure.

Q10. Calculer la durée $t_{1\%}$, en jours, au bout de laquelle l'activité radioactive du thallium 201 est égale à 1% de sa valeur initiale A_0. Justifier alors le fait qu'il est nécessaire de boire beaucoup d'eau après l'examen.

EXERCICE 3 - La saga de la découverte des trous noirs (6 points)

L'astronome Reinhard Genzel, prix Nobel de physique en 2020, et ses collaborateurs ont apporté les preuves de l'existence d'un trou noir au centre de notre galaxie, nommé SgrA* (Sagittarius A*), dont la masse a été évaluée peu après par l'équipe d'Andrea Ghez à environ 4,4 millions de masses solaires.

D'après *Sciences et Avenir* - octobre 2020

Le but de cet exercice est d'estimer la masse *M* du trou noir SgrA* afin de confirmer la valeur donnée dans l'article précédent.

La **Figure 1** présente la trajectoire elliptique d'une étoile appelée S2 dans le référentiel galiléen dont l'origine est le trou noir SgrA* .

On a reporté, à coté de chaque position de l'étoile S2 la date à laquelle a été effectué le relevé. Ainsi, 2000,6 correspond à l'année 2000, accomplie au 6/10 de sa durée.
Les points F_1 et F_2 sont les foyers de l'ellipse, F_1 étant occupé par SgrA*.

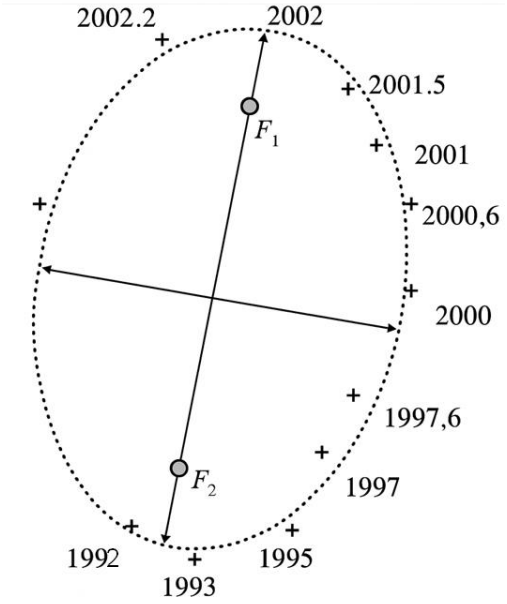


Figure 1. Relevé des positions de l'étoile S2

D'après la deuxième loi de Kepler, le rayon vecteur qui relie le centre du trou noir SgrA* à l'étoile S2 balaie des aires égales pendant des durées égales.

Q1. Expliquer que la vitesse de l'étoile S2 en 2002 est supérieure à la vitesse de S2 en 1993.

Q2. À partir de la **Figure 1**, montrer que la valeur de la période de révolution *T* de l'étoile S2 autour de SgrA* est de l'ordre de 19 ans.

On peut montrer que la période de révolution de l'étoile S2 est identique à celle qu'aurait une étoile fictive Sf dont la trajectoire serait circulaire autour de F_1, avec un rayon égal à la moitié du grand axe de l'ellipse parcourue par S2.

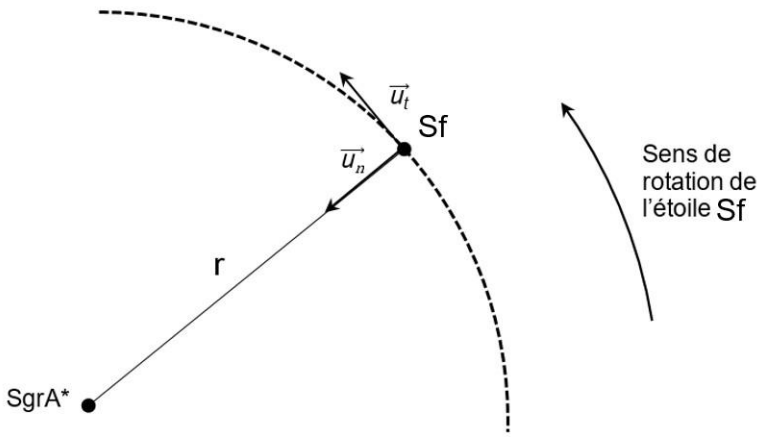


Figure 2. Portion de trajectoire circulaire de l'étoile Sf autour de SgrA*

On considère que l'étoile fictive Sf est uniquement soumise à la force gravitationnelle de SgrA* et que sa trajectoire est circulaire de rayon *r*. L'étude est effectuée dans le repère de Frenet (Sf, $\vec{u_t}$, $\vec{u_n}$).

On note m_f la masse de l'étoile fictive Sf.

Q3. À l'aide de la deuxième loi de Newton appliquée à l'étoile Sf considérée comme ponctuelle, exprimer son vecteur accélération $\vec{a}$ en fonction de *G*, *M*, *r* et du vecteur $\vec{u_n}$.

Q4. Recopier la **Figure 2** sur votre copie, sans souci d'échelle, et représenter, au point Sf, les vecteurs vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$ de l'étoile Sf.

Q5. En utilisant l'expression du vecteur accélération dans la base de Frenet, montrer alors que dans le cadre de l'approximation d'une trajectoire circulaire, le mouvement de l'étoile Sf est circulaire uniforme.

Q6. Montrer également que l'expression de la vitesse *v* de l'étoile Sf est : $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

Q7. On définit *T* comme la période de révolution de l'étoile S autour du trou noir SgrA*. Retrouver l'expression de la troisième loi de Kepler :

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

Données :

- constante de gravitation universelle : $G = 6{,}67\times10^{-11}$ m^3·kg^{-1}·s^{-2} ;
- masse du soleil : $M_S = 1{,}99\times10^{30}$ kg ;
- la valeur *r* du rayon de l'orbite de l'étoile fictive Sf : $r = 1{,}74\times10^{11}$ km ;
- la valeur de la période de révolution *T* de l'étoile S2 autour de SgrA* est égale à 19 ans.

Q8. Déterminer la valeur de la masse *M* du trou noir SgrA*. Comparer le résultat à la valeur annoncée dans l'article de *Sciences et Avenir* cité en préambule. Commenter.