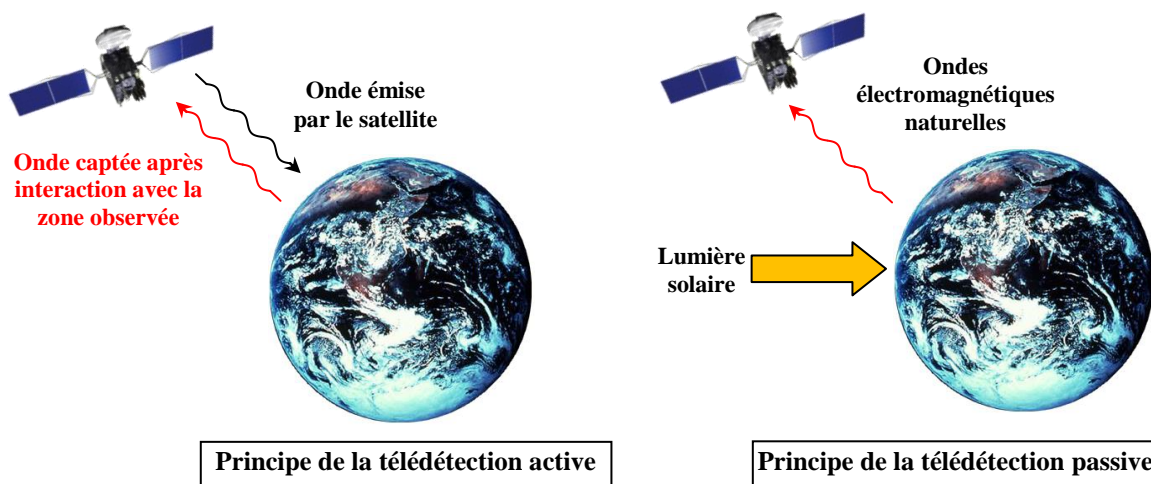


EXERCICE 1 : SATELLITES DE TELEDETECTION PASSIVE

La télédétection par satellite est l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre, l'atmosphère et les océans à des fins météorologique, océanographique, climatique, géographique, cartographique ou militaire. Le processus de la télédétection repose sur le recueil, l'enregistrement et l'analyse d'ondes électromagnétiques diffusées par la zone observée.

Si les ondes électromagnétiques mises en jeu dans le processus sont émises par un capteur (exemple : un radar) puis recueillies par ce même capteur après interaction avec la zone terrestre observée, on parle de **télédétection active**. Si le capteur (exemple : un radiomètre) recueille directement la lumière visible ou infrarouge émise ou diffusée par la zone terrestre observée, on qualifie les ondes analysées d'ondes électromagnétiques naturelles et on parle de **télédétection passive**.



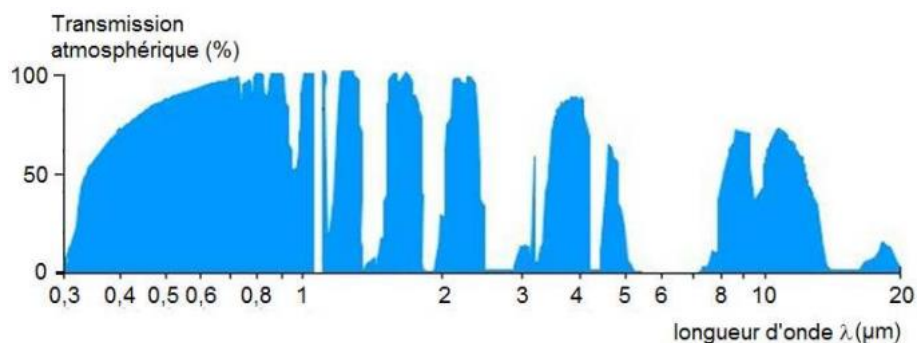
Cet exercice s'intéresse à deux familles de satellites de télédétection passive :

SPOT (document 1) et METEOSAT (document 2). **Il comporte trois parties indépendantes.**

Des réponses argumentées et précises sont attendues ; elles pourront être illustrées par des schémas. La qualité de la rédaction, la rigueur des calculs ainsi que toute initiative prise pour résoudre les questions posées seront valorisées.

Données :

- Rayon moyen de la Terre : $R_T = 6,38 \times 10^3$ km.
- Longueur d d'un arc de cercle de rayon R et d'angle α (exprimé en radian) : $d = R \cdot \alpha$.
- Courbe de transmission des radiations électromagnétiques par l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde λ :

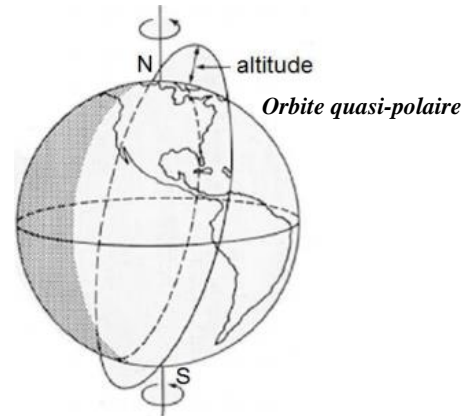


- Loi de Wien : $\lambda_{max} \times T = 2,90 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, avec λ_{max} la longueur d'onde majoritairement émise dans le spectre d'émission d'un corps porté à une température T (exprimée en kelvin).
- Relation entre la température T (exprimée en kelvin) et la température θ exprimée en degré Celsius : $T (\text{K}) = \theta (^\circ\text{C}) + 273$.

Document 1. La filière SPOT

SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) est un système d'imagerie optique spatiale à haute résolution. Ce programme s'insère dans la politique d'observation de la Terre du CNES (Centre National d'Études spatiales). Depuis 1986, les satellites de la filière SPOT scrutent notre planète et fournissent des images d'une qualité remarquable, en décrivant une orbite dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Elle est circulaire et se situe à l'altitude $h_S = 832$ km.
- Elle est héliosynchrone, c'est-à-dire que l'angle entre le plan de l'orbite et la direction du Soleil est quasi-constant. Cela permet de réaliser des prises de vue à une latitude donnée avec un éclairage constant.
- Elle est quasi-polaire, inclinée de $98,7^\circ$ par rapport au plan de l'équateur et décrite avec une période de 101,4 min. La zone terrestre observée évolue à chaque révolution du satellite dont le cycle orbital est de 26 jours ; c'est-à-dire que tous les 26 jours le satellite observe à nouveau la même région terrestre.



D'après le site :

<http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/6919-cnes-tout-sur-l-espace.php>

Document 2. Le programme METEOSAT

En Europe, l'ESA (Agence Spatiale Européenne) a développé le programme METEOSAT dont le premier satellite a été lancé en 1977. Depuis cette date, sept satellites METEOSAT ont été lancés. Puis des satellites aux performances accrues (METEOSAT SECOND GENERATION) leur ont succédé : MSG -1 (ou METEOSAT-8) lancé en août 2002, puis MSG -02 (ou METEOSAT-9) lancé en décembre 2005.

Les satellites METEOSAT et MSG sont géostationnaires*. Ils ont pour mission d'effectuer des observations météorologiques depuis l'espace pour la prévision immédiate et l'évolution à long terme du climat. Ils ont l'avantage de fournir des images de vastes portions de la surface terrestre et de l'atmosphère, mais présentent l'inconvénient qu'un seul satellite géostationnaire ne suffit pas pour observer toute la Terre. Par ailleurs, les régions polaires leur sont hors de portée.

* *Un satellite géostationnaire paraît immobile par rapport à un point de référence à la surface de la Terre. Pour respecter cette propriété, il se situe forcément dans le plan de l'équateur, son orbite est circulaire et son centre est le centre de la Terre. Sa période de révolution est donc égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même.*

D'après le site : <http://education.meteofrance.fr/>

1. Mouvements des satellites SPOT et METEOSAT

Les mouvements sont étudiés dans le référentiel lié au centre de la Terre, appelé référentiel géocentrique. Ce référentiel est supposé galiléen.

1.1. Énoncer la deuxième loi de Kepler (aussi nommée loi des aires) dans le cas général d'un satellite terrestre en mouvement elliptique. Illustrer cette loi par un schéma.

1.2. En utilisant la deuxième loi de Kepler, caractériser la nature des mouvements dans le cas particulier des satellites SPOT et METEOSAT.

1.3. Dans quel sens le satellite METEOSAT tourne-t-il autour de la Terre, par rapport au référentiel géocentrique ? On s'appuiera sur un dessin sur lequel figurera la Terre avec une indication explicite sur son sens de rotation.

1.4. Déterminer la valeur de la vitesse v du satellite SPOT par rapport au référentiel géocentrique.

1.5. Énoncer la troisième loi de Kepler dans le cas général d'un satellite terrestre en mouvement elliptique. On précisera la signification de chaque grandeur introduite.

1.6. En appliquant cette loi aux deux satellites étudiés, déduire la valeur de l'altitude h_M du satellite METEOSAT.

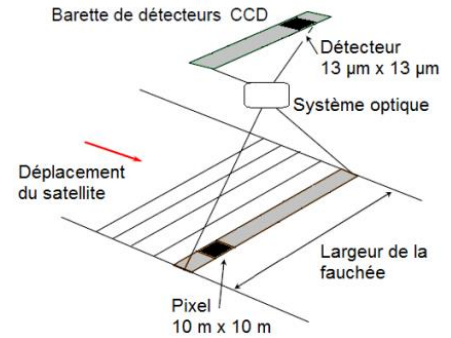
2. SPOT en mode panchromatique

Lorsque le satellite SPOT parcourt son orbite, il observe une large bande terrestre de plusieurs dizaines de kilomètres de large. Cette zone « couverte » est appelée la fauchée.

En mode panchromatique, les images réalisées par le satellite SPOT sont recueillies sur une barrette constituée de 6 000 détecteurs CCD et numérisées en niveaux de gris.

Chaque détecteur est assimilable à un carré de $13\ \mu\text{m}$ de côté recueillant l'information provenant d'une zone terrestre carrée de 10 m de côté, appelée pixel.

On dit que la résolution spatiale est de 10 m.



2.1. Évaluer la largeur de la fauchée.

2.2. La fauchée correspondant à la $n^{\text{ème}}$ révolution de SPOT n'est pas identique à celle de la $(n-1)^{\text{ème}}$ révolution. Se situe-t-elle davantage à l'est ou à l'ouest sur la Terre ?

Illustrer votre réponse par un schéma.

2.3. À chaque révolution du satellite, la zone terrestre observée n'est pas la même, du fait de la rotation de la Terre. De quel angle tourne la Terre entre deux révolutions du satellite ? En déduire de quelle distance se déplace la fauchée au niveau de l'Équateur entre deux révolutions du satellite.

2.4. Quelles sont les parties du globe les plus fréquemment « couvertes » par SPOT au cours d'un cycle orbital ?

2.5. Combien de révolutions doit effectuer SPOT pour réaliser une observation complète de la Terre ? Commenter cette valeur au regard du résultat de la question 2.3.

2.6. En mode panchromatique (numérisation en niveaux de gris), l'image est d'autant plus blanche que le flux lumineux capté est intense.

Deux images (images 1 et 2) d'une même zone de terrains agricoles, ont été obtenues par télédétection, respectivement dans le rouge (entre 610 nm et 680 nm de longueur d'onde) et dans le proche infrarouge (entre 790 et 890 nm).



Image 1
Télédétection dans le rouge

Image 2
Télédétection dans le proche infrarouge

Source : <http://www.ignfi.fr/fr?redirect>

En utilisant le tableau suivant, donnant les réflectances* caractéristiques des trois grands types de surfaces naturelles, quelles informations peut-on extraire de l'analyse de ces deux images ?

Montrer l'intérêt d'avoir ces deux images pour obtenir des informations sur la zone observée.

Valeurs caractéristiques des réflectances des trois grands types de surfaces naturelles en fonction de la gamme de longueur d'onde :

	Rouge (entre 610 et 680 nm)	Proche infrarouge (entre 790 et 890 nm)
Eau	4 à 6 %	0 à 2 %
Végétation	10 à 12 %	35 à 40 %
Sol nu	20 à 22 %	25 à 30 %

* La réflectance d'une surface est le rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident.

3. Les trois canaux de METEOSAT

Le radiomètre** des satellites METEOSAT comprend trois canaux de télédétection : le canal C dans le visible et le proche infrarouge, le canal E dans l'infrarouge moyen et le canal D dans l'infrarouge thermique.

** *Un radiomètre est un appareil de mesure de l'intensité du flux de rayonnement électromagnétique dans différents domaines de longueur d'onde.*

Canal	Gamme de longueurs d'onde en μm	Fonction principale
C	Entre 0,4 et 1,1	Permet l'observation visuelle de la surface de la Terre et des nuages.
E	Entre 5,7 et 7,1	Renseigne sur la teneur en humidité de l'atmosphère. La surface du sol n'est pas visible.
D	Entre 10,5 et 12,5	Renseigne sur la température des nuages et de la surface terrestre.

3.1. Pourquoi seule la télédétection sur les canaux C et D permet-elle d'obtenir des informations en provenance de la surface terrestre ?

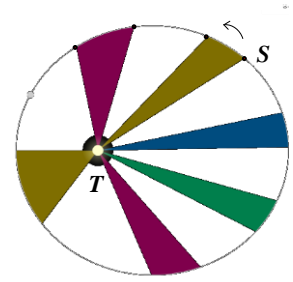
3.2. Quelles sont les raisons qui ont guidé le choix de la gamme de longueurs d'onde du canal D, compte tenu de sa fonction principale ?

Des éléments quantitatifs sont attendus dans la réponse.

CORRECTION EXERCICE 1 : SATELLITES DE TELEDETECTION PASSIVE

1. Mouvements des satellites SPOT et Météosat

1.1. La deuxième loi de Kepler, ou loi des aires, indique que le rayon vecteur \vec{TS} , reliant le centre de la Terre, un des foyers de l'orbite elliptique, au satellite, balaye des aires égales en des durées égales.



Les secteurs colorés ont des aires égales.

1.2. Les satellites SPOT et METEOSAT ont une orbite circulaire, de sorte que le rayon R de leur trajectoire est constant.

Les aires balayées sont des secteurs circulaires : en des durées Δt égales, ces aires sont identiques donc l'arc Δs qui délimite le secteur circulaire a toujours même longueur ; cet arc représente le déplacement du satellite pendant la durée Δt considérée : comme sa longueur Δs reste inchangée, le mouvement est uniforme.

La vitesse des satellites est constante : leur mouvement est circulaire et uniforme.

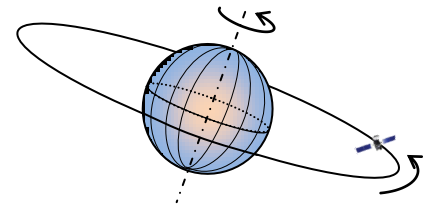
En effet, si α est l'angle balayé par le satellite S , on a : $s = R \alpha$.

En une durée $\Delta t = t_2 - t_1$, le satellite balaie un secteur circulaire d'arc $\Delta s = R \alpha_2 - R \alpha_1 = R \cdot \Delta \alpha$.

La vitesse orbitale du satellite est égale à : $v = \frac{R \cdot \Delta \alpha}{\Delta t}$ = constante puisque R est constant et que l'angle $\Delta \alpha$ est

inchangé en une durée Δt donnée.

1.3. METEOSAT est un satellite géostationnaire. D'après le document 2, son orbite est contenue dans le plan équatorial terrestre et sa période de rotation est égale à celle de la Terre autour de son axe polaire. Pour que le satellite soit immobile par rapport à la surface du globe terrestre, il faut qu'en outre cette rotation s'opère dans le même sens que celle qui entraîne la surface du globe, c'est-à-dire dans le sens direct.



1.4. SPOT décrit une orbite circulaire parcourue avec une vitesse orbitale

telle que : $v = \frac{R \cdot \Delta \alpha}{\Delta t}$ = constante.

Lorsqu'il fait un tour complet, $\Delta \alpha = 2 \pi$ et $\Delta t = T_S$, période de révolution.

On a : $R = R_T + h_S$ et donc : $v = \frac{(R_T + h_S) \cdot 2\pi}{T_S}$.

On relève dans le document 1 : $T_S = 101,4$ min et $h_S = 832$ km.

On obtient : $v = \frac{(6,38 \times 10^6 + 832 \times 10^3) \times 2\pi}{101,4 \times 60} \approx 7450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ou $7,45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.5. La troisième loi de Kepler nous dit que pour un système de satellites décrivant des orbites elliptiques autour d'un même centre attracteur, le rapport du carré de la période de révolution T de chaque satellite au cube du demi-grand axe a de son orbite elliptique est constant : $\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$.

1.6. Les trajectoires sont ici circulaires, de sorte que $a = R = R_T + h$ et donc ici, en appelant M le satellite

METEOSAT et S le satellite SPOT : $\frac{T_M^2}{(R_T + h_M)^3} = \frac{T_S^2}{(R_T + h_S)^3}$, d'où l'on tire : $(R_T + h_M)^3 = (R_T + h_S)^3 \times \frac{T_M^2}{T_S^2}$.

On a donc : $(R_T + h_M) = (R_T + h_S) \times \sqrt[3]{\frac{T_M^2}{T_S^2}}$, d'où : $h_M = (R_T + h_S) \times \sqrt[3]{\frac{T_M^2}{T_S^2}} - R_T$.

L'application numérique peut être conduite en laissant toutes les longueurs en km et les périodes en min.

La période T_M du satellite géostationnaire est proche de 24 h (23 h 56 min).

```
(6.38E3+832)*(24
*60/101.4)^(2/3)
-6.38E3
35913.349
```

On entre donc sur calculatrice les données ci-contre, en remarquant qu'on extrait la racine cubique d'un rapport élevé au carré, ce qui revient à élever ce rapport à la puissance 2/3.

On obtient : $h_M \approx 36000$ km qui est l'altitude de tous les satellites géostationnaires.

2.1. Quand toute la largeur ℓ de la fauchée a été balayée, l'ensemble de la barrette CCD a été parcourue, ce qui correspond à 6000 cellules qui conduisent chacune à une résolution terrestre de 10 m.

D'où : $\ell = 6000 \times 10$ m, soit 60 km.

2.2. Le satellite comme la Terre tournent dans le sens direct. SPOT a pour période orbitale 101,4 min alors que celle de la Terre est voisine de 1 440 min (≈ 24 h) : quand la Terre accomplit une révolution, le satellite en réalise près de 14,2 ! SPOT ne survole donc pas la même zone géographique d'une révolution à l'autre.

Chaque fauchée, du fait de la rotation de la Terre, est décalée vers l'est (vers la droite sur le schéma ci-contre) par rapport à celle qui la suit.

La $n^{\text{ème}}$ fauchée est donc à l'ouest (à la gauche sur le schéma) de la $(n-1)^{\text{ème}}$.

SPOT ne peut en balayer que la fraction angulaire égale à $360^\circ \times \frac{1}{14,2}$ du globe terrestre d'une fauchée à la suivante, soit environ $25,4^\circ$ ou encore : $\Delta\alpha = 25,3 \times \frac{\pi}{180}$ rad, soit $\Delta\alpha \approx 0,44$ rad.

Au niveau de l'équateur, une fauchée se déplace donc de $\Delta s = R \cdot \Delta\alpha$ qui vaut environ 2 800 km.

2.4. L'orbite est quasi-polaire donc les fauchées successives défilent de sorte que la distance balayée sur le globe est importante au niveau de l'équateur (2 800 km) alors qu'elle sera beaucoup plus faible près des pôles comme on peut le voir sur le schéma précédent. Les zones les plus fréquemment couvertes dans leur intégralité sont donc les régions polaires puisque seule une largeur de 60 km est « acquise » par la caméra CCD à chaque passage.

2.5. D'après le document 1, « tous les 26 jours le satellite observe à nouveau la même région terrestre ». En $T_S = 101,4$ min SPOT effectue une révolution.

En $\Delta t = 26$ jours ou $26 \times 24 \times 60$ min, SPOT effectue $N = \frac{\Delta t}{T}$ révolutions, soit :

$$N = \frac{26 \times 24 \times 60}{101,4} \approx 370 \text{ révolutions, avant de survoler une même région !}$$

Comme l'exploration ne peut s'opérer que sur des bandes de 60 km alors qu'au niveau de l'équateur, la distance balayée en un passage est de 2 800 km, on comprend que des centaines de passages sont nécessaires pour couvrir totalement ces régions !

2.6. Les zones végétales, qui réfléchissent bien le proche infrarouge, apparaissent en clair sur l'image 2.

Elles sont plus contrastées quand on les observe dans le rouge pour lequel leur réflectance, bien que significative, est nettement moins bonne que dans le proche infrarouge.

\Rightarrow Toutes les zones claires sur l'image 2 mais plus sombres sur l'image 1 sont dues à de la végétation.

L'eau absorbe aussi bien les proches infrarouges que les radiations rouges : de faible réflectance, les zones où l'eau (et sa vapeur) sont présentes doivent apparaître avec des niveaux de gris soutenus sur les deux images.

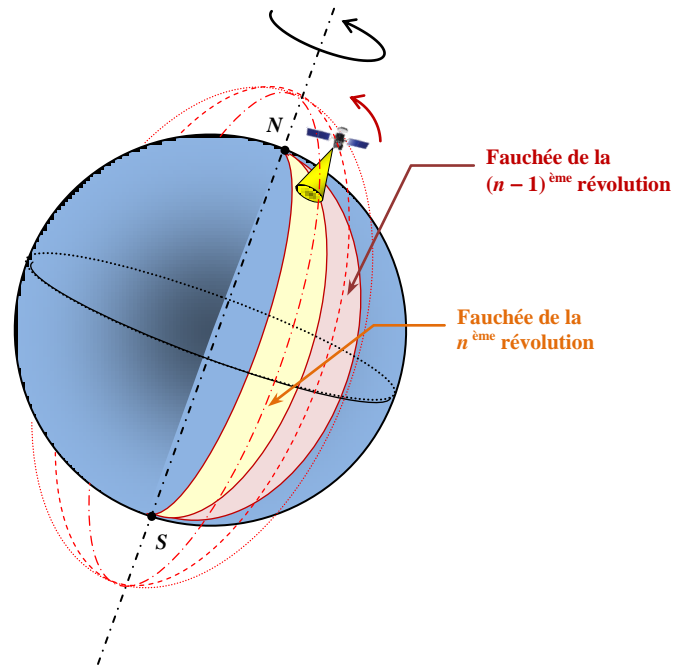
Enfin, les sols nus ont une réflectance très faible dans les domaines de longueurs d'onde qui sont ici explorés : ils doivent apparaître sur les clichés avec un même niveau de gris très foncé.

L'analyse ne peut guère ici être poussée plus loin du fait de la faible qualité des clichés proposés.

3.1. La courbe de transmission des radiations électromagnétiques par l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde λ montre que :

– les longueurs d'onde explorées par le canal E (entre 5,7 et 7,1 μm) ne peuvent provenir du sol terrestre car elles sont alors fortement absorbées par l'atmosphère ;

– les canaux C et D sont ajustés à des « fenêtres » d'infrarouges pour lesquelles l'atmosphère est soit totalement transparente (C), soit partiellement transparente (D). Le canal C est particulièrement adapté à la détection des proche-infrarouges qui sont émis par les parties les plus chaudes de la surface terrestre comme l'atteste la loi de Wien (la longueur d'onde du maximum d'émission varie en raison inverse de la température absolue de la source) alors que le canal D est sensible à l'émission issue de zones terrestres ou d'accumulation nuageuses plus froides.



3.2. Le canal D doit nous renseigner sur la température des nuages et de la surface terrestre.

Comme les infrarouges détectés ne sont plus dans le proche infrarouge, on s'attend à ce que les températures des corps émetteurs soient basses.

La loi de Wien permet d'apprécier le domaine des températures possibles dans la fenêtre infrarouge explorée

qui va de $10,5 \mu\text{m}$ à $12,5 \mu\text{m}$, soit : $T \text{ (K)} = \frac{2,90 \times 10^3}{\lambda_{\text{max}} \text{ (}\mu\text{m)}}$, relation qui conduit à :

– $T = 276 \text{ K}$ ($3 \text{ }^\circ\text{C}$) pour $\lambda_{\text{max}} = 10,5 \mu\text{m}$;

– $T = 232 \text{ K}$ ($-41 \text{ }^\circ\text{C}$) pour $\lambda_{\text{max}} = 12,5 \mu\text{m}$.

Si l'on exclut les zones polaires ou de haute montagne, ces températures sont typiques de celles rencontrées au sein des nuages.

EXERCICE 2 : SYNTHÈSE DE L'ACÉTATE D'ÉTHYLE

L'acétate d'éthyle est un liquide utilisé comme solvant pour les vernis à ongles et certaines colles, en raison de sa faible nocivité et de sa volatilité importante, il est aussi utilisé dans l'industrie agroalimentaire dans certains arômes fruités.

La synthèse de l'acétate d'éthyle est facilement réalisable au laboratoire. Un exemple de protocole expérimental est décrit ci-dessous :

Étape 1. Dans un ballon de 100 mL, introduire un mélange équimolaire de 0,10 mol d'acide acétique et 0,10 mol d'éthanol. Y ajouter 0,5 mL d'acide sulfurique concentré ($\text{H}_2\text{SO}_4(\ell)$) et quelques grains de pierre ponce. Porter le mélange à ébullition dans un dispositif de chauffage à reflux pendant 30 minutes.

Étape 2. Laisser refroidir le mélange réactionnel à l'air ambiant puis dans un bain d'eau froide. Verser le contenu du ballon dans une ampoule à décanter contenant environ 50 mL d'eau salée. Agiter prudemment quelques instants en dégazant régulièrement, puis éliminer la phase aqueuse.

Étape 3. Ajouter alors à la phase organique 60 mL d'une solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium ($\text{Na}^+_{(\text{aq})} + \text{HCO}_3^-_{(\text{aq})}$) de concentration molaire $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Laisser dégazer et décanter puis éliminer la phase aqueuse. Recueillir la phase organique dans un bécher. Sécher cette phase avec du chlorure de calcium anhydre puis filtrer.

Recueillir le filtrat dans un erlenmeyer propre et sec.

Une synthèse réalisée au laboratoire en suivant ce protocole a permis d'obtenir un volume de filtrat égal à 5,9 mL.

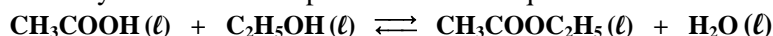
Données :

Couple acide / base : H_2O , $\text{CO}_2(\text{aq})$ / $\text{HCO}_3^- (\text{aq})$

	Acide acétique	Éthanol	Acétate d'éthyle
Masse molaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	60,0	46,1	88,1
Masse volumique ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	1,05	0,789	0,925
Température d'ébullition ($^{\circ}\text{C}$)	118	78,4	77,1
Température de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	16,6	-117	-83,6
Solubilité dans l'eau	Très grande	Très grande	$87 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ à 20°C
Solubilité dans l'eau salée	Très grande	Très grande	Presque nulle

1. Réaction de synthèse

La synthèse de l'acétate d'éthyle est modélisée par la réaction d'équation :



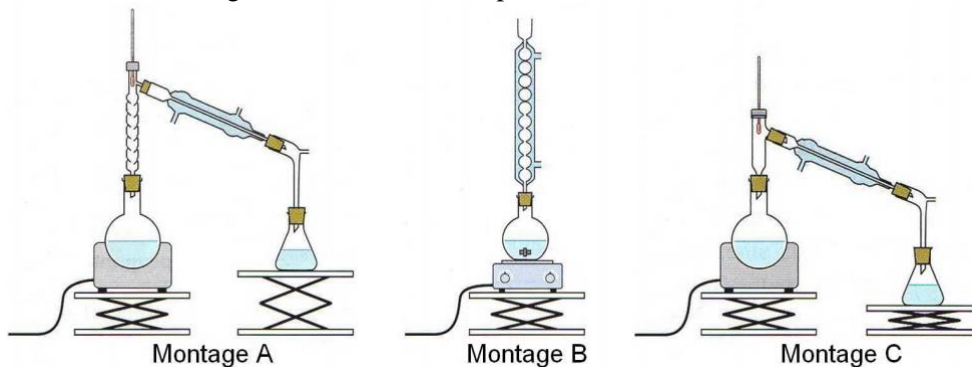
1.1. Identifier, en justifiant votre réponse, les fonctions chimiques des molécules organiques intervenant dans la réaction de synthèse.

1.2. Quel est le nom de l'acétate d'éthyle en nomenclature officielle ?

2. Protocole expérimental

2.1. Parmi les montages suivants, justifier celui qu'il convient de choisir pour l'étape 1.

Pourquoi les deux autres montages ne conviennent-ils pas ?



2.2. Proposer un titre pour nommer chacune des trois étapes du protocole.

2.3. Justifier, en argumentant avec une équation de réaction si cela est nécessaire, le choix dans ce protocole des conditions opératoires suivantes :

- ① ajout d'acide sulfurique concentré, ② chauffage à reflux, ③ mélange avec de l'eau salée, ④ ajout d'une solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium.

3. Rendement

3.1. Déterminer la valeur du rendement de la synthèse en expliquant la méthode mise en œuvre.

3.2. Est-il exact de dire que ce rendement est égal à la proportion d'éthanol consommé au cours de la transformation ? Commenter.

4. Mécanisme réactionnel

Le mécanisme réactionnel modélisant la réaction de synthèse de l'acétate d'éthyle à partir de l'acide acétique et l'éthanol comporte cinq étapes représentées sur l'annexe située **en annexe à rendre avec la copie**.

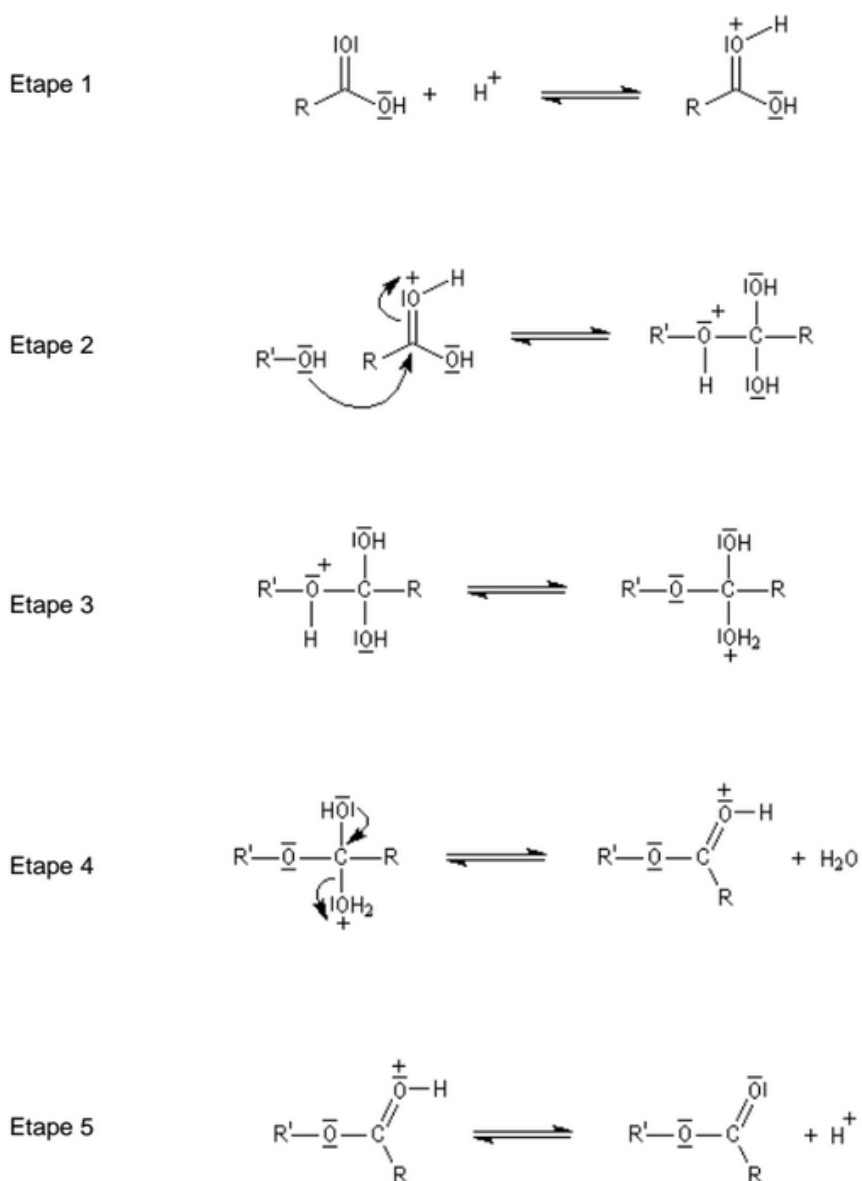
4.1. Quels groupes d'atomes correspondent respectivement aux lettres **R** et **R'** ?

4.2. Compléter les étapes 1 à 5 avec une ou plusieurs flèches courbes, si nécessaire.

Que représentent ces flèches courbes ?

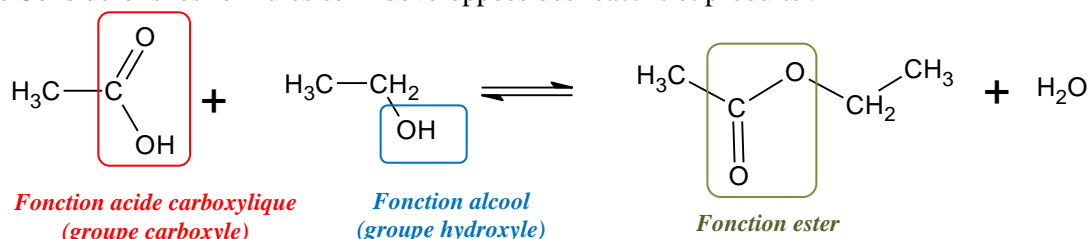
4.3. Donner la catégorie des réactions des étapes 2 et 4, dans le sens direct.

4.4. D'après le mécanisme proposé, quel est le rôle joué par H^+ dans la synthèse de l'acétate d'éthyle ? Commenter.

ANNEXE DE L'EXERCICE A RENDRE AVEC LA COPIE

CORRECTION DE L'EXERCICE 2 : SYNTHÈSE DE L'ACÉTATE D'ÉTHYLE

1.1. Considérons les formules semi développées des réactifs et produits :



1.2. L'acétate d'éthyle se nomme éthanoate d'éthyle en nomenclature officielle (éthylethanoate dans la nomenclature officielle anglo-saxonne).

2.1. C'est le montage B (chauffage à reflux) qu'il faut réaliser pour l'étape 1.

A et C permettent de réaliser une distillation (fractionnée avec colonne « vigreux » pour A et simple pour C).

2.2. **Étape 1** : synthèse ; **étape 2** : séparation des phases par décantation ; **étape 3** : purification de la phase organique.

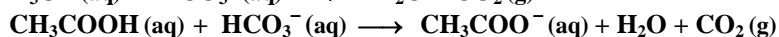
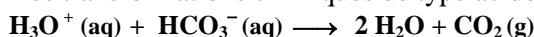
2.3. ① L'acide sulfurique est un catalyseur de la réaction qui, globalement, n'intervient pas dans le bilan de la réaction (son rôle est d'agir sur la cinétique de la transformation chimique).

② Le chauffage à reflux permet d'augmenter la vitesse de la transformation chimique (ce qui réduit son temps de demi-réaction) tout en évitant la perte de matière gazeuse (les vapeurs sont refroidies, se condensent et retournent dans le réacteur).

③ L'ajout d'eau salée facilite la séparation ou extraction du produit formé à partir du mélange réactionnel, par obtention de deux phases (l'ester est insoluble dans l'eau salée, ce qui isole une phase organique dans laquelle se trouve l'ester d'une phase aqueuse plus dense qui contient les quantités résiduelles des réactifs).

④ L'ajout d'une solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium a pour but d'éliminer tous les acides présents (acide sulfurique et acide acétique) qui peuvent imprégner la phase organique obtenue.

Des transformations chimiques de type acido-basique ont lieu, avec « dégazage » (formation de gaz CO_2) :



3.1. Le rendement « théorique » (en %) est défini par : $\eta = 100 \times \frac{x_{\text{fin}}}{x_{\text{max}}}$ où x est l'avancement de la réaction d'estérification. On a donc : $x_{\text{fin}} = n_{\text{ester formé}}$ en sachant cependant qu'il sera difficile de recueillir toute la quantité d'ester formée ! Et $x_{\text{max}} = n_{\text{ester max}}$ si la réaction est totale, valeur conditionnée par la quantité de réactif limitant introduite. On a donc : $\eta(\%) = 100 \times \frac{n_{\text{ester recueillie}}}{n_{\text{ester max}}}$.

Les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques (0,10 mol pour chacun), de sorte que

$$x_{\text{max}} = 0,10 \text{ mol et donc ici } n_{\text{ester max}} = 0,10 \text{ mol alors que } n_{\text{ester recueillie}} = \frac{m_{\text{recueillie}}}{M_{\text{ester}}} = \frac{\rho V_{\text{recueillie}}}{M_{\text{ester}}}$$

$$\text{A.N. : } n_{\text{ester recueillie}} = \frac{0,925 \times 5,9}{88,1} \approx 0,062 \text{ mol et } \eta(\%) = 100 \times \frac{0,062}{0,1} = 62.$$

3.2. Le rendement « théorique » est tel que $x_{\text{fin}} = n_{\text{ester formé}}$ sachant que x_{fin} désigne aussi la quantité de réactif « limitant » consommé (alcool ou acide introduits ici). Mais $n_{\text{ester formé}} \lesssim n_{\text{ester recueillie}}$ de par les pertes dues aux différentes manipulations (extraction et purification).

4.1. Par identification avec l'équation donnée au 1.1. : R – est CH_3- et R'– est C_2H_5- .

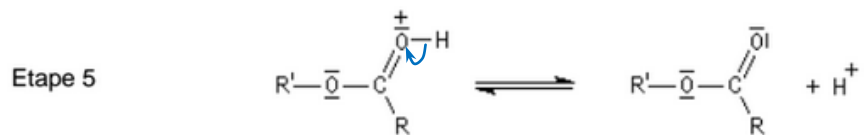
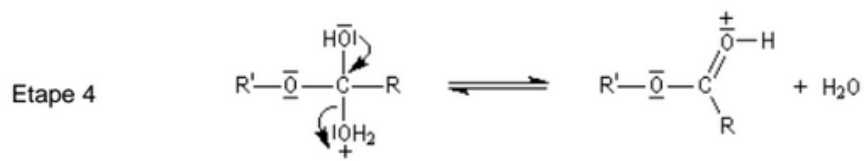
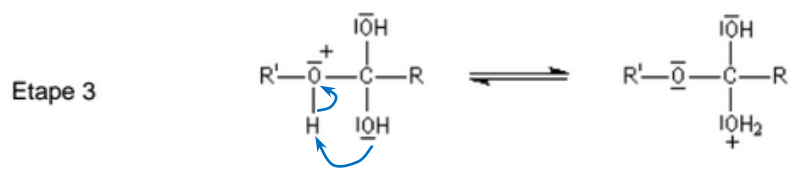
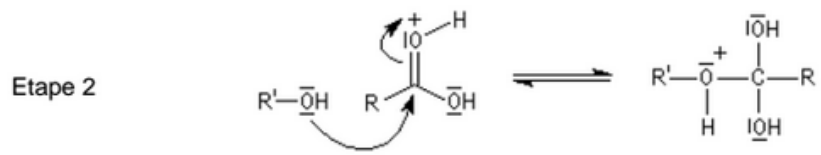
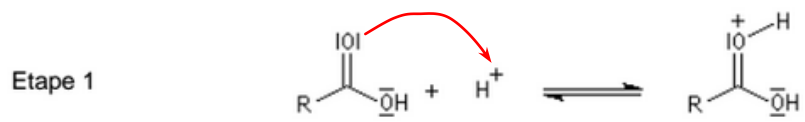
4.2. Des flèches courbes signalent des transferts de charges qui s'opèrent soit au sein de la molécule (réarrangement interne : flèches bleues), soit entre molécules (flèches rouges), d'un site donneur vers un site accepteur.

Voir page suivante : sont concernées les étapes 1, 3 et 5.

4.3. L'étape 2 correspond à une réaction d'addition alors que l'étape 4 est une réaction d'élimination.

4.4. Les ions H^+ participent aux étapes du mécanisme réactionnel mais sont recyclés (étape 5) après avoir été consommés (étape 1) : globalement, ils n'apparaissent pas dans le bilan de la réaction d'estérification.

Ils jouent bien le rôle de *catalyseur* : leur présence est nécessaire pour un bon déroulement des transformations opérées mais ils sont recyclés.



EXERCICE 3 : CONTROLES DE LA QUALITE D'UN LAIT (NON SPECIALISTES)

Le lait de vache est un liquide biologique de densité 1,03.

Il est constitué de 87 % d'eau, 4,7 % de lactose et de 3,5 à 4 % de matières grasses (proportions en masse).

Il renferme aussi de la caséine, des vitamines A et D, et des ions minéraux : calcium, sodium, potassium, magnésium, chlorure, etc. L'industrie laitière met en œuvre divers contrôles de qualité du lait, avant de procéder à sa transformation (production de yaourts par exemple) ou à sa commercialisation.

Cet exercice est consacré à deux de ces tests : la détermination de l'acidité « Dornic » et le dosage de la teneur en ions chlorure.

Données :

- pK_a du couple acide lactique / ion lactate : $pK_a (C_3H_6O_3 / C_3H_5O_3^-) = 3,9$ à 25 °C.
- Produit ionique de l'eau : $pK_e = 14$ à 25 °C.
- Masses molaires atomiques :

Atome	H	C	N	O	Na	Cl	Ag
$M (g \cdot mol^{-1})$	1,0	12,0	14,0	16,0	23,0	35,5	107,9

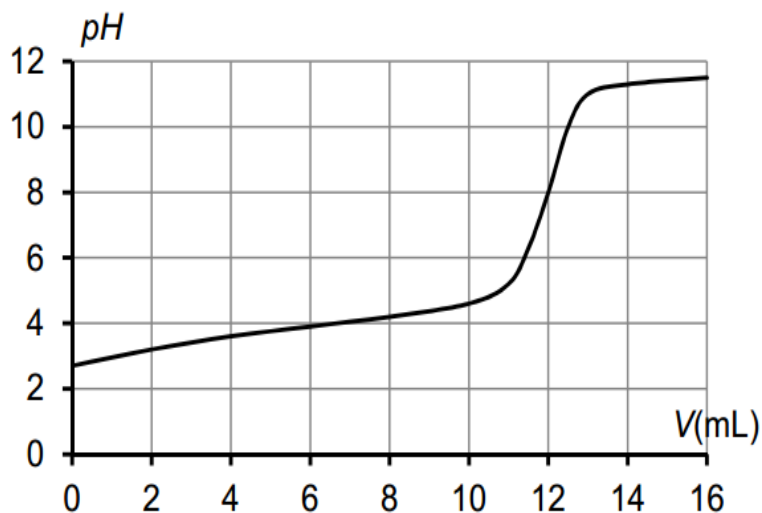
- Conductivités molaires ioniques à 25 °C :

Ion	Ag^+	Cl^-	NO_3^-
$\lambda^\circ (mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1})$	6,19	7,63	7,14

- Couleurs et zone de virage d'indicateurs colorés acido-basiques usuels :

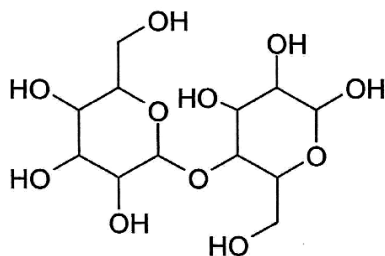
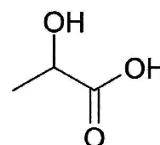
Indicateur coloré	Teinte de la forme acide	Zone de virage	Teinte de la forme basique
Hélianthine	rouge	$3,1 < pH < 4,4$	jaune
Bleu de bromothymol	jaune	$6,0 < pH < 7,6$	bleu
Phénolphtaléine	incolore	$8,0 < pH < 10$	rosé

- Courbe de titrage suivi par pH -métrie de 20,0 mL de solution d'acide lactique de concentration molaire $3,00 \times 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$ par une solution d'hydroxyde de sodium de concentration molaire volumique égale à $5,00 \times 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$.



Document : l'échelle d'acidité « Dornic »

Un lait frais est légèrement acide, son pH est compris entre 6,6 et 6,8. Cependant, le lactose subit naturellement une dégradation biochimique progressive sous l'effet des bactéries, et il se transforme en acide lactique. En conséquence, plus le pH du lait est faible et moins il est frais.

Lactose $C_{12}H_{22}O_{11}$ Acide lactique $C_3H_6O_3$

L'industrie laitière utilise le degré « Dornic » pour quantifier l'acidité d'un lait. Cette unité doit son nom à Pierre DORNIC (1864 - 1933), ingénieur agronome français. Un degré « Dornic » ($1\text{ }^\circ\text{D}$) correspond à 0,1 g d'acide lactique par litre de lait.

Pour être considéré comme frais, un lait doit avoir une acidité inférieure ou égale à $18\text{ }^\circ\text{D}$.

Entre $18\text{ }^\circ\text{D}$ et $40\text{ }^\circ\text{D}$, le lait caille (il « tourne ») lorsqu'on le chauffe ; c'est la caséine qui floccule. Au-delà de $40\text{ }^\circ\text{D}$, il caille à température ambiante.

Les yaourts ont une acidité Dornic généralement comprise entre $80\text{ }^\circ\text{D}$ et $100\text{ }^\circ\text{D}$.

Tableau de correspondance entre acidité Dornic et pH du lait :

Acidité Dornic ($^\circ\text{D}$)	pH
Inférieure à 18	Entre 6,6 et 6,8
20	6,4
24	6,1
Entre 55 et 60	5,2

1. Méthode Dornic

Un technicien dose l'acidité d'un lait selon la méthode Dornic, c'est-à-dire qu'il réalise le titrage à l'aide d'une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$) à $0,111\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, appelée soude « Dornic ». Il prélève 10,0 mL de lait, y ajoute deux gouttes de phénolphtaléine et verse la soude « Dornic » goutte à goutte en agitant le mélange, jusqu'à obtenir une couleur rose pâle.

Le volume de soude versée est alors de $2,1 \pm 0,1\text{ mL}$.

On admettra que l'acidité du lait est uniquement due à l'acide lactique.

1.1. Des ions lactate sont-ils présents dans un lait quel que soit son état de fraîcheur ? Justifier.

1.2. Écrire l'équation de la réaction support du titrage, en supposant que le seul acide présent dans le lait est l'acide lactique.

1.3. Justifier le choix de la phénolphtaléine comme indicateur de fin de réaction.

1.4. Pourquoi n'ajoute-t-on que deux gouttes de phénolphtaléine ?

1.5. Le lait dosé est-il frais ? Un raisonnement argumenté et des calculs rigoureux sont attendus.

1.6. Quel intérêt pratique y-a-t-il à choisir de la soude « Dornic » pour mesurer l'acidité d'un lait ?

2. Détermination de la teneur en ions chlorure

La mammite est une maladie fréquente dans les élevages de vaches laitières. Il s'agit d'une inflammation de la mamelle engendrant la présence de cellules inflammatoires et de bactéries dans le lait.

La composition chimique et biologique du lait est alors sensiblement modifiée. La concentration de lactose diminue, tandis que la concentration en ions sodium et en ions chlorure augmente. Cette altération du lait le rend impropre à la consommation. Dans le lait frais normal, la concentration massique en ions chlorure est comprise entre $0,8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ et $1,2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Pour un lait « mammiteux », cette concentration est égale ou supérieure à $1,4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

Dans un laboratoire d'analyse, une technicienne titre $20,0 \text{ mL}$ de lait mélangé à 200 mL d'eau déminéralisée par une solution de nitrate d'argent ($\text{Ag}^+_{(\text{aq})} + \text{NO}_3^-_{(\text{aq})}$) de concentration molaire $5,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

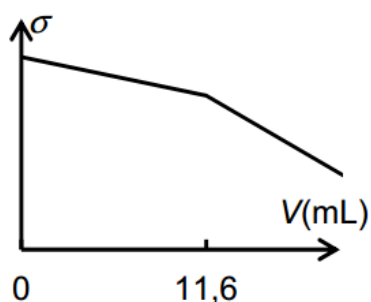
Les ions argent réagissent avec les ions chlorure pour former un précipité de chlorure d'argent $\text{AgCl}(\text{s})$.

Le titrage est suivi par conductimétrie.

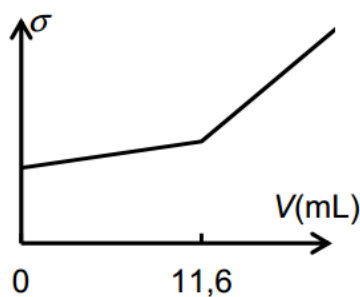
Le volume équivalent déterminé par la technicienne est $11,6 \pm 0,1 \text{ mL}$.

2.1. Écrire l'équation de la réaction support du dosage.

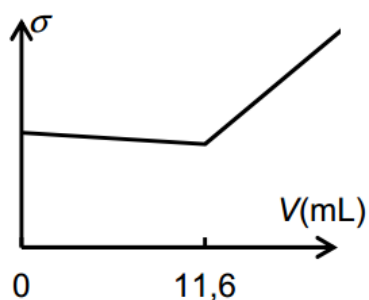
2.2. Parmi les représentations graphiques suivantes, quelle est celle qui représente l'allure de l'évolution de la conductivité σ du mélange en fonction du volume V de solution de nitrate d'argent versé ? Justifier.



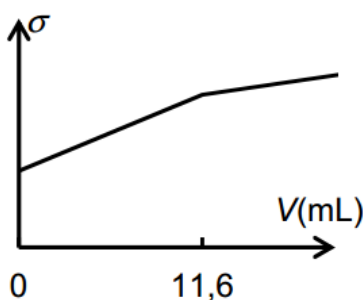
Proposition 1



Proposition 2



Proposition 3



Proposition 4

2.3. Le lait analysé est-il « mammiteux » ? Une réponse argumentée et des calculs rigoureux sont attendus.

CORRECTION EXERCICE 3 : CONTROLES DE LA QUALITE D'UN LAIT (NON SPECIALISTES)

1.1. Pour savoir si des ions lactate sont susceptibles d'être présents dans un lait donné, il faut comparer le pH du lait avec le pK_a du couple acido-basique dans lequel l'ion lactate est engagé.

D'après le document fourni, le pH du lait peut descendre au pire, à un peu plus de 5 alors qu'il est caillé à température ambiante ! Or le pK_a du couple acide lactique / ion lactate est égal à 3,9.

On a $pH > pK_a$ de plus de 1 unité : l'ion lactate est l'espèce majoritaire, qui sera toujours présente dans un lait quel que soit son état de fraîcheur.

1.2. La solution titrante d'hydroxyde de sodium est une base forte issue d'un cristal ionique entièrement dissocié dans l'eau en ses ions constitutifs. Ses propriétés basiques sont celles dues aux ions « hydroxyde » HO^- (aq) du couple H_2O / HO^- .

L'énoncé signale que « l'acidité du lait est uniquement due à l'acide lactique », espèce présente dans la solution à titrer, qui appartient au couple $C_3H_6O_3 / C_3H_5O_3^-$.

L'équation de la réaction support du titrage est donc : $C_3H_6O_3(aq) + HO^-(aq) \longrightarrow C_3H_5O_3^-(aq) + H_2O$ (1)

1.3. Un indicateur coloré est approprié à un titrage colorimétrique acido-basique si le saut de pH observé autour de l'équivalence s'opère bien dans une bande de valeurs de pH qui inclut la zone de virage de l'indicateur coloré. La courbe de titrage pH -métrique fournie, qui ne se rapporte pas à un dosage d'un lait mais qui concerne une solution d'acide lactique, montre que le saut de pH s'effectue entre $pH = 6$ et 10, ce qui justifie le choix de la phénolphthaléine (qui vire autour de $pH = 9$).

Remarque :

Pour l'acide lactique du lait, le saut de pH serait beaucoup plus « flou », puisque la solution à titrer aurait un pH de départ proche de 6 ! Le choix de la phénolphthaléine s'imposerait alors ! Mais il sera très difficile d'apprécier précisément le volume nécessaire pour atteindre l'équivalence : le changement de teinte ne sera net que si la solution titrante est suffisamment concentrée, de sorte que le saut de pH puisse s'effectuer en ne versant que quelques gouttes de solution titrante à partir du moment où on aborde ce « saut » !

Voilà pourquoi la solution « Dornic » est relativement concentrée avec l'inconvénient pour le technicien de n'avoir à verser que 2,1 mL (admirer la précision : avec quelle pièce de verrerie a-t-il travaillé ?).

1.4. La phénolphthaléine appartient à un couple de type $HInd / Ind^-$ dont la forme Ind^- est colorée en rose fuchsia. Si l'on verse trop d'indicateur coloré dans la solution à titrer qui est acide, $HInd$ est alors majoritaire et c'est donc un acide qui va consommer certains des ions HO^- apportés ! On va donc surestimer légèrement le volume nécessaire pour atteindre l'équivalence.

1.5. Pour savoir si le lait dosé est frais, il faut déterminer son degré « Dornic », c'est-à-dire doser son acide lactique, ce qui a été opéré par le technicien, selon un titrage acido-basique opéré par colorimétrie.

Il s'agit de repérer l'équivalence E, telle que les espèces introduites constituant les réactifs selon l'équation (1) aient été apportées dans les proportions stœchiométriques.

On a alors : $\frac{n_{\text{acide lactique prélevé}}}{1} = \frac{n_{\text{ions hydroxyde versés à E}}}{1}$, relation qu'on écrit plus simplement ici $n_a = n_b$, soit encore :

$C_a V_a = C_b V_{bE}$, si a est l'acide lactique présent dans l'échantillon à titrer et b la solution titrante de soude.

On obtient : $C_a = \frac{C_b V_{bE}}{V_a}$; la concentration massique t en acide lactique sera égale à : $t = C_a \times M_a$.

On calcule avec les données : $M_a = 90 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. On calcule ensuite : $t = \frac{0,111 \times 2,1}{10,0} \times 90 \approx 2,1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

D'après la définition du degré « Dornic », le lait titré a une acidité de 21 °D : il n'est pas frais puisque ce degré dépasse le seuil fixé à 18 °D !

Sachant que le volume versé à l'équivalence est apprécié à $\pm 0,1$ mL (on ne sait pas si ce sont les graduations qui sont prises en compte où si c'est le « flou » pour déterminer le virage), l'erreur de lecture entraîne une indétermination de l'ordre de 5 % sur sa valeur relevée (2,1 mL) et donc une incertitude relative de cet ordre sur la détermination de t qui ne remet pas en cause le « diagnostic » opéré sur la qualité du lait analysé.

1.6. On peut remarquer l'intérêt de la solution « Dornic » de soude dont la valeur de la concentration molaire, suffisamment élevée pour obtenir un virage net de l'indicateur coloré, est choisie de sorte que le technicien n'a qu'à relever le volume versé à l'équivalence pour obtenir le « titre massique » !

2.1. C'est un exemple de dosage par précipitation entre les ions « chlorure » Cl^- (aq), espèce à titrer, avec les ions « argent (I) » Ag^+ (aq), espèce titrante.

L'équation de la réaction support du titrage est : $Ag^+(aq) + Cl^-(aq) \longrightarrow AgCl(s)$.

2.2. L'équivalence se traduit graphiquement par un changement des pentes des courbes qui traduisent l'évolution de la conductivité du mélange réactionnel.

- Avant l'équivalence, on détruit une certaine quantité d'ions chlorure par les ions d'argent Ag^+ versés qui sont le réactif limitant, tout en apportant une égale quantité d'ions nitrate NO_3^- ; ces derniers remplacent donc les ions chlorure détruits Cl^- mais comme ils ont une conductivité molaire un peu plus faible que celle des ions chlorure Cl^- (voir tableau), la conductivité du mélange réactionnel doit globalement légèrement diminuer.

- Au changement de pente s'opère l'équivalence.

- Après l'équivalence, on apporte des ions Argent (I) et nitrate qui demeurent dans le milieu : la conductivité de la solution croît.

⇒ Seule la courbe (3) traduit ces observations.

2.3. Pour déterminer si le lait est « mammiteux », il faut déterminer sa concentration massique en ions chlorure à partir du titrage réalisé.

L'équivalence est atteinte ici si : $\frac{n_{\text{ions chlorure prélevés}}}{1} = \frac{n_{\text{ions argent versés à E}}}{1}$, soit encore : $(n_{\text{Cl}^-})_{\text{prélevés}} = (n_{\text{Ag}^+})_{\text{E}}$.

On obtient la relation : $C_{\text{Cl}^-} V_{\text{Cl}^-} = C_{\text{Ag}^+} (V_{\text{Ag}^+})_{\text{E}}$ et $t = C_{\text{Cl}^-} \times M_{\text{Cl}^-}$.

On relève sur la courbe 3, $(V_{\text{Ag}^+})_{\text{E}} = 11,6$ mL.

On obtient : $C_{\text{Cl}^-} = \frac{5,00 \times 10^{-2} \times 11,6}{20,0} = 0,029 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et $t = 0,029 \times 35,5 \approx 1,03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

Ici, le volume à l'équivalence est connu avec une bonne précision (de l'ordre de 1 %) et donc le titre massique est déterminé avec précision.

Le lait analysé peut être considéré à coup sûr comme non « mammiteux » car sa concentration massique en ions « chlorure » est comprise entre $0,8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ et $1,2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

EXERCICE 3 : EAU POTABLE OU NON ? (SPECIALISTES)

Le paranitrophénol (PNP) est un polluant organique qui se forme lors de la biodégradation de certains pesticides. Une exposition excessive à ce composé peut provoquer une méthémoglobinémie : c'est-à-dire une diminution de la capacité du sang à transporter le dioxygène dans les cellules. C'est la raison pour laquelle il faut surveiller sa présence dans les eaux de boisson.

La valeur maximale de la concentration en PNP d'une eau potable autorisée par la commission européenne est $0,1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. En revanche, le seuil fixé par l'agence américaine de protection environnemental EPA (United States Environmental Protection Agency) est $60 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, tandis que la valeur tolérée par le conseil environnemental brésilien est $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

À l'occasion d'un stage dans un laboratoire d'analyse chimique aux USA, un groupe d'étudiants français met au point un protocole de dosage spectrophotométrique du PNP et le met en œuvre (document 1) pour étudier la potabilité d'une eau E destinée à la consommation sur le continent américain.

Résolution de problème :

L'objectif de cet exercice est de répondre de manière argumentée à la question que se posent les étudiants ingénieurs : **l'eau analysée est-elle potable ?**

Pour construire et développer votre argumentation, vous mobiliserez vos connaissances et vous vous aiderez des deux documents fournis et des données, et vous répondrez au préalable aux deux questions suivantes :

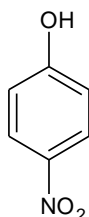
- Dans les conditions expérimentales mises en œuvre par les étudiants, sous quelle forme se trouve le PNP dans les solutions ?
- Pourquoi est-il justifié de choisir une radiation visible plutôt qu'une radiation ultraviolette pour les mesures d'absorbance ?

La qualité de la rédaction, la structuration de l'argumentation, l'analyse critique des conditions expérimentales, la rigueur des calculs, ainsi que toute initiative prise pour mener à bien la résolution du problème seront valorisées.

Données : caractéristiques physique et chimiques du paranitrophénol

- Formule brute : $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3$

- Formule topologique :



- Aspect physique à 20 °C : solide cristallin jaune pâle
- Température d'ébullition : 279 °C
- Température de fusion : 116 °C
- Le groupe hydroxyle – OH du paranitrophénol présente un caractère acide : $pK_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3 / \text{C}_6\text{H}_4\text{NO}_3^-) = 7,2$.

Document 1 : extrait du carnet de laboratoire rédigé par les étudiants

On procède tout d'abord à une évaporation de l'eau E de manière à accroître fortement la concentration en PNP. La solution S ainsi obtenue est cent fois plus concentrée que la solution E.

À partir d'une solution aqueuse S_0 de paranitrophénol de concentration $C_0 = 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, on prépare cinq solutions filles S_i de volume $V = 100,0 \text{ mL}$ en prélevant un volume V_i de solution S_0 complété à $100,0 \text{ mL}$ par une solution tampon de $pH = 10,4$.

On règle le spectrophotomètre sur la longueur d'onde $\lambda = 400 \text{ nm}$. On « effectue le blanc » de telle manière que l'absorbance soit nulle avec la solution tampon de $pH = 10,4$.

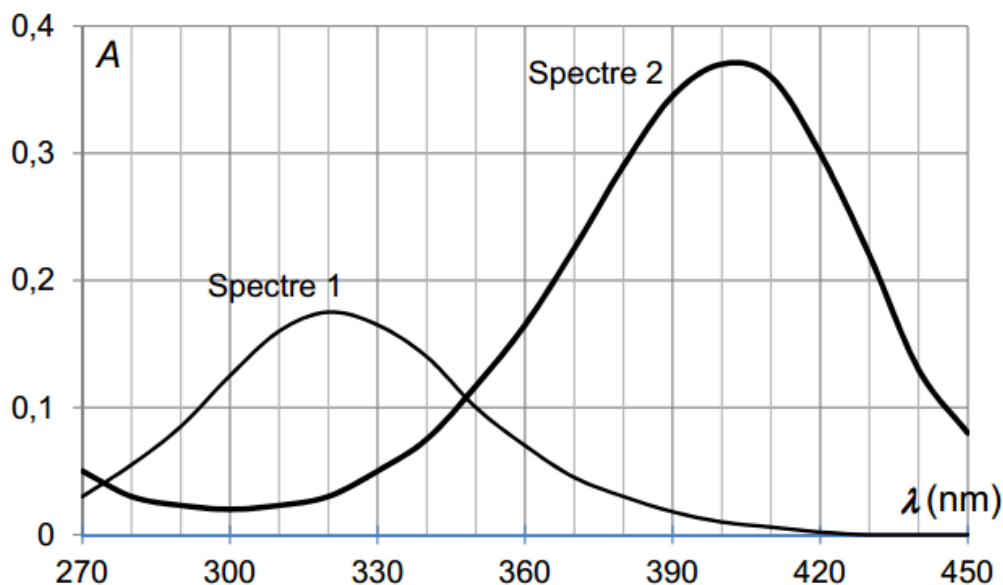
On mesure l'absorbance des différentes solutions S_i préparées.

Les résultats des mesures sont regroupés dans le tableau suivant :

Solution	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
V_i (mL)	1,0	2,0	3,0	5,0	7,5
A	0,128	0,255	0,386	0,637	0,955

On mélange $50,0 \text{ mL}$ de la solution S avec $50,0 \text{ mL}$ de solution tampon de $pH = 10,4$ puis on mesure l'absorbance de la solution S' ainsi obtenue.

On obtient une absorbance $A' = 0,570 \pm 0,010$.

Document 2 : spectres d'absorption de solutions aqueuses de PNP en milieu acide et en milieu basique

Spectre 1 : solution aqueuse de paranitrophénol de concentration molaire $2,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en milieu acide ($pH = 5$).

Spectre 2 : solution aqueuse de paranitrophénol de concentration molaire $2,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en milieu basique ($pH = 10$).

CORRECTION EXERCICE 3 : EAU POTABLE OU NON ? (SPECIALISTES)**1) Questions préalables :**

– En consultant le carnet de laboratoire, on constate que toutes les manipulations ont été opérées dans un milieu aqueux où le pH est contrôlé (valeur imposée de 10,4). Ce pH surpasse le pK_a du couple acido-basique, dans lequel est engagé le PNP, de plus d'une unité : c'est donc la forme basique A^- de ce couple, c'est-à-dire l'ion $C_6H_4NO_3^-$ (aq) qui est majoritaire en solution.

– Puisque le protocole opère en milieu basique, c'est le spectre 2 d'absorption qu'il convient de consulter : le maximum d'absorption se situe à 400 – 410 nm. Il faut donc éclairer chaque échantillon par une radiation monochromatique visible située dans le domaine du violet : plus la longueur d'onde choisie est proche de celle correspondant au maximum d'absorption, plus sensible sera la méthode colorimétrique mise en œuvre.

2) Résolution du problème : mode opératoire

Pour décider de la potabilité de l'eau analysée vis-à-vis des traces de PNP qu'elle est susceptible de renfermer, il faut procéder à un dosage de ce pesticide de façon à en déterminer sa concentration massique.

Un dosage non destructif par colorimétrie est adapté à ce contrôle : en effet, comme le montre le document 2, une solution de PNP, de concentration massique nominale a priori compatible (*) avec celle que l'on pourrait rencontrer dans le cas d'une eau polluée à analyser, absorbe de façon significative les radiations violettes.

Or l'absorbance mesurée est proportionnelle à cette concentration, selon la loi de Beer-Lambert.

C'est pourquoi on peut conduire un dosage par comparaison : on bâtit une échelle de teintes, avec des tubes contenant une série de solutions titrées de PNP, de façon à obtenir une courbe d'étalonnage lorsqu'on mesure leur absorbance.

La mesure de l'absorbance d'un échantillon préparé à partir de l'eau à analyser est portée sur la courbe d'étalonnage de façon à en déduire sa concentration massique.

Celle-ci sera ramenée ensuite à sa valeur réelle compte tenu des opérations menées préalablement pour préparer l'échantillon à analyser.

(*) : on a $c = 2 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, soit $C_m = c \times M$ qui vaut ici $2 \times 10^{-5} \times 139 \approx 0,003$ ou $\approx 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

C'est quand même bien plus concentré que ce que l'on souhaite détecter !

C'est pourquoi il faut absolument « reconcentrer » par évaporation la solution à analyser, comme le propose le protocole.

3) Résolution du problème : traitement des données et courbe d'étalonnage

Il faut construire la courbe d'étalonnage à partir du tableau des mesures effectuées.

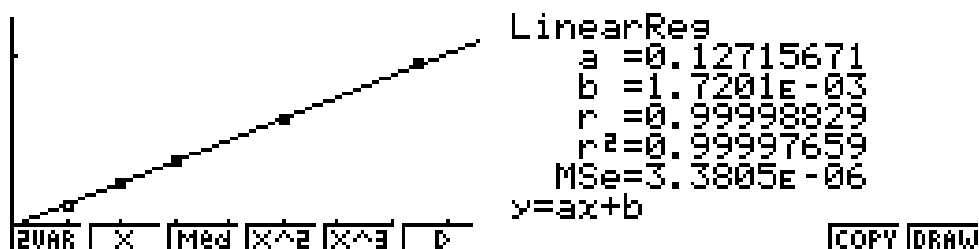
Il faut cependant compléter ce tableau en indiquant la concentration massique de chaque tube i qui est telle

que : $C_i = C_0 \times \frac{V_i}{V_{\text{total}}}$ où C_0 est la concentration massique de la solution mère ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), V_i le volume

prélevé et $V_{\text{total}} = 100 \text{ mL}$.

On remarque immédiatement que la valeur numérique de C_i est aussi celle de V_i .

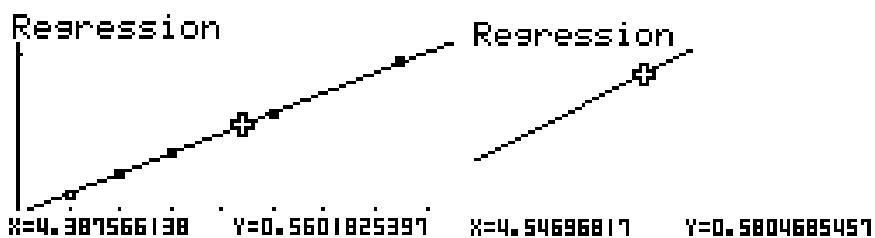
Sur calculatrice, en mode STAT, on peut alors entrer le tableau des données, tracer la courbe d'étalonnage et éventuellement la modéliser.



On remarque que cette courbe d'étalonnage est modélisée par une fonction linéaire d'équation :

$A = 0,127 \times C$, si C désigne la concentration massique en PNP (l'ordonnée à l'origine a une valeur négligeable : la droite obtenue passe pratiquement par l'origine des coordonnées).

C'est bien ce que prévoit la loi de Beer-Lambert.

4) Résolution du problème : calcul de la concentration massique de l'eau analysée

On peut placer la valeur mesurée de l'absorbance sur la droite d'étalonnage, ou éventuellement utiliser l'équation de celle-ci.

On obtient, pour l'échantillon à analyser, $A = 0,057 \pm 0,001$.

Ici, on va directement utiliser la courbe d'étalonnage.

Graphiquement, on cherche donc les concentrations qui correspondent à $A = 0,0056$ et $A = 0,0058$, en utilisant les fonctions TRACE et ZOOM.

On relève $C_{\min} = 4,39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ et $C_{\max} = 4,55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, donc $C = 4,47 \pm 0,08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Or cet échantillon a été dilué 2 fois par rapport à la solution concentrée S obtenue après évaporation partielle de E (ajout de 50 mL de solution tampon à 50 mL de S).

Donc, pour S , $C_S = 8,94 \pm 0,16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

L'échantillon E est 100 fois moins concentré, ce qui conduit à :

$C_E = 0,0894 \pm 0,0016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, ou encore : $C_E = 89,4 \pm 1,6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

Cette valeur dépasse le seuil préconisé par l'agence américaine EPA et n'est donc pas potable.

Elle serait évidemment impropre à la consommation en Europe, mais jugée potable au Brésil : quel seuil est tolérable pour l'opinion publique d'un pays donné, à un instant donné, selon des experts donnés ?

On voit bien sur cet exemple que c'est évidemment une affaire de convention qui conditionne, auprès du grand public, ce que l'on appelle le « principe de précaution ».