

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2024

—

**PHYSIQUE-CHIMIE**

(Classes de terminale voie générale spécialité physique-chimie)

Durée : 5 heures

—

*L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.  
L'usage de la calculatrice sans mémoire « type collègue » est autorisé.*

**Consignes aux candidats**

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Ne joindre aucun brouillon
- Ne pas composer dans la marge
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL Epreuve : Physique-chimie Matière : PHCH Session : 2024

**Tournez la page S.V.P.**

# Physico-chimie du corps humain

Ce sujet propose de modéliser et d'étudier plusieurs aspects du fonctionnement du corps humain, dans le contexte de la physique et de la chimie. Le sujet est composé de quatre parties indépendantes : la vue, la digestion : synthèse d'un médicament antispasmodique, le système nerveux et le cœur : pompe de la circulation sanguine.

Le candidat est invité à se référer régulièrement à l'annexe qui contient un ensemble de données et de relations utiles. Cette annexe se trouve au début du sujet : il est important d'en prendre connaissance avant de s'engager dans la résolution du problème. Les différents documents présents tout le long du sujet contiennent également des données complémentaires nécessaires à la résolution des questions posées.

Les réponses aux questions ne sauraient être de simples affirmations et devront être accompagnées d'une justification.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées par le candidat sur sa copie ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées.

## Formulaire et données

- 1 mmHg = 133 Pa.
- Température (en kelvins) = Température (en degrés celsius) + 273,15.
- Loi de Descartes pour une lentille mince de focale  $f'$ , de centre  $O$ , conjuguant l'image  $A'$  et l'objet  $A$  :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$

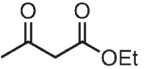

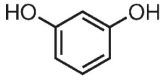

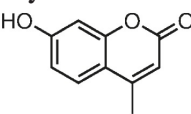



- Diffraction d'une onde par une ouverture :

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a},$$

où  $\theta$  est l'angle caractéristique de la diffraction,  $a$  la taille de l'ouverture et  $\lambda$  la longueur d'onde de l'onde diffractée.

- Constante de Planck :  $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- Charge élémentaire de l'électron :  $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
- Masse volumique de l'eau (à 25 °C) :  $\rho_{eau} = 1,00 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ .
- Approximation des petits angles :  $\sin \theta \approx \theta$  et  $\tan \theta \approx \theta$  pour un angle  $\theta$  petit ( $\theta \ll 1$ ).

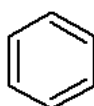
## Informations diverses sur des espèces chimiques rencontrées dans le sujet

Nom	Constantes physiques	Pictogrammes
<p><b>Acétoacétate d'éthyle</b></p>  <p><math>C_6H_{10}O_3</math></p>	<p><math>M = 130,14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}</math>            Densité <math>d = 1,03</math> (à <math>20^\circ\text{C}</math>)  <math>\theta_{\text{ébullition}} = 181^\circ\text{C}</math> (sous <math>P = 1 \text{ bar}</math>)            Assez miscible avec l'eau,            miscible avec l'éthanol.</p>	
<p><b>Résorcinol</b></p>  <p><math>C_6H_6O_2</math></p>	<p><math>M = 110,11 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}</math>  <math>\theta_{\text{fusion}} = 109^\circ\text{C}</math> (sous <math>P = 1 \text{ bar}</math>)            Très soluble dans l'eau, soluble            dans l'éthanol.</p>	
<p><b>Hymécromone</b></p>  <p><math>C_{10}H_8O_3</math></p>	<p><math>M = 176,17 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}</math>  <math>\theta_{\text{fusion}} = 188-190^\circ\text{C}</math> (sous <math>P = 1 \text{ bar}</math>)            Soluble dans l'éthanol, insoluble            dans l'eau froide, très peu            soluble dans l'eau chaude.</p>	
<p><b>Éthanol</b></p> <p><math>C_2H_6O</math></p>	<p>Densité <math>d = 0,789</math> (à <math>20^\circ\text{C}</math>)  <math>\theta_{\text{ébullition}} = 78^\circ\text{C}</math> (sous <math>P = 1 \text{ bar}</math>)</p>	
<p><b>Toluène</b></p> <p><math>C_7H_8</math></p>	<p>Densité <math>d = 0,867</math> (à <math>20^\circ\text{C}</math>)  <math>\theta_{\text{ébullition}} = 111^\circ\text{C}</math> (sous <math>P = 1 \text{ bar}</math>)</p>	

**Table simplifiée des nombres d'onde en spectroscopie infrarouge :**

Liaison	Nombre d'onde (cm <sup>-1</sup> )	Intensité
OH (alcool)	3200-3400	forte, bande large
CH	2800-3100	moyenne à forte
CH (aldéhyde)	2750-2900	moyenne, 2 bandes
OH (acide)	2500-3200	moyenne à forte, bande large
C = O (ester)	1700-1740	forte
C = O (aldéhyde et cétone)	1650-1730	forte
C = O (acide)	1680-1710	forte
C = O (amide)	1650-1700	forte
C = C	1625-1685	moyenne
C = C (aromatique) (*)	1450-1600	variable, 3 ou 4 bandes
C - O	1050-1450	forte
C - C	1000-1250	forte


(\*) Un composé aromatique comporte par exemple un noyau benzénique :



*Remarque :* le nombre d'onde d'une liaison C=C ou C=O peut être abaissé de 20 à 30 cm<sup>-1</sup> si cette liaison est voisine d'une autre liaison C=C ou C=O (on dit alors que ces liaisons sont conjuguées).

**Tournez la page S.V.P.**

## Fiche de sécurité du toluène



**TOLUÈNE**

**Danger**

H225 - Liquide et vapeurs très inflammables  
H304 - Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires  
H315 - Provoque une irritation cutanée  
H336 - Peut provoquer somnolence ou vertiges  
H361d - Susceptible de nuire au fœtus  
H373 - Risque présumé d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée

Nota : Les conseils de prudence P sont sélectionnés selon les critères de l'annexe 1 du règlement CE n° 1272/2008.  
203-625-9

## Fiche de sécurité du trichlorure de phosphoryle



**TRICHLORURE DE PHOSPHORYLE**

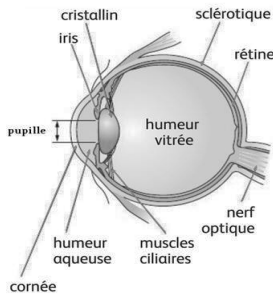
**Danger**

H302 - Nocif en cas d'ingestion  
H314 - Provoque de graves brûlures de la peau et de graves lésions des yeux

H330 - Mortel par inhalation  
H372 - Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée  
EUH 014 - Réagit violemment au contact de l'eau  
EUH 029 - Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques

Nota : Les conseils de prudence P sont sélectionnés selon les critères de l'annexe 1 du règlement CE n° 1272/2008.  
233-046-7

# 1 La vue



Du point de vue de la formation des images, les parties importantes de l'œil sont les suivantes :

- la **pupille** joue le rôle de diaphragme : elle limite la quantité de lumière arrivant dans l'œil ;
- le **cristallin** permet la mise au point ;
- la **rétine**, constituée des cônes et des bâtonnets, est un capteur de lumière. Elle est assimilée à un écran.

Quelle que soit la position de l'objet à observer par rapport à l'observateur, l'image de cet objet, pour être nette, doit se former sur la rétine. La distance cristallin-rétine étant constante et de l'ordre de 1,5 cm, en fonction de la position de l'objet à observer, le cristallin modifie ses caractéristiques afin que l'image se forme sur la rétine.

- Lorsqu'un objet est observé au loin, le cristallin est relâché et sa distance focale est grande (la vergence est petite, le cristallin est peu convergent). On dit que l'œil est au repos ou qu'il n'accommode pas. Le point le plus éloigné visible est le punctum remotum : pour un œil normal, il est à l'infini.
- Lorsqu'un objet est observé de près, le cristallin est bombé et sa distance focale est diminuée (la vergence augmente, le cristallin est plus convergent). On dit que l'œil accommode. Le point le plus proche visible est le punctum proximum : pour un œil normal, il est situé à 25 cm environ.

Doc. 1 – L'œil

## 1.1 Formation des images

### 1.1.1 Œil sain

Dans une modélisation préliminaire, on considère le schéma optique équivalent suivant :

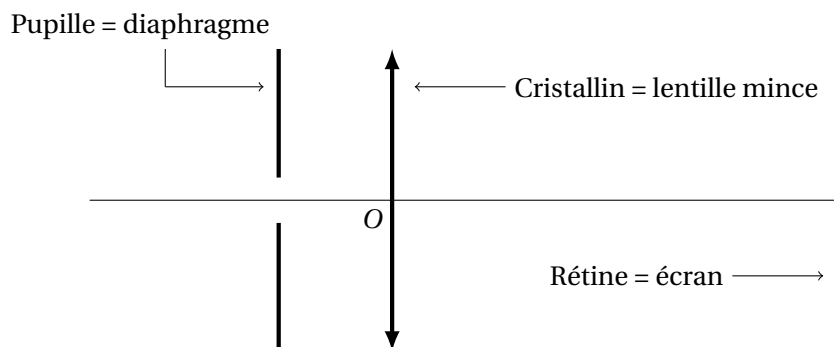


FIGURE 1 – Modèle optique simplifié de l'œil.

1 – En exploitant les informations contenues dans le document 1 et la figure 1, **déterminer** la valeur de la distance focale du cristallin lorsque l'œil regarde à l'infini. On la notera  $f_{PR}$  par la suite.

2 – **Faire** de même pour déterminer  $f_{PP}$  la distance focale du cristallin quand l'œil regarde l'objet le plus proche qu'il peut voir net.

Pour comprendre comment le cristallin modifie la distance focale de la lentille équivalente, on considère que l'œil est une sphère de rayon  $a$  et d'indice  $n$ . Un rayon lumineux incident arrive sur l'œil, parallèlement à l'axe optique, avec une hauteur  $h$  petite devant  $a$  (voir figure 2 ci-après). Il est alors réfracté et atteint la rétine en son centre. Dans toute cette partie on se place dans l'approximation des petits angles, ce qui revient à supposer  $h \ll a$ .

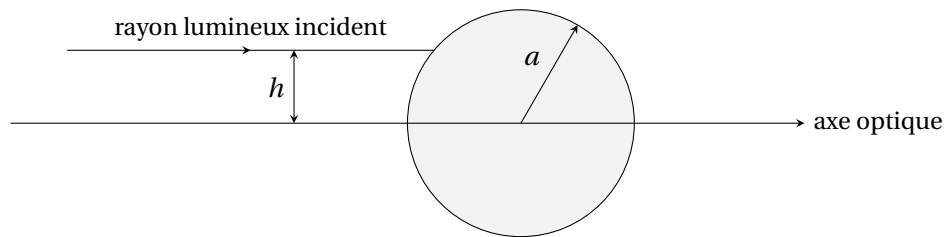


FIGURE 2 – Modèle sphérique de l'œil.

3 – **Reproduire** le schéma et **poursuivre** la marche du rayon lumineux incident. **Indiquer** les angles d'incidence  $i$  et de réfraction  $r$ . On suppose que l'œil est au repos.

4 – **Évaluer** l'indice optique équivalent de la sphère pour que l'image d'un objet à l'infini se forme sur la rétine.

5 – Lorsqu'il se contracte, le cristallin modifie la courbure de la sphère localement (cela revient à modifier le rayon apparent de l'œil au niveau de l'entrée des rayons). Avec un schéma clair et en s'aidant des questions précédentes, **déterminer** si, pour voir de plus près, le cristallin diminue ou augmente le rayon apparent de l'œil.

### 1.1.2 Correction d'un œil myope

On reprend pour l'œil le modèle optique simplifié de la figure 1.

6 – **Montrer** que deux lentilles minces accolées de distances focales respectives  $f_1$  et  $f_2$  sont équivalentes à une lentille mince de focale  $f_{eq}$  telle que  $\frac{1}{f_{eq}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$ .

7 – On considère un œil myope : il voit au plus loin à 40 cm. **Déterminer** la valeur de la distance focale de la lentille de contact qui permettra de corriger sa vue.

## 1.2 Les capteurs photosensibles : cônes et bâtonnets

### 1.2.1 Sensibilité des capteurs photorécepteurs

La rétine est tapissée de cellules photoréceptrices de deux types :

- les cônes : ils possèdent un pigment photosensible, l'opsine, sous trois variétés. Des différences dans la séquence des acides aminés de cette protéine rendent compte de leur courbe d'absorption différente de la lumière (voir graphique de la figure 3). Par conséquent, ces trois variétés d'opsine déterminent trois types de cônes à la sensibilité spectrale différente.
- les bâtonnets : ils possèdent tous la même protéine appelée rhodopsine. Les bâtonnets ne permettent pas de distinguer les couleurs.



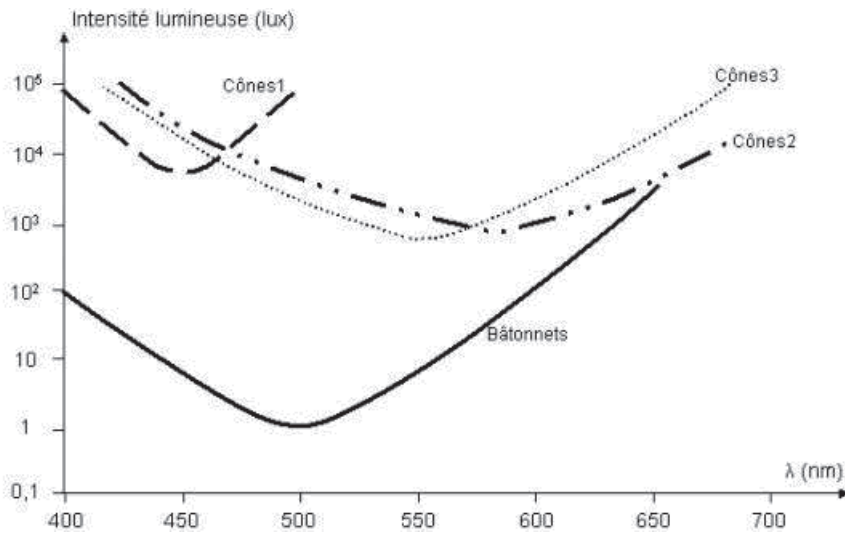


FIGURE 3 – Intensité minimale de stimulation des photorécepteurs en fonction de la longueur d'onde.

Pour tracer ces courbes, les photorécepteurs ont été exposés à des longueurs d'ondes différentes. Pour chaque longueur d'onde, le photorécepteur a été soumis d'abord à une intensité lumineuse très faible, puis de plus en plus forte (mesurée en lux). Le graphique représente l'intensité lumineuse minimale pour laquelle le photorécepteur réagit.

#### Doc. 2 – Sensibilité des capteurs photorécepteurs

**8 – Justifier** à partir du graphique de la figure 3 (document 2) que les bâtonnets sont associés à la vision nocturne.

**9 –** Chaque type de cône (1, 2 ou 3) est associé à la couleur à laquelle il est le plus sensible parmi les couleurs rouge, vert ou bleu. **Identifier** les couleurs associées à chaque type de cône.

**10 –** Le lux est une unité de puissance lumineuse adaptée à l'œil humain. Comme le montre la figure 3 du document 2, la longueur d'onde  $\lambda = 550 \text{ nm}$  est celle de plus grande sensibilité pour les cônes humains. À cette longueur d'onde, un éclairage de  $1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  correspond à 683 lux. Le diamètre moyen de la pupille de jour est de  $\mathcal{D}_p = 3,0 \text{ mm}$ .

**Calculer** la valeur de la puissance minimale en watt que doit recevoir l'œil pour détecter un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda = 550 \text{ nm}$ .

**11 – Calculer** la valeur correspondante du débit de photons (en photons par seconde).

#### 1.2.2 Taille des capteurs

Les capteurs ont une surface définie et une densité variable selon les zones de la rétine qui limitent à la fois la résolution de la vision humaine (distinction de détails) et la profondeur de champ (intervalle de distance où l'œil voit net pour une accommodation donnée).

L'image d'un point est vue nette lorsque la tache créée sur la rétine est plus petite que la surface du capteur. On appelle profondeur de champ la distance entre les deux points extrêmes de l'axe optique dont les images sont vues nettement sur le capteur de l'œil. La profondeur de champ est liée à la structure granulaire du capteur.

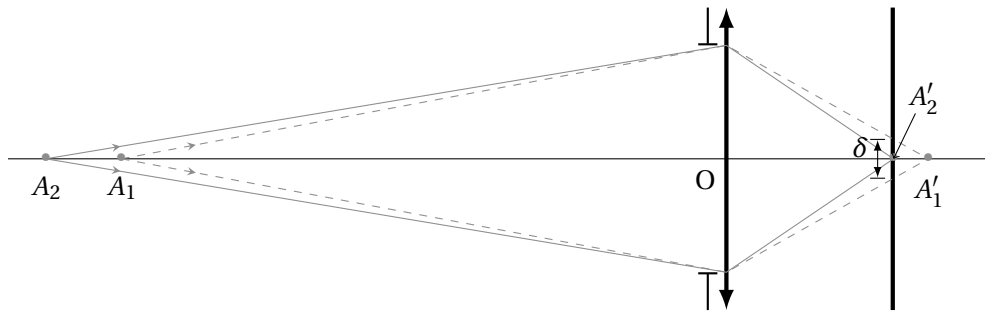


FIGURE 4 – Profondeur de champ.

Dans la situation représentée sur la figure 4, la mise au point est faite sur  $A_2$  donc l'image  $A'_2$  se forme exactement sur le capteur. L'image  $A'_1$  de  $A_1$ , situé plus près de  $O$  que  $A_2$ , se forme plus loin de  $O$ , un peu après le capteur. Les rayons issus de  $A_1$  convergent vers  $A'_1$  et forment donc sur le plan du capteur une tache image de diamètre  $\delta$ . Ainsi, tout point objet  $A_1$  sera vu net (*i.e.* aura une image ponctuelle à l'échelle du capteur) tant que  $\delta < \varepsilon$ , où  $\varepsilon$  est la taille caractéristique du capteur (le côté du carré si on considère des capteurs carrés).

**Doc. 3** – Profondeur de champ

**12** – Sur la fovéa, zone centrale de la rétine avec la plus grande densité de cônes, il y a en moyenne  $2 \times 10^5$  cônes par  $\text{mm}^2$ . Par simplicité, on considérera les capteurs comme des carrés. Dans le cas d'un œil qui n'accomode pas, **évaluer** la distance à laquelle se situe l'objet le plus proche que l'œil voit net.

Le pouvoir séparateur d'un instrument optique est l'angle minimal séparant deux points qui sont vus séparément (c'est-à-dire par deux capteurs différents).

Pour un œil humain, l'angle minimal entre deux points vus distinctement est  $\alpha = 3 \times 10^{-4}$  rad.

**Doc. 4** – Pouvoir séparateur de l'œil humain

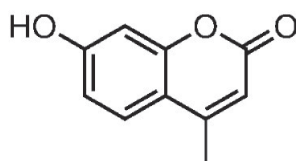
**13** – A l'aide d'un schéma, **montrer** que si les capteurs ont une surface plus petite, on diminue l'angle minimal du pouvoir séparateur.

**14** – **Montrer** que la valeur du pouvoir séparateur donnée dans le document 4 est cohérente avec la densité de cônes dans la fovéa donnée question 12.

**15** – On rappelle que la pupille est un diaphragme de diamètre  $\mathcal{D}_p = 3$  mm. **Nommer** le phénomène qui se manifeste lors du passage de la lumière à travers la pupille. En **déduire** pourquoi il n'est pas utile de diminuer la surface des capteurs en deçà d'une surface à **déterminer**.

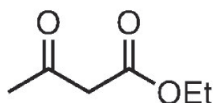
## 2 La digestion : synthèse d'un médicament antispasmodique

L'hymécromone (ou 4-methylumbelliferone ou 7-hydroxy-4-méthylcoumarine) est un médicament utilisé dans le traitement des troubles digestifs : elle augmente la production de bile et lutte contre les spasmes des voies biliaires.

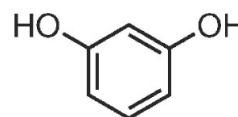


*hymécromone*

On s'intéresse ici à une synthèse « verte » de l'hymécromone, réalisée sans solvant à partir du résorcinol et d'acétoacétate d'éthyle (ou 3-oxobutanoate d'éthyle), en présence d'une résine échangeuse d'ions fortement acide (Dowex 50WX4) (cf. document 5).



*acétoacétate d'éthyle*



*résorcinol*

Source : *Green synthesis of a Fluorescent Natural Product*, Douglas M. Young, Jacob J. C. Welker, and Kenneth M. Doxsee, *Journal of Chemical Education*, Vol 88 n° 3 March 2011, p. 319-321.

Une résine échangeuse d'ions est un matériau insoluble qui contient des groupements chargés fixes et des contre-ions mobiles. La résine Dowex est une résine échangeuse de cations fortement acide qui va permettre de céder des protons  $H^+$  au milieu réactionnel. Elle se présente sous la forme de microbilles insolubles de 0,3 à 0,5 mm de diamètre.



Microbilles de résine échangeuse d'ions (Source : Wikipédia).

**Doc. 5** – La résine Dowex 50WX4

### 2.1 Etude du protocole

Les différentes phases du protocole de synthèse sont décrites ci-après :

- **Étape 1** : Dans un erlenmeyer de 50 mL (erlenmeyer n° 1), on introduit successivement 1,0 g de résine Dowex, une masse  $m_1 = 805$  mg de résorcinol et un volume  $V_0 = 1,00$  mL de 3-oxobutanoate d'éthyle. L'erlenmeyer est placé dans un bain-marie à 80 °C pendant 30 minutes. Le milieu réactionnel est mélangé régulièrement avec une baguette en verre. On observe un léger dégagement gazeux qui cesse lorsque la transformation est terminée. À la fin de la transformation, le milieu réactionnel devient solide.
- **Étape 2** : On ajoute environ 3 mL d'éthanol pour dissoudre le produit solide (la résine reste insoluble) puis on transfère le liquide surnageant dans un erlenmeyer propre de 50 mL (erlenmeyer n° 2). La résine est rincée avec environ 2 mL d'éthanol puis l'éthanol de rinçage est transféré dans l'erlenmeyer n° 2.

**Tournez la page S.V.P.**

- **Étape 3** : La solution contenue dans l'erenmeyer n° 2 est chauffée au bain-marie puis de l'eau chaude est ajoutée jusqu'à ce que la solution devienne légèrement trouble. On laisse alors le liquide refroidir à température ambiante puis dans un bain de glace pendant 15 minutes.
- **Étape 4** : Les cristaux blancs obtenus sont filtrés sur Büchner puis rincés avec 5 mL d'eau froide. Après essorage, le produit est séché sur papier filtre puis placé à l'étuve pendant 15 minutes. On obtient une masse de produit  $m_2 = 907$  mg.

**16 – Recopier** la formule topologique de l'acétoacétate d'éthyle et **entourer** les groupes caractéristiques de cette molécule. **Préciser** les familles fonctionnelles qui leur sont associées.

**17 – Recopier** la formule topologique de l'hymécromone et **entourer** les chaînes carbonées de chacun des deux réactifs.

**18 – Écrire** l'équation de la réaction qui modélise la formation de l'hymécromone à partir des deux réactifs envisagés.

**19 – Expliquer** le léger dégagement gazeux observé pendant la transformation (étape 1).

**20 –** En raisonnant sur la solubilité, **expliquer** pourquoi la solution se trouble lors de l'ajout d'eau chaude lors de l'étape 3.

**21 – Expliquer** l'intérêt du lavage à l'eau froide lors de l'étape 4.

**22 – Calculer** la quantité de matière introduite de chacun des deux réactifs. **Identifier** le réactif limitant.

**23 – Déterminer** le rendement de la synthèse.

**24 – Analyser** le spectre infrarouge de l'hymécromone : **attribuer** les bandes d'absorption dont les nombres d'onde sont indiqués sur la figure 5.

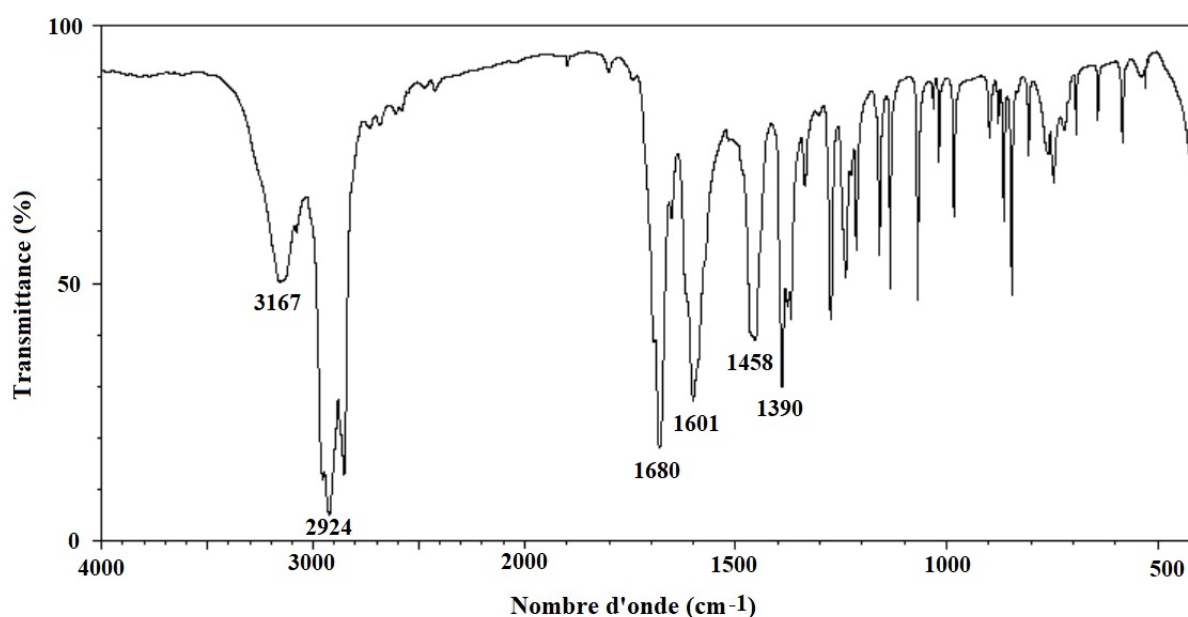


FIGURE 5 – Spectre infrarouge de l'hymécromone (en suspension dans le nujol)

## 2.2 Etude du mécanisme réactionnel

La transformation étudiée est une condensation de Pechmann. Il se produit une transestérification, suivie d'une substitution électrophile aromatique puis d'une déshydratation (cf. figure 6). En présence de résine Dowex 50WX4, le milieu réactionnel est acide.

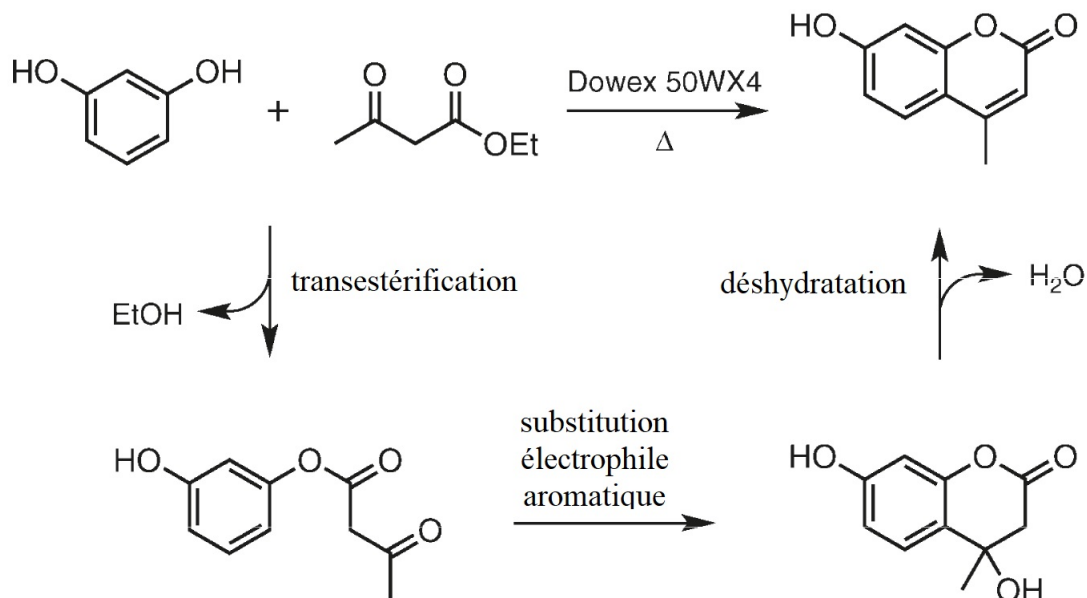


FIGURE 6 – La transformation de Pechmann

25 – Le mécanisme de la transestérification en milieu acide est proposé figure 7. Pour simplifier, le résorcinol est noté  $Ar-OH$  et le groupement  $CH_3-CO-CH_2-$  de l'acétoacétate d'éthyle est noté  $R$ . **Reproduire** ce mécanisme et **représenter** les flèches courbes de chacun des actes élémentaires. **Indiquer** le type de réaction mis en jeu dans chacune des différentes étapes de ce mécanisme.

26 – **Indiquer** le rôle des protons  $H^+$  (fournis par la résine Dowex) dans cette réaction. **Justifier**.

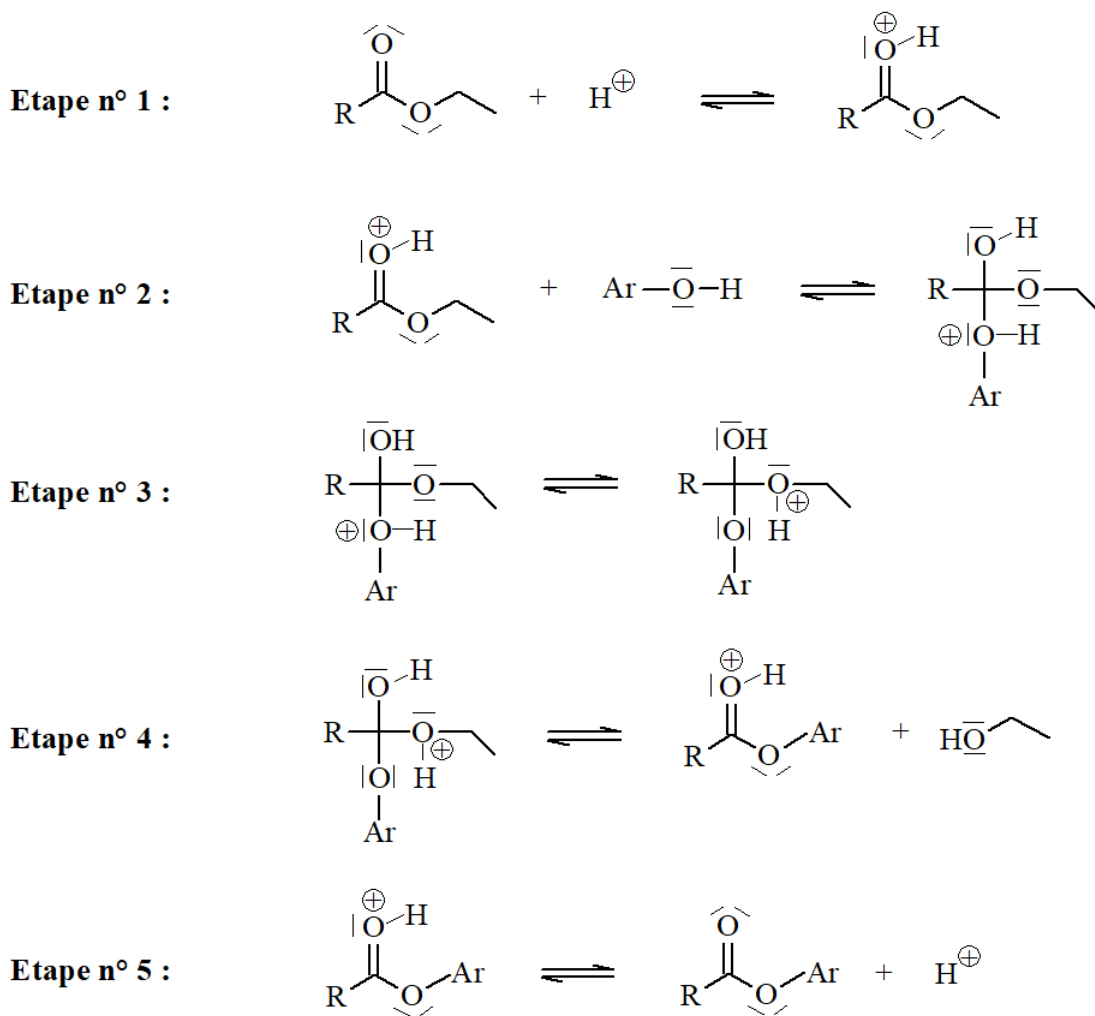


FIGURE 7 – Mécanisme de la transestérification

### 2.3 Etude de l'impact environnemental de la synthèse

27 – Les douze principes de la chimie verte sont présentés dans le document 6. Sachant que la synthèse classique de l'hymécromone se fait dans le toluène au reflux en présence notamment de trichlorure de phosphoryle, **expliquer** pourquoi la voie de synthèse présentée ici peut être qualifiée de synthèse « verte » : **citer** trois principes de la chimie verte parmi tous ceux que ce protocole vérifie en prenant soin de **justifier** en quoi ces principes sont respectés.

- 1. Prévenir la pollution à la source :** il vaut mieux produire moins de déchets qu'investir dans l'assainissement ou l'élimination des déchets.
- 2. Économiser la matière première :** l'économie d'atomes, c'est concevoir les synthèses dans le but de maximiser l'incorporation des matériaux utilisés au cours du procédé dans le produit final.
- 3. Travailler dans des conditions plus sûres :** préférer l'utilisation de substances faiblement ou non toxiques pour l'homme et l'environnement.
- 4. Concevoir des produits chimiques moins toxiques :** il faut synthétiser de nouvelles molécules à la fois plus efficaces et non toxiques. L'innocuité est évaluée par des études toxicologiques à l'échelle cellulaire et au niveau de l'organisme.
- 5. Utiliser des solvants non toxiques :** rechercher des alternatives aux solvants organiques toxiques et polluants, tels que le benzène, le chloroforme, le trichloréthylène, ... (utilisation de l'eau comme solvant, utilisation de fluides supercritiques, réactions sans solvant, ...)

**6. Économiser l'énergie :** limiter les dépenses énergétiques. Il faut mettre au point des méthodes de synthèse dans des conditions de température et de pression ambiantes.

**7. Utiliser des ressources renouvelables :** c'est préférable à l'utilisation de ressources fossiles lorsque cela est possible.

**8. Réduire l'utilisation de composés intermédiaires :** mettre en œuvre des réactions directes car les étapes intermédiaires consomment des substances qui vont devenir des déchets.

**9. Préférer les procédés catalytiques aux procédés classiques :** un catalyseur accélère la vitesse de réaction en abaissant l'énergie nécessaire à apporter pour que deux molécules réagissent entre elles. Il sort inchangé du processus chimique et est donc recyclable.

**10. Concevoir un produit chimique en vue de sa dégradation finale :** les produits chimiques doivent être conçus de façon à ce que leur dégradation future, naturelle ou accélérée, conduise à des sous-produits non nocifs. Il faut privilégier la formation de déchets recyclables.

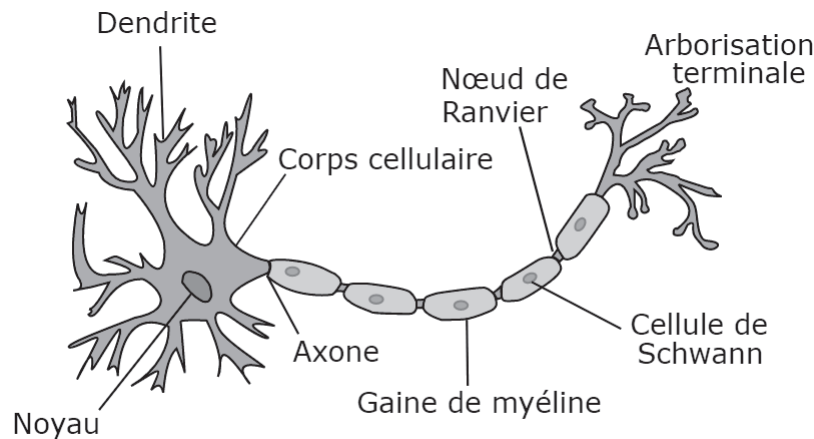
**11. Analyser en temps réel les produits chimiques et leur empreinte dans l'environnement :** prévenir la pollution en contrôlant le suivi direct des réactions chimiques, détecter et quantifier la présence d'agents chimiques et biologiques réputés toxiques, même à l'état de traces.

**12. Développer une chimie fondamentale plus sûre :** choisir judicieusement les matières premières chimiques pour prévenir les accidents, explosions, incendies et les émissions de composés dangereux.

**Doc. 6** – Les douze principes de la chimie verte (d'après « Green Chemistry : Theory and Practise », Paul Anastas and John Warner, Oxford University Press, 1998)

## 3 Le système nerveux

### 3.1 Potentiel d'équilibre et potentiel de repos



Les neurones sont des cellules qui possèdent une architecture globale comportant dendrite(s), axone, synapses et corps cellulaire, appelé également soma. Les différentes classes de neurones se distinguent essentiellement par la forme et la taille du soma et le nombre, la longueur et la répartition des dendrites. La description ci-après détaille le rôle de chacun de ces éléments.

- **Les dendrites** sont des ramifications issues du corps cellulaire et qui permettent les connexions synaptiques afférentes au neurone. Elles assurent ainsi la propagation de l'information entre les différents neurones impliqués dans la communication.
- **L'axone** ou fibre nerveuse est un prolongement long et cylindrique du soma de rayon  $r$  de l'ordre de  $10^{-6}$  m et d'épaisseur de l'ordre de  $10^{-9}$  m. Sa longueur peut dépasser le mètre lorsqu'il joint une cellule de la moelle épinière à une extrémité motrice ou sensorielle. Il conduit vers d'autres neurones un signal, le potentiel d'action, qui naît dans son segment initial. L'axone peut être entouré d'une gaine de myéline (substance essentiellement constituée de lipides, isolant et protégeant l'axone). On trouve, le long de l'axone, des points où la gaine de myéline s'interrompt; ces points sont appelés nœuds de Ranvier. C'est au niveau de ces nœuds que le signal électrique se régénère.
- **Les synapses** sont les points de contact entre un neurone et sa cible (un autre neurone, une fibre musculaire, etc...) On distingue dans le vivant deux catégories de synapses : les synapses dites « chimiques » et les synapses « électriques ». Les premières, rencontrées le plus fréquemment, nécessitent un intermédiaire pour transmettre l'information : le neurotransmetteur. Dans le cas d'une synapse électrique, le signal est transmis directement sans délai de transmission.
- **Le soma** d'un neurone humain a un diamètre de l'ordre de  $20\mu\text{m}$  pour une épaisseur de membrane d'environ 5 nm. Les signaux arrivant sur les dendrites sont intégrés au niveau du soma qui génère à son tour une réponse se propageant dans l'axone.
- **La membrane plasmique** d'une cellule en délimite le contour. Elle est la frontière entre les milieux intra et extracellulaire. Les milieux intra et extracellulaire possèdent les mêmes espèces ioniques en des concentrations différentes de part et d'autre de la membrane.

On distingue les neurones sensitifs, qui conduisent l'influx nerveux des récepteurs sensoriels aux centres nerveux (cerveau et moelle épinière), et les neurones moteurs qui transmettent des messages entre le centre nerveux et un organe effecteur pouvant réaliser une action (muscle, glande, etc...)

**Doc. 7** – Anatomie d'un neurone



Même lorsque le neurone n'est soumis à aucune excitation, il existe une différence de potentiel entre le milieu intra et extracellulaire, due à l'inégalité de concentration des ions de part et d'autre de la membrane. Cette différence de potentiel  $E_{repos} = V_{intra} - V_{extra}$  porte le nom de potentiel de repos et est généralement de l'ordre de  $-65$  mV.

La membrane au repos est plus perméable aux ions potassium qu'aux autres ions comme les ions sodium. On donne les concentrations ioniques en  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  des milieux extra ( $C_{ext}$ ) et intracellulaire ( $C_{int}$ ) d'un neurone au repos mesurées à  $T = 37^\circ\text{C}$ .

	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	Z.P (molécules organiques chargées négativement)
$C_{ext}$	140	5	147	1	0
$C_{int}$	14	140	14	$< 10^{-4}$	125

**Doc. 8** – Potentiel de repos

Dans un premier temps, on s'intéresse au potentiel de repos existant entre l'intérieur et l'extérieur de la membrane du neurone.

Pour cela on réalise l'expérience suivante : on sépare à l'aide d'une paroi, perméable seulement aux ions  $\text{Ag}^+$ , deux solutions de nitrate d'argent ( $\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^-$ ) de concentration  $C_1$  et  $C_2$  telles que  $C_1 < C_2$ . Dans chacun des compartiments on place une électrode d'argent et on relie les deux électrodes par un voltmètre. Spontanément, une espèce chimique en solution se déplace de la zone où elle est la plus concentrée vers la zone la moins concentrée, par un phénomène de diffusion.

**28 – Faire** un schéma de la pile et **représenter** le sens de déplacement par diffusion des ions  $\text{Ag}^+$  au travers de la paroi.

**29 – Expliquer** si la pile ainsi formée débite un courant électrique.

**30 – Donner** la relation entre les concentrations en ions  $\text{Ag}^+$  dans les deux compartiments (notées  $[\text{Ag}^+]_1$  et  $[\text{Ag}^+]_2$ ) au bout d'un temps long, si seul ce phénomène de diffusion intervenait.

**31 – Expliquer** pourquoi le déplacement des ions  $\text{Ag}^+$  s'arrête en réalité avant que cette relation ne soit vérifiée. **Indiquer** la polarité de chaque côté de la paroi après diffusion des ions  $\text{Ag}^+$ .

L'équilibre thermodynamique est atteint lorsque la composition chimique des deux compartiments ne varie plus. Il y a dans ce cas autant d'ions  $\text{Ag}^+$  passant d'un compartiment à l'autre par diffusion que dans le sens inverse. Pour un ion A pouvant traverser la paroi, cela se produit lorsqu'il y a égalité du potentiel électrochimique  $\mu_A$  dans les deux compartiments.

À l'équilibre thermodynamique, le potentiel électrochimique associé à un ion A noté  $\mu_A$  s'écrit :

$$\mu_A = \frac{RT}{N_a} \ln[A] + qV + E_p$$

où

- $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  est la constante des gaz parfaits
- $T$  la température de la solution en kelvin
- $N_a = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  la constante d'Avogadro
- $[A]$  la concentration en quantité de matière de l'ion A à l'équilibre en  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- $q$  la charge électrique portée par l'ion A en coulomb
- $V$  le potentiel électrique dans la solution en volt
- $E_p$  l'énergie potentielle associée à l'interaction entre espèces dans la solution en joule. On considérera ce terme identique dans les différents compartiments séparés par une membrane perméable, hypothèse valable dans le cas où les solutions sont très diluées.

**32 – Établir**, à l'équilibre, l'expression suivante de la différence de potentiel  $E_A = V_2 - V_1$  où  $V_1$  et  $V_2$  sont les potentiels électriques de part et d'autre de la paroi, en fonction de  $T$ , de la charge  $F = 9,65 \times 10^4 \text{ C}$  d'une mole de

**Tournez la page S.V.P.**

protons, de  $[A]_1$  et  $[A]_2$  (concentrations de l'ion A de part et d'autre de la paroi), de la valence  $n = \frac{q}{e}$  de l'ion A ainsi que de  $R$  :

$$E_A = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{[A]_1}{[A]_2}\right).$$

Cette relation porte le nom de formule de Nernst et  $E_A$  est appelé potentiel d'équilibre de l'ion A.

**33** – Dans le cas de la membrane du neurone au repos, **calculer** le potentiel d'équilibre  $E_A = V_{int} - V_{ext}$  pour les ions potassium, sodium et chlorure.

**34** – **Comparer** au potentiel de repos. En **déduire** si, pour chacun de ces trois ions, la situation du neurone au repos est une situation d'équilibre ou hors équilibre.

Les ions traversent la membrane du neurone en passant par des canaux ioniques. Plus le potentiel de repos diffère du potentiel d'équilibre d'un ion, plus cet ion circule dans son canal. Lorsque le neurone est au repos, chaque canal peut être modélisé par un générateur de tension idéale  $E_A$  en série avec une résistance  $R_A$  et parcouru par un courant  $i_A$  dirigé du milieu intracellulaire vers le milieu extracellulaire. Le courant total circulant au travers de la membrane est alors nul.

On s'intéresse au cas d'un neurone comportant deux canaux ouverts, l'un laissant passer les ions sodium et l'autre les ions potassium.

On note  $i_K$  (respectivement  $i_{Na}$ ) l'intensité du courant dans le canal potassique (respectivement dans le canal sodique).

**35** – **Représenter** le schéma du circuit électrique de ce neurone comportant  $E_{repos}$  ainsi que les éléments électriques de chaque canal. **Indiquer**  $i_{Na}$  et  $i_K$  sur le schéma.

**36** – Au repos, **établir** la relation entre  $i_{Na}$  et  $i_K$ .

**37** – En **déduire** l'expression de  $E_{repos}$  en fonction de  $\alpha = R_K/R_{Na}$ ,  $E_K$  et  $E_{Na}$ .

**38** – **Calculer**  $\alpha$  en vous servant des données fournies.

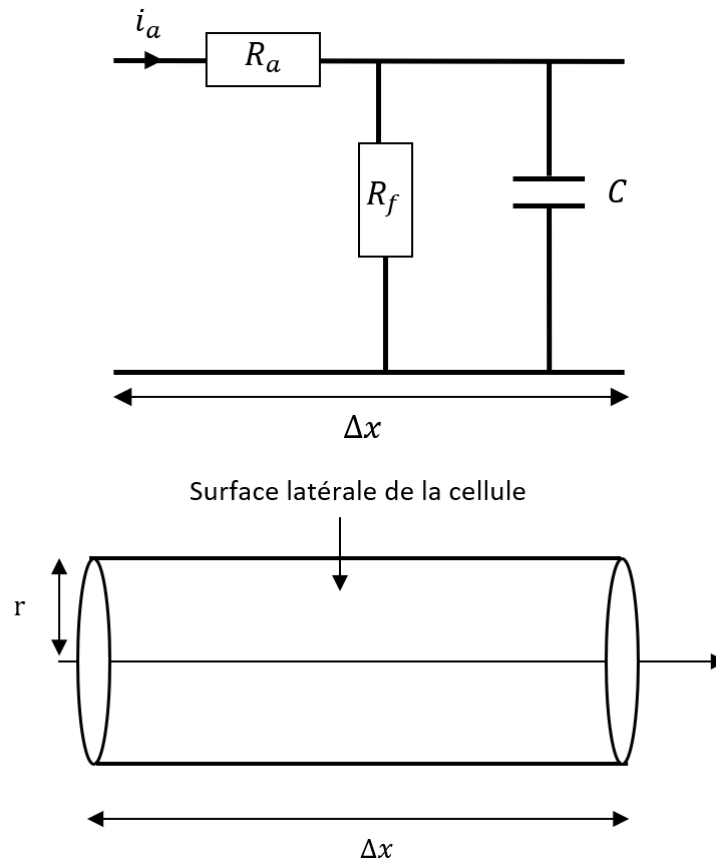
**39** – Expliquer comment ce dernier résultat rend compte de la polarisation de la membrane, c'est-à-dire de l'existence de charges électriques de signes opposés, portées par les faces intérieure et extérieure de la membrane. **Préciser** la polarité de chacune des faces intérieure et extérieure de la membrane.

## 3.2 Potentiel d'action

Un potentiel d'action est un signal électrique unidirectionnel parcourant les axones des neurones, qui provoque la libération de neurotransmetteurs au niveau des synapses. Un stimulus perçu au niveau des dendrites ou du corps cellulaire d'un neurone peut conduire à une dépolarisation de la membrane (*i.e.* une modification des charges électriques portées par la membrane) et lorsqu'elle atteint un certain seuil appelé le seuil d'excitation, cela déclenche un potentiel d'action qui se propage le long de l'axone : c'est l'influx nerveux. Le seuil d'excitation d'un neurone vaut  $E_{exci} = 20$  mV. Le potentiel d'action correspond à une réaction du tout ou rien : l'ampleur du potentiel d'action ne dépend pas de l'intensité du stimulus.

On adopte le modèle électrique suivant pour l'axone : une portion de longueur  $\Delta x = 1,0$  mm de l'axone est représentée par une « cellule électrique » comportant deux résistances et un condensateur.

- $R_a$  désigne la résistance d'une cellule s'opposant au passage du courant le long de l'axone
- $R_f$  désigne la résistance de fuite s'opposant au passage du courant au travers de la surface latérale de la cellule
- $C$  désigne la capacité du condensateur associé à la membrane de la cellule.



Suite à une perturbation en entrée de la cellule, le condensateur se charge. Lorsque le seuil d'excitation est atteint, une nouvelle perturbation apparaît en entrée de la cellule suivante et ainsi de suite. Le potentiel d'action se propage ainsi de proche en proche dans l'axone sous la forme d'une onde électrique.

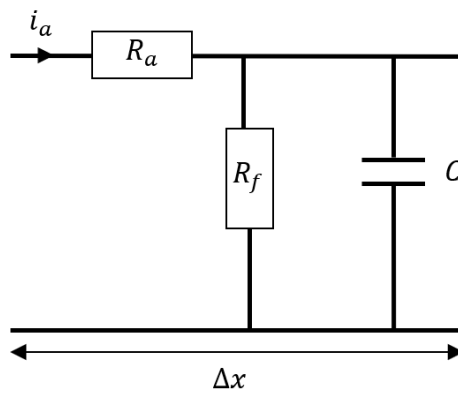


FIGURE 8 – Modèle électrique de l'axone

	Axone sans myéline	Axone avec myéline
Résistivité $\rho_a$ de l'axone (en $\Omega \cdot m$ )	1,0	1,0
Capacité $C_{ms}$ de la membrane par unité de surface (en $F \cdot m^{-2}$ )	$1,0 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-5}$
Conductance de fuite $G_{fs}$ de la membrane par unité de surface de membrane (en $\Omega^{-1} \cdot m^{-2}$ )	5,0	$1,67 \times 10^{-2}$
Rayon $r$ de l'axone (en $\mu m$ )	3,0	3,0

Caractéristiques d'un axone avec ou sans myéline

**Doc. 9** – Modèle électrique d'un axone

Notre corps dispose de récepteurs à la douleur situés notamment sur la peau.

Le circuit de la douleur au sein du corps humain est très complexe. Sans entrer dans les détails de son mécanisme, on peut dire qu'elle implique les deux types de neurones moteurs et sensitifs.

Quand les récepteurs sont stimulés par une agression (piqûre, chaleur, etc.) au delà d'un certain seuil tolérable, l'information est transmise au cerveau en passant par la moëlle épinière. Cette information douloureuse est véhiculée par différents neurones sensitifs. Elle est ressentie par le sujet lorsque l'information atteint le cerveau.

Au moment où la moëlle épinière reçoit l'information douloureuse, elle peut déclencher une réponse musculaire via des neurones moteurs.

**Doc. 10** – La douleur

Types de fibres	Rôle	Myélinisation	Diamètre moyen (en $\mu\text{m}$ )
<b>Sensitives</b>			
A-alpha	Informations provenant des muscles, des articulations et des os	myélinisée	20
A-beta	Informations liées au toucher sans douleur (vibration, sens de la position)	myélinisée	8
A-delta	Informations liés au toucher douloureux (douleur intense et brève)	myélinisée	4
C	Informations liés au toucher douloureux (douleur diffuse et de durée plus longue)	non myélinisée	0,5
<b>Motrices</b>			
A-alpha	Activité musculaire et mouvement	myélinisée	20
A-gamma	Maintien permanent des muscles en tension (tonus musculaire)	myélinisée	8

**Doc. 11** – Classification des fibres nerveuses (Source : Physiologie du neurone, D. Tritsch, D. Chesnoy-Marchais, A. Feltz, Doin Editions, 1998, p. 219.)

**40 – Expliquer** pourquoi il est pertinent d'introduire un condensateur dans le modèle électrique.

**41 – Exprimer**  $R_a$ ,  $R_f$  et  $C$  en fonction de  $\Delta x$  et des paramètres de l'axone et **effectuer** les applications numériques dans le cas d'un axone sans myéline.

On précise que la résistivité  $\rho$  d'un conducteur électrique de section  $S$ , de longueur  $L$  et de résistance  $R_{\text{elec}}$  est telle que

$$\rho = \frac{R_{\text{elec}} S}{L}$$

et que la conductance est l'inverse de la résistance.

**42 – Expliquer** l'effet de l'ajout d'une couche de myéline sur l'axone vis-à-vis des paramètres du modèle électrique de la cellule :  $R_a$ ,  $R_f$  et  $C$ .

**43 –** Dans le cas sans myéline et en se limitant au potassium, **calculer** la valeur de la charge  $Q$  portée par le condensateur à l'équilibre.

**44 – En déduire** le rapport entre le nombre d'ions potassium ayant traversé la membrane de la cellule pour établir la différence de potentiel  $E_K$  à l'équilibre et le nombre d'ions potassium présents dans la cellule. **Conclure** sur l'influence de ce mouvement d'ions sur la composition ionique du milieu intracellulaire.

On s'intéresse maintenant au schéma de la figure 9 où on soumet l'entrée de la cellule à une tension constante  $V_0$  légèrement supérieure à  $E_{\text{exci}}$  et où on néglige le courant de sortie. On suppose de plus, pour simplifier l'étude, que lorsque la tension aux bornes du condensateur de la première cellule atteint  $E_{\text{exci}}$ , cela déclenche la charge du condensateur de la cellule suivante.

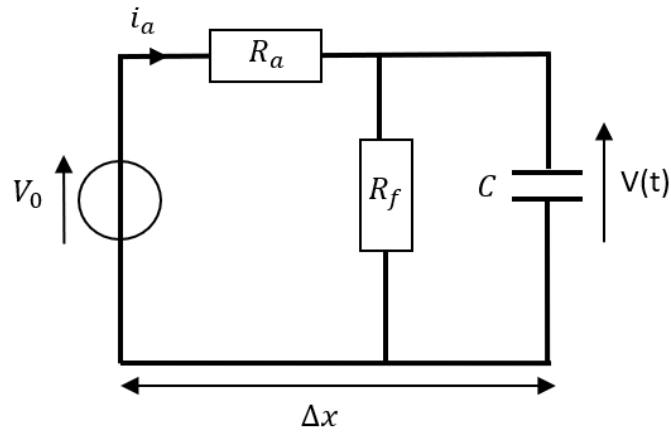


FIGURE 9 – Modèle électrique de l'axone

45 – **Établir** l'équation différentielle suivante à laquelle obéit la tension aux bornes du condensateur, notée  $V(t)$  :

$$\frac{dV(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} V(t) = \frac{V_0}{R_a C},$$

où  $\tau = \frac{R_a R_f C}{R_a + R_f}$ .

46 – **Expliquer**, dans le cadre de ce modèle, comment évoluent les grandeurs électriques dans la troisième cellule.

On supposera qu'un phénomène non modélisé ici permet de maintenir la tension en entrée de chaque cellule à la valeur  $V_0$  lorsque le condensateur de la cellule précédente est chargé.

47 – **Donner** le sens physique de  $\tau$ .

48 – Lorsqu'une personne se pique le doigt avec un objet pointu à l'instant  $t = 0$ , une douleur vive est d'abord ressentie accompagnée d'un mouvement réflexe de retrait. Une douleur plus sourde, moins intense et de plus longue durée est ensuite ressentie. **Estimer** les instants auxquels se produisent ces trois événements. **Expliciter** les hypothèses simplificatrices utilisées.

On s'intéresse désormais au rôle joué par les noeuds de Ranvier présents le long de l'axone tous les  $x = 2,0$  mm à partir de l'entrée.

Le modèle électrique du neurone est modifié de la façon suivante :

- On prend en compte le courant en sortie d'une cellule mais plus les effets capacitifs.
- L'axone est modélisé par une chaîne infinie de cellules, chacune de longueur  $\Delta x = 1,0$  mm, comme sur la figure 10.

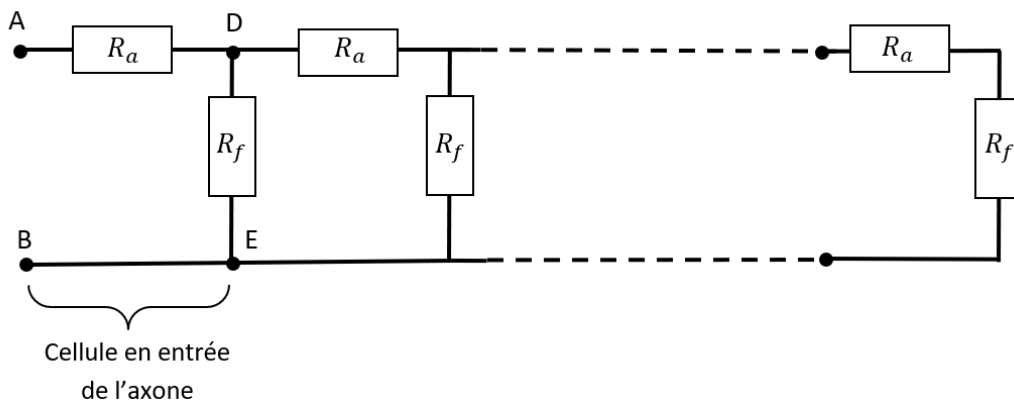


FIGURE 10 – Chaîne atténuatrice

49 – **Expliquer** pourquoi il est légitime de modéliser l'axone par une chaîne infinie.

50 – Dans le cas d'une chaîne infinie, **expliquer** pourquoi la résistance à droite des points D et E est égale à celle à droite des points A et B. On note  $R_T$  cette résistance particulière.

51 – **Représenter** alors le schéma électrique équivalent de la chaîne infinie.

52 – Lorsque deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont en série, il est possible de les remplacer par une unique résistance équivalente  $R_{eq,serie}$  sans changer le problème physique (différence de potentiel et intensité du courant inchangées, voir figure 11). **Établir** l'expression de  $R_{eq,serie}$  en fonction de  $R_1$  et  $R_2$ .

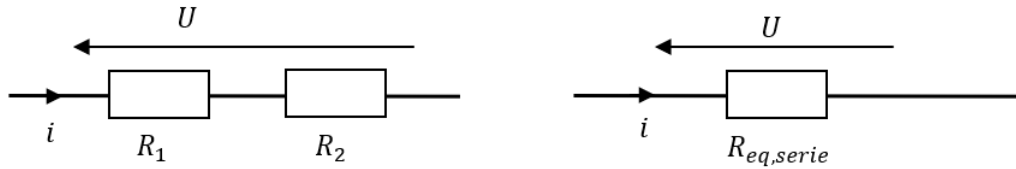


FIGURE 11 – Association de résistances en série

53 – Lorsque deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont en dérivation, il est possible de les remplacer par une unique résistance équivalente  $R_{eq,||}$  sans changer le problème physique (différence de potentiel et intensité du courant inchangées, voir figure 12). **Établir** l'expression de  $R_{eq,||}$  en fonction de  $R_1$  et  $R_2$ .

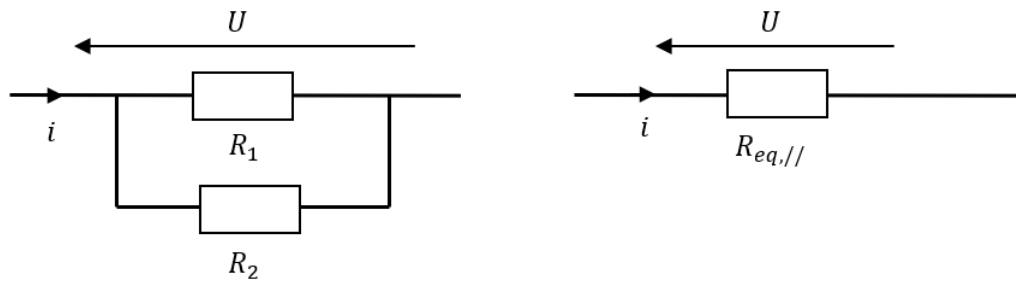


FIGURE 12 – Association de résistances en dérivation

54 – **Montrer** que  $R_T$  est solution d'une équation du second degré et en **déduire** l'expression suivante de  $R_T$  en fonction de  $R_a$  et  $R_f$  :

$$R_T = \frac{R_a + \sqrt{R_a^2 + 4R_aR_f}}{2}.$$

55 – On note toujours  $V_0$  la tension en entrée du neurone c'est-à-dire entre A et B. **Montrer** que la tension entre D et E s'écrit

$$V_{DE} = V_1 = \frac{V_0}{1 + \beta}$$

et **donner** l'expression de  $\beta$  en fonction de  $R_T$  et  $R_a$ .

56 – En **déduire** la différence de potentiel  $V_n$  au bout de  $n$  cellules et la **représenter** en fonction de  $n$ .

57 – **Calculer** la valeur du rapport  $V_N/V_0$  où  $N$  est le numéro de la dernière cellule avant le premier noeud de Ranvier et **commenter**.

## 4 Le cœur : pompe de la circulation sanguine

Le cœur est l'organe contractile qui assure la circulation sanguine, il joue un rôle essentiel dans le réglage de son débit et dans son adaptation aux variations physiologiques, en particulier à l'effort. Les cavités cardiaques sont au nombre de quatre; elles sont séparées deux à deux par une cloison longitudinale, le septum, qui divise le cœur en une partie droite et une partie gauche. Le cœur droit contient du sang pauvre en dioxygène, riche en dioxyde de carbone, il assure la circulation pulmonaire. Le cœur gauche renferme du sang riche en dioxygène; il le propulse dans tous les tissus, par l'intermédiaire des artères. Chaque partie du cœur est composée d'une oreillette et d'un ventricule. Les oreillettes reçoivent le sang qui arrive au cœur par les veines. La figure 14 présente ce circuit sanguin.

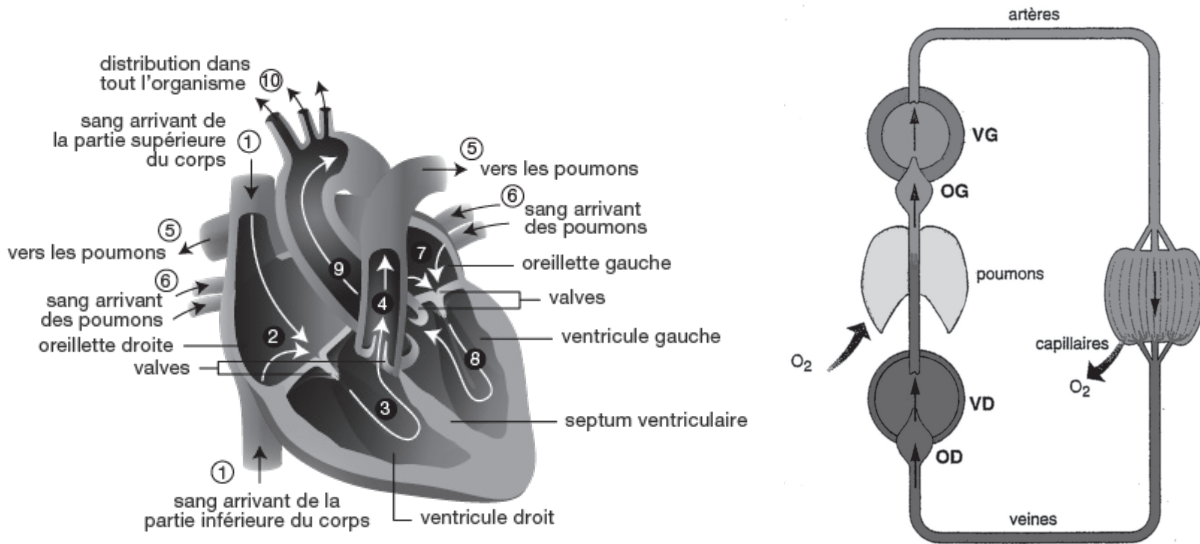


FIGURE 13 – Schéma anatomique du cœur selon son grand axe

FIGURE 14 – Schéma du circuit sanguin, VD et OD (resp. VG et OG) pour ventricule et oreillette droits (resp. gauches)

### 4.1 Puissance fournie par le cœur au sang

Le cœur fonctionne comme une pompe et fournit donc un travail au sang. L'objectif de cette sous-partie est de décrire et quantifier le travail fourni par le cœur au sang.

On peut représenter l'évolution cyclique du ventricule gauche du cœur dans un diagramme donnant la pression régnant dans le fluide remplissant le ventricule en fonction du volume du ventricule. Ci-après le diagramme simplifié :

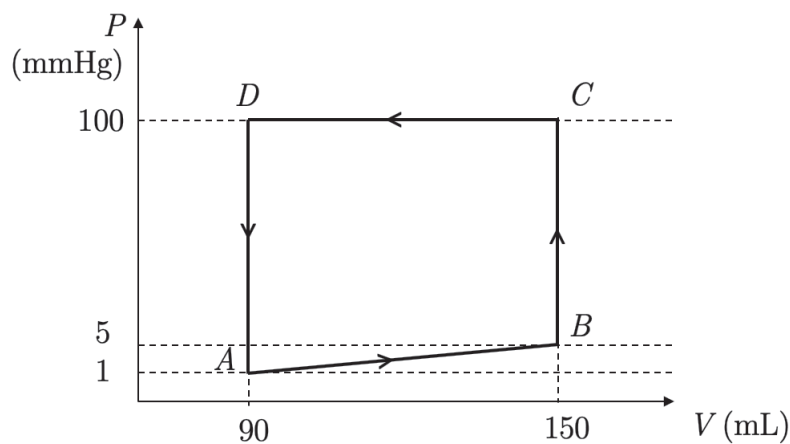


FIGURE 15 – Diagramme pression-volume simplifié du sang dans le ventricule gauche



On y retrouve les différentes étapes du cycle cardiaque, données ici dans le désordre :

- la diastole :
  - relaxation à volume constant;
  - remplissage du ventricule.
- la systole :
  - contraction à volume constant;
  - éjection du sang vers les organes.

**58** – **Attribuer** chaque segment  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  et  $DA$  du diagramme de la figure 15 à une étape du cycle cardiaque.

**59** – **Prévoir**, en justifiant, le signe du travail fourni par le ventricule gauche du cœur au sang pour les étapes  $AB$  et  $CD$ .

**60** – On admet que la valeur absolue du travail fourni par le ventricule gauche du cœur au sang à chaque étape est égale à l'aire sous la courbe représentative de chaque étape. En **déduire** la valeur du travail fourni par le ventricule gauche du cœur au sang à chaque étape.

**61** – **Montrer** que le travail fourni par le ventricule gauche du cœur peut se simplifier sous la forme  $W_g = V_{ES}P_C$  avec  $P_C$  la pression au point  $C$ . **Préciser** ce que représente  $V_{ES}$ .

Le ventricule droit fonctionne de façon équivalente, mais a besoin d'apporter moins d'énergie car le sang propulsé par le ventricule droit est à destination des poumons, alors que le sang propulsé par le ventricule gauche est à destination de tous les organes du corps.

On admet que le travail fourni par le ventricule droit est  $\alpha W_g$  où  $\alpha < 1$ . Généralement,  $\alpha = 0,2$ .

**62** – On estime que l'énergie nécessaire pour mettre le cœur sous tension (c'est-à-dire contracter en changeant sa forme pour augmenter la pression pendant la systole) nécessite environ 20 J. **Calculer** le rendement cardiaque. **Commenter**.

## 4.2 Débit cardiaque

**63** – Le débit cardiaque  $\mathcal{D}_v$  est le volume éjecté par le cœur par unité de temps. **Donner** son expression en fonction de  $V_{ES}$  et  $f$ , la fréquence cardiaque. **Faire** l'application numérique en proposant si nécessaire des valeurs.

**64** – Le ventricule droit et le ventricule gauche sont chacun caractérisés par un débit de sortie. Il est vital que ces débits soient égaux. Dans le cas où le débit de sortie du ventricule droit est de  $5,1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  et celui du ventricule gauche est de  $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , **déterminer** la valeur du volume de sang accumulé dans les poumons en 10 minutes. **Commenter** ce résultat.

---

FIN DES QUESTIONS

---





