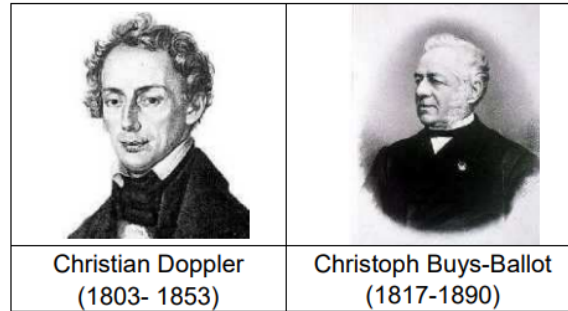


Exercice 01 : De l'effet Doppler à ses applications



Christian Doppler, savant autrichien, propose en 1842 une explication de la modification de la fréquence du son perçu par un observateur immobile lorsque la source sonore est en mouvement. Buys-Ballot, scientifique hollandais, vérifie expérimentalement la théorie de Doppler en 1845, en enregistrant le décalage en fréquence d'un son provenant d'un train en mouvement et perçu par un observateur immobile.

On se propose de présenter l'effet Doppler puis de l'illustrer au travers de deux applications.

1. Mouvement relatif d'une source sonore et d'un détecteur

Nous nous intéressons dans un premier temps au changement de fréquence associé au mouvement relatif d'une source sonore S et d'un détecteur placé au point M (figure 1). Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre dans lequel le détecteur est immobile. Une source S émet des « bips » sonores à intervalles de temps réguliers dont la période d'émission est notée T_0 . Le signal sonore se propage à la célérité v_{son} par rapport au référentiel terrestre.

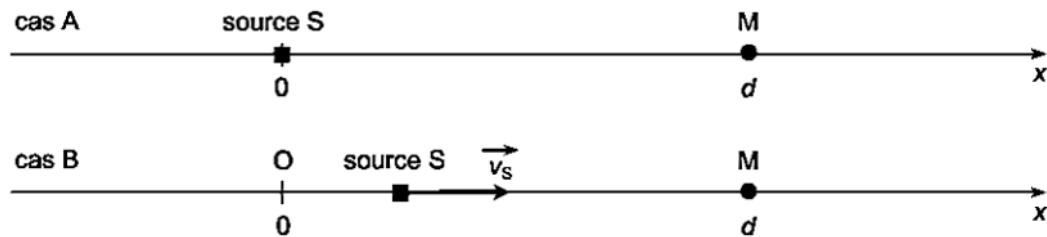


Figure 1. Schéma représentant une source sonore immobile (cas A), puis en mouvement (cas B).

1.1. Cas A : la source S est immobile en $x = 0$ et le détecteur M, situé à la distance d , perçoit chaque bip sonore avec un retard lié à la durée de propagation du signal.

1.1.1. Définir par une phrase, en utilisant l'expression « bips sonores », la fréquence f_0 de ce signal périodique.

1.1.2. Comparer la période temporelle T des bips sonores perçus par le détecteur à la période d'émission T_0 .

1.2. Cas B : la source S, initialement en $x = 0$, se déplace à une vitesse constante v_s suivant l'axe Ox en direction du détecteur immobile. La vitesse v_s est inférieure à la célérité v_{son} . On suppose que la source reste à gauche du détecteur.

Le détecteur perçoit alors les différents bips séparés d'une durée $T' = T_0 \left(1 - \frac{v_s}{v_{son}} \right)$

Indiquer si la fréquence f' des bips perçus par le détecteur est inférieure ou supérieure à la fréquence f_0 avec laquelle les bips sont émis par la source S. Justifier.

2. La vélocimétrie Doppler en médecine

La médecine fait appel à l'effet Doppler pour mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins (figure 2).

Un émetteur produit des ondes ultrasonores qui traversent la paroi d'un vaisseau sanguin. Pour simplifier, on suppose que lorsque le faisceau ultrasonore traverse des tissus biologiques, il rencontre :

- des cibles fixes sur lesquelles il se réfléchit sans modification de la fréquence ;
- des cibles mobiles, comme les globules rouges du sang, sur lesquelles il se réfléchit avec une modification de la fréquence ultrasonore par effet Doppler (figure 3).

différents
vaisseaux du
lit vasculaire

vitesse de
l'écoulement
sanguin
(cm/s)

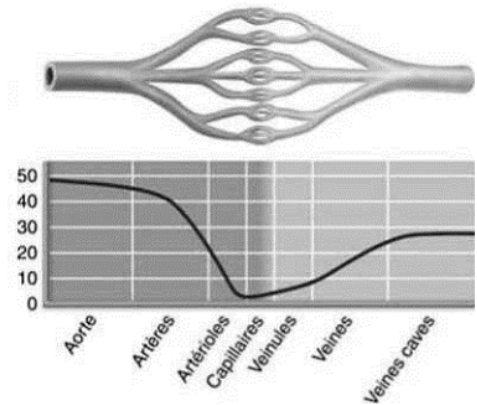


Figure 2. Vitesse moyenne du sang dans différents vaisseaux sanguins.

©2011 Pearson

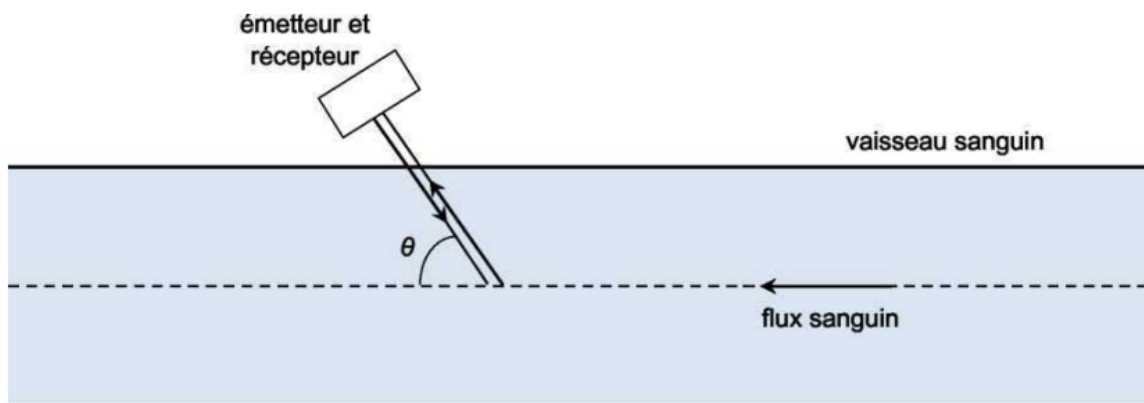


Figure 3. Principe de la mesure d'une vitesse d'écoulement sanguin par effet Doppler (échelle non respectée).

L'onde ultrasonore émise, de fréquence $f_E = 10$ MHz, se réfléchit sur les globules rouges qui sont animés d'une vitesse v . L'onde réfléchie est ensuite détectée par le récepteur.

La vitesse v des globules rouges dans le vaisseau sanguin est donnée par la relation $v = \frac{v_{ultrason}}{2 \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_E}$ où

Δf est le décalage en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie, $v_{ultrason}$ la célérité des ultrasons dans le sang et θ l'angle défini sur la figure 3.

On donne $v_{ultrason} = 1,57 \times 10^3$ m.s⁻¹ et $\theta = 45^\circ$.

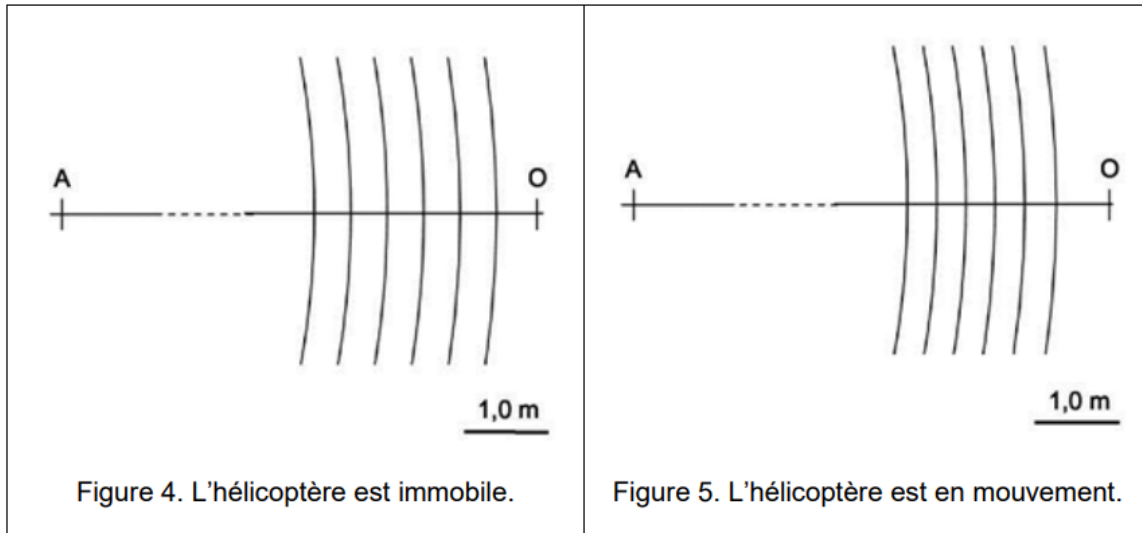
2.1. Le décalage en fréquence mesuré par le récepteur est de 1,5 kHz. Identifier le(s) type(s) de vaisseaux sanguins dont il pourrait s'agir.

2.2. Pour les mêmes vaisseaux sanguins et dans les mêmes conditions de mesure, on augmente la fréquence des ultrasons émis f_E . Indiquer comment évolue le décalage en fréquence Δf . Justifier.

3. Détermination de la vitesse d'un hélicoptère par effet Doppler

On s'intéresse à un son émis par un hélicoptère et perçu par un observateur immobile. La valeur de la fréquence de l'onde sonore émise par l'hélicoptère est $f_0 = 8,1 \times 10^2$ Hz. On se place dans le référentiel terrestre pour toute la suite de cette partie.

Les portions de cercles des figures 4 et 5 ci-dessous donnent les maxima d'amplitude de l'onde sonore à un instant donné. Le point A schématise l'hélicoptère. Dans le cas de la figure 4, l'hélicoptère est immobile. Dans le cas de la figure 5, il se déplace à vitesse constante le long de l'axe et vers l'observateur placé au point O. La célérité du son dans l'air est indépendante de sa fréquence.



- 3.1. Déterminer, avec un maximum de précision, la longueur d'onde λ_0 de l'onde sonore perçue par l'observateur lorsque l'hélicoptère est immobile, puis la longueur d'onde λ' lorsque l'hélicoptère est en mouvement rectiligne uniforme.
- 3.2. En déduire une estimation de la valeur de la célérité de l'onde sonore. Commenter la valeur obtenue.
- 3.3. Déterminer la fréquence du son perçu par l'observateur lorsque l'hélicoptère est en mouvement. Cette valeur est-elle en accord avec le résultat de la question 1.2. ? Comment la perception du son est-elle modifiée ?
- 3.4. En déduire la valeur de la vitesse de l'hélicoptère. Cette valeur vous paraît-elle réaliste.

Exercice 02 : Pollution des sols par le césium à Fukushima

Le 11 mars 2011, un tsunami consécutif à un violent séisme de magnitude 9 au Japon endommage le système de refroidissement principal de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi, entraînant la fusion des cœurs des réacteurs 1, 2 et 3, ainsi que la surchauffe de la piscine de désactivation du réacteur 4. Du 12 au 15 mars, des explosions se produisent projetant dans l'air des particules radioactives qui finissent par retomber sur une très large zone autour de la centrale. C'est un accident nucléaire majeur.

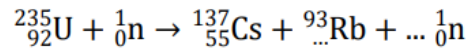
Le césium-137 est l'un des produits radioactifs issu de la fission nucléaire qui se déroule dans le réacteur. Après un accident, il se dépose au sol principalement sous l'effet de la pluie. Il est d'abord intercepté par le feuillage puis le césium déposé sur les feuilles et l'herbe broutée par les animaux peut passer dans la chaîne alimentaire (feuilles, champignons, légumes, fruits, céréales, lait, gibier, poisson...).

Le césium-137 constitue la principale source radioactive de contamination des sols.

L'objectif de cet exercice est d'estimer le temps nécessaire pour que les sols de la province de Fukushima soient à nouveau cultivables.

Q1. Rappeler la définition d'un noyau radioactif.

Q2. Recopier et compléter l'équation de fission de l'uranium-235 aboutissant au césium-137 :



Données :

➤ domaine des ondes électromagnétiques :

| Intervalle de longueur d'onde λ en m | Nom du domaine |
|---|---------------------|
| $\lambda < 10^{-11}$ | Rayons gamma |
| $10^{-11} < \lambda < 10^{-8}$ | Rayons X |
| $10^{-8} < \lambda < 4 \times 10^{-7}$ | Ultra-violets |
| $4 \times 10^{-7} < \lambda < 8 \times 10^{-7}$ | Rayonnement visible |
| $8 \times 10^{-7} < \lambda < 10^{-3}$ | Infra-rouges |
| $10^{-3} < \lambda < 1$ | Micro-ondes |
| $\lambda > 1$ | Ondes radio |

- constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s ;
- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹ ;
- 1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J.

Le césium ${}_{55}^{137}\text{Cs}$ se désintègre en baryum ${}_{56}^{137}\text{Ba}$ stable en deux temps. Il se transforme d'abord en ${}_{56}^{137}\text{Ba}^*$ (noyau excité) puis en ${}_{56}^{137}\text{Ba}$.

Q3. Écrire l'équation modélisant la transformation nucléaire de ${}_{55}^{137}\text{Cs}$ en ${}_{56}^{137}\text{Ba}^*$ et préciser la nature de cette désintégration.

La désexcitation de ${}_{56}^{137}\text{Ba}^*$ pour donner ${}_{56}^{137}\text{Ba}$ s'accompagne d'une transition énergétique libérant un photon possédant une énergie de valeur $\Delta E = 662$ keV.

Q4. Calculer la valeur de la longueur d'onde λ_p du photon émis lors de cette transition et préciser en s'aidant des données à quel domaine des ondes électromagnétiques il appartient.

Données :

- l'activité radioactive d'un isotope correspond au nombre de désintégrations subi par unité de temps. Pour une désintégration simple on a : $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$;
- l'activité est proportionnelle au nombre de noyaux restant soit $A(t) = \lambda \cdot N(t)$ avec λ constante radioactive.

Q5. Établir l'équation différentielle suivie par le nombre de noyaux $N(t)$ en introduisant la constante radioactive λ du césium-137.

Données :

- la solution de l'équation différentielle établie à la question **Q5**. est de la forme : $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, avec N_0 nombre de noyaux initialement présents et λ constante radioactive du césium-137 ;
- la demi-vie $t_{1/2}$ du césium-137 est égale à 30,1 ans.

Q6. Donner la définition de la demi-vie radioactive $t_{1/2}$ ainsi que la relation entre la demi-vie $t_{1/2}$ et la constante radioactive λ . Montrer que la constante radioactive du césium-137 vaut $\lambda = 2,30 \times 10^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Pour quantifier le degré de contamination radioactive d'un sol, on mesure son activité surfacique donnée en becquerel par mètre carré, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$. On considère que le sol est contaminé au césium-137, et donc non cultivable, lorsque son activité surfacique dépasse $10,0 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$. L'activité surfacique suit une loi de décroissance du même type que celle du nombre de noyaux notée : $A_{\text{surf}}(t) = A_{\text{surf}}^i \cdot e^{-\lambda t}$, où A_{surf}^i est l'activité surfacique initiale extrapolée à l'instant de l'accident.

Établi dans une région boisée de la province de Fukushima, à environ quarante kilomètres au nord-ouest de la centrale, Litate est un petit village d'agriculteurs qui a été fortement irradié en 2011. Un an après la catastrophe, l'activité surfacique mesurée à Litate était encore de $1,00 \times 10^3 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$.

Q7. Montrer que la valeur de l'activité surfacique initiale A_{surf}^i au moment de l'accident à Litate vaut environ $A_{\text{surf}}^i = 1,02 \times 10^3 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$.

Q8. En déduire l'année à partir de laquelle les sols seront de nouveau cultivables dans la région de Litate, dans l'hypothèse où aucune action de décontamination n'est entreprise en l'absence de nouvelle contamination.

Exercice 03 : Autour du Géranium Rosat

L'acide pélargonique, espèce chimique extraite des feuilles du géranium rosat, entre dans la composition des produits phytosanitaires de désherbage en agriculture biologique. En nomenclature officielle, l'acide pélargonique se nomme acide nonanoïque.

Cet exercice s'intéresse successivement à l'identification et au dosage de l'acide pélargonique contenu dans un désherbant, puis à la synthèse d'un des composants d'un produit cosmétique à partir de l'acide nonanoïque.

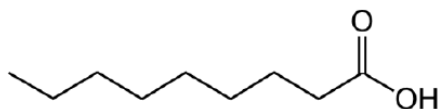
Données :

- Table des bandes d'absorption IR :

| Liaison | σ (cm^{-1}) | Intensité |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| O – H alcool | 3200 – 3400 | Forte et large |
| O – H acide carboxylique | 2500 – 3200 | Forte à moyenne, large |
| C = O ester | 1700 – 1740 | Forte et fine |
| C = O aldéhyde | 1720 – 1740 | Forte et fine |
| C = O cétone | 1705 – 1725 | Forte et fine |
| C = O acide carboxylique | 1680 – 1710 | Forte et fine |

1. Identification de la substance active du désherbant

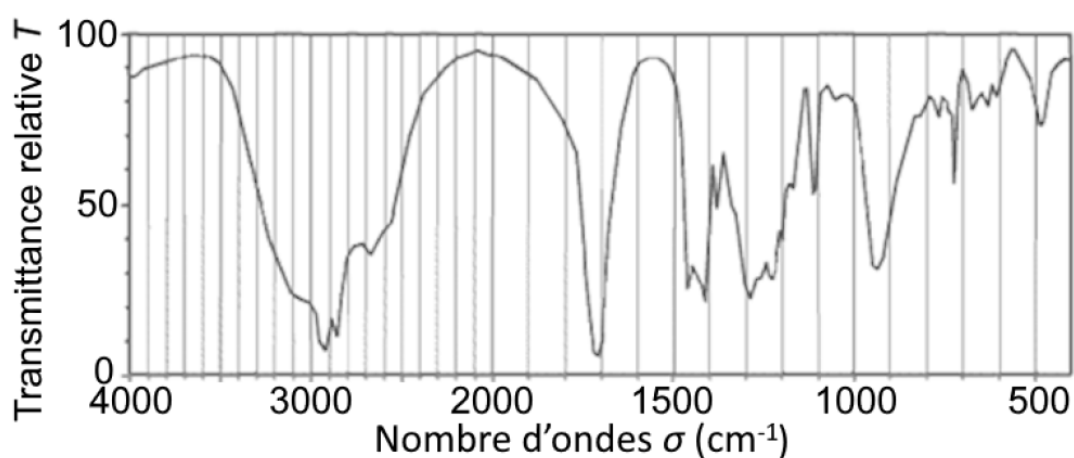
La formule topologique de la molécule d'acide pélargonique (ou acide nonanoïque) est donnée ci-après :



Q.1. Écrire la formule semi-développée de l'acide nonanoïque. Entourer le groupe caractéristique de la molécule puis nommer la famille fonctionnelle associée.

Pour vérifier la nature de l'espèce chimique contenue dans le flacon de désherbant, différents contrôles sont effectués parmi lesquels une analyse par spectroscopie infrarouge (IR).

Le spectre d'absorption IR de l'échantillon obtenu est représenté ci-après :



Source : d'après Unisciel, uel.unisciel.fr

Q.2. Justifier que le spectre de l'échantillon peut correspondre à celui de l'acide nonanoïque.

2. Dosage de l'espèce chimique active du désherbant

Sur l'étiquette du flacon de désherbant, on peut lire les informations suivantes :

« Le désherbant concentré est une solution polyvalente idéale pour éliminer facilement les mauvaises herbes du jardin. Sa formulation à partir d'acide pélargonique à $250 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, une substance active d'origine végétale, est sans danger pour vos animaux domestiques qui peuvent revenir sur les surfaces traitées dès que le produit est sec ».

Pour vérifier la concentration en masse en acide pélargonique (ou acide nonanoïque) du désherbant, on réalise un dosage par titrage à l'aide d'un suivi pH-métrique. La solution commerciale est diluée 10 fois. On obtient une solution notée S dont on prélève $V_A = 10,0 \text{ mL}$ que l'on titre par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+(\text{aq})$, $\text{HO}^-(\text{aq})$) de concentration en quantité de matière $C_B = 0,100 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ avec une incertitude-type $u(C_B) = 0,002 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

On dispose de fioles jaugées (50,0 mL ; 100,0 mL ; 200,0 mL), et de pipettes jaugées (2,0 mL ; 10,0 mL ; 25,0 mL).

Données :

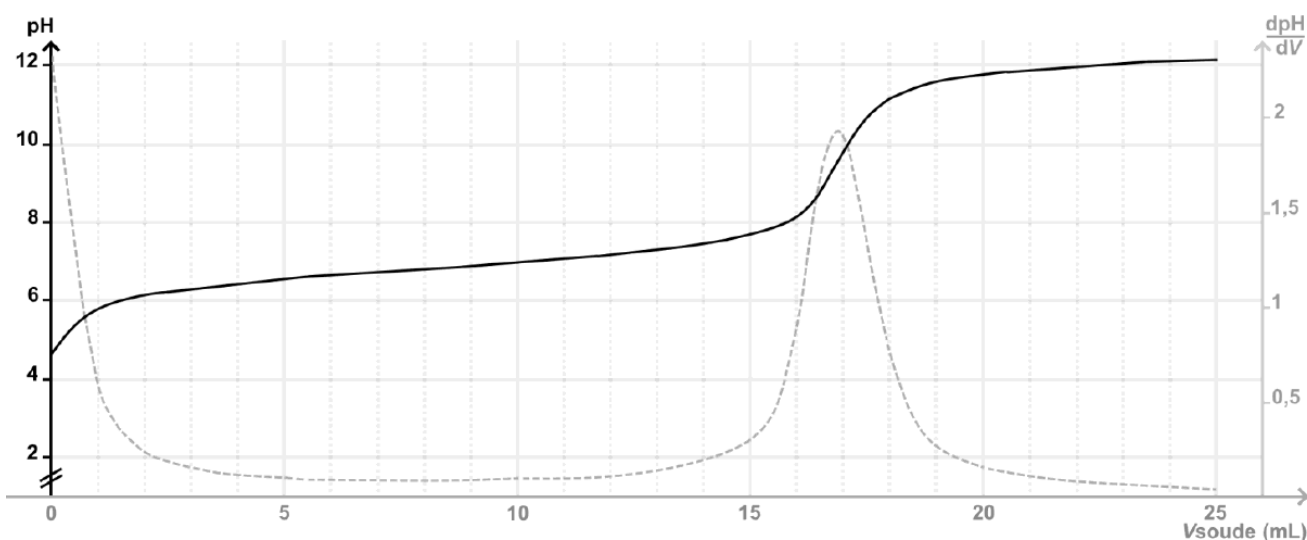
- Masse molaire de l'acide nonanoïque : M (acide nonanoïque) = 158,24 g·mol⁻¹ ;
- Incertitudes-types notées sur la verrerie :

| | Pipette jaugée de | | |
|--------|-------------------|---------|---------|
| V | 2,0 mL | 10,0 mL | 25,0 mL |
| $u(V)$ | 0,01 mL | 0,02 mL | 0,03 mL |

- Incertitude-type sur la lecture graphique du volume équivalent : $u(V_E) = 0,5$ mL ;
- Incertitude-type $u(A)$ d'une grandeur A :

$$\text{si } A = \frac{X \times Y}{Z} \text{ alors } u(A) = A \times \sqrt{\left(\frac{u(X)}{X}\right)^2 + \left(\frac{u(Y)}{Y}\right)^2 + \left(\frac{u(Z)}{Z}\right)^2}$$

- Pour discuter de la compatibilité du résultat d'une mesure A_{mes} avec une valeur de référence A_{ref} , on peut utiliser le quotient $\frac{|A_{\text{mes}} - A_{\text{ref}}|}{u(A)}$ avec A_{mes} la valeur mesurée, A_{ref} la valeur de référence et $u(A)$ l'incertitude-type de la valeur mesurée A_{mes} .
- Courbe de suivi pH-métrique du titrage de la solution S :

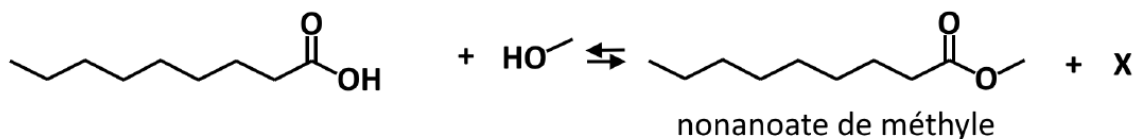


- Q.3.** Sélectionner, parmi la verrerie disponible, celle qui est à utiliser pour effectuer la dilution de la solution commerciale nonanoïque. Justifier la réponse.
- Q.4.** Réaliser un schéma du dispositif permettant d'effectuer ce titrage pH-métrique et nommer la verrerie et les solutions.
- Q.5.** Écrire l'équation de la réaction support du titrage entre l'ion hydroxyde et l'acide nonanoïque. On utilisera la notation R – COOH pour désigner l'acide nonanoïque.
- Q.6.** Sélectionner parmi les termes suivants, la ou les qualité(s) que doit posséder la réaction support du titrage : lente, rapide, unique, multiple, totale, non-totale.
- Q.7.** Définir l'équivalence d'un titrage.
- Q.8.** Vérifier que la concentration en masse d'acide nonanoïque indiquée sur le flacon est compatible avec le résultat du dosage pH-métrique.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

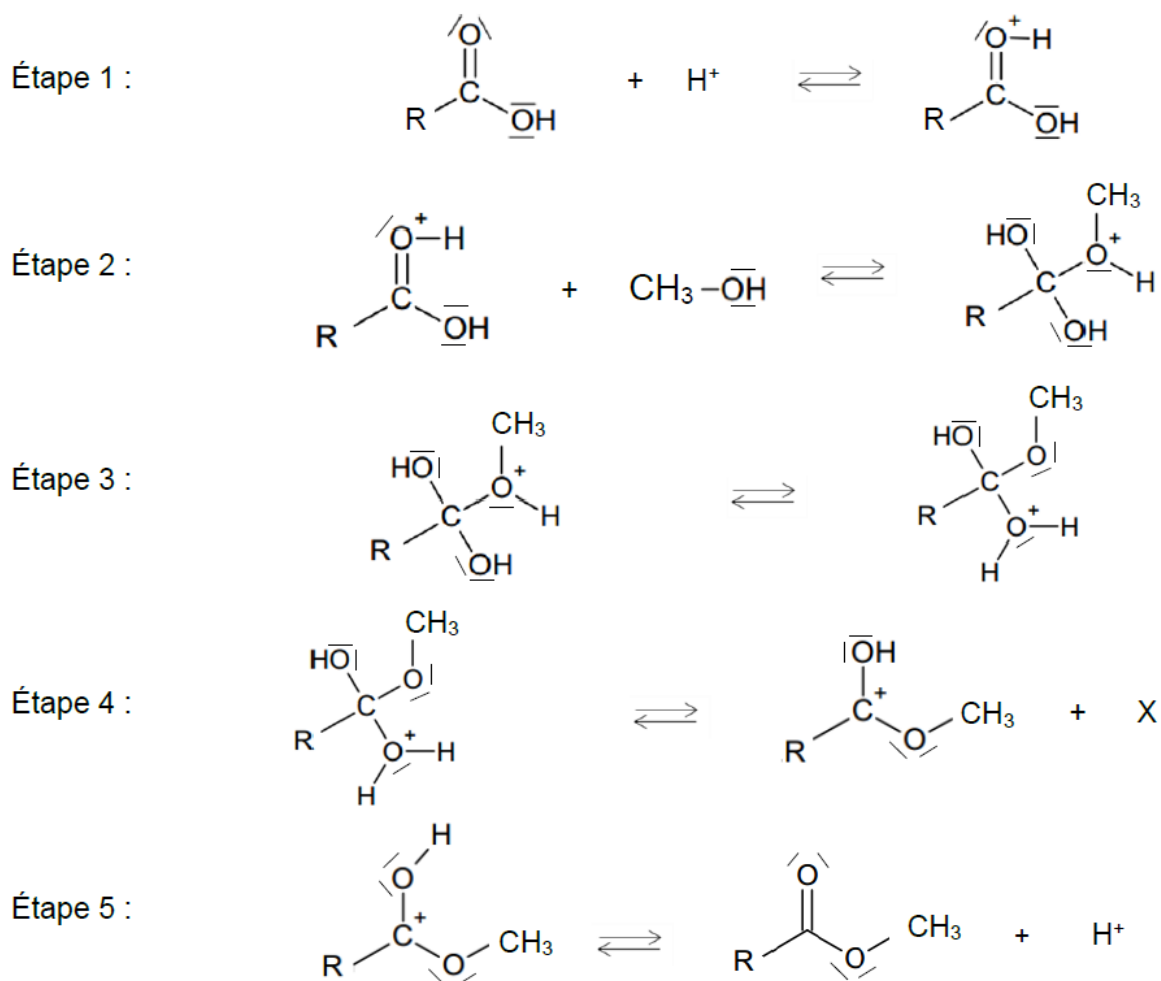
3. Synthèse du nonanoate de méthyle

Le nonanoate de méthyle est une espèce chimique que l'on retrouve notamment dans les cosmétiques. La synthèse du nonanoate de méthyle peut être réalisée au laboratoire à partir de méthanol et d'acide nonanoïque, en présence d'acide sulfurique ($2 \text{H}^+ (\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-} (\text{aq})$), selon la réaction d'équation :



Q.9. Indiquer la famille chimique à laquelle appartient le nonanoate de méthyle.

La réaction de synthèse peut être décomposée en plusieurs étapes élémentaires selon le mécanisme réactionnel suivant :



Q.10. Recopier l'étape 1 sur la copie. Représenter la flèche courbe dans cette étape. Justifier son sens.

Q.11. Écrire la formule de la molécule X produite à l'étape 4 du mécanisme. Justifier.

Q.12. Recopier la formule d'un intermédiaire réactionnel au sein du mécanisme réactionnel de formation du nonanoate de méthyle et justifier le choix effectué.

Q.13. Indiquer le rôle de l'acide sulfurique introduit dans le mélange initial. Justifier.