

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2024

—

Physique-chimie

RAPPORT DE JURY

Concours général des lycées

Épreuve de physique-chimie

Session 2024

Rapport du jury

1. Composition du jury

M. François VANDENBROUCK, inspecteur général de l'éducation, du sport et de la recherche, président du jury

Mme Mélanie PERRIN, inspectrice d'académie, inspectrice pédagogique régionale, vice-présidente du jury

Mme Océane AUCOIN, professeure agrégée, académie de Paris

M. Boris DÉCAMPS, professeur agrégé, académie d'Amiens

M. Mickaël FOUR, professeur agrégé, académie de Reims

Mme Patricia KESTER professeure agrégée, académie de Versailles

M. Baptiste KLEIN, professeur agrégé, académie d'Amiens

M. Simon LAURETTE, professeur agrégé, académie de Lille

M. Mickaël MELZANI, professeur agrégé, académie de Besançon

Mme Caroline NOLORGUES-NAVINEL, professeure agrégée, académie de Versailles

Mme Margaux ROUX, professeure agrégée, académie de Lyon

Mme Muriel ROUX, professeure agrégée, académie de Versailles

M. Quentin ROVEILLO, professeur agrégé, académie de Lille

M. Jérémy SAUTEL, professeur agrégé, académie de Créteil

Mme Clara SCHATTNER, professeure agrégée, académie de Paris

Mme Christine SIMON, professeure agrégée, académie d'Orléans-Tours

2. Statistiques

La session 2024 a vu concourir 3748 candidates et candidats, soit un peu plus de 97% des 3847 candidates et candidats inscrits. Ce taux élevé révèle l'engagement fort et remarquable des candidates et des candidats à préparer l'épreuve écrite de physique-chimie du concours général des lycées. Le jury se réjouit de l'augmentation du nombre de candidates et de candidats par rapport à la session 2023.

L'ensemble des inscrites et des inscrits à la session 2024 se répartissent comme suit selon leur origine territoriale.

Académie	Nombre
Aix-Marseille	137
Amiens	46
Besançon	337
Bordeaux	127
Clermont-Ferrand	72
Corse	7
Créteil	296
Dijon	57
Grenoble	138
Guadeloupe	7
Guyane	1
La Réunion	24
Lille	136
Limoges	10
Lyon	267
Martinique	12
Mayotte	11
Montpellier	109
Nancy-Metz	128
Nantes	177
Nice	121
Normandie	122
Orléans-Tours	71
Paris	340
Poitiers	88
Polynésie Française	7
Reims	29
Rennes	114
Strasbourg	108
Toulouse	165
Versailles	558
Lycées français à l'étranger	325
Total	3847

Les filles représentent 35,6% des inscrits, alors qu'elles représentent 46,2% des élèves qui suivent l'enseignement de spécialité physique-chimie en terminale générale à la rentrée 2023¹. Le jury ne peut qu'encourager les professeures et les professeurs de physique-chimie à présenter davantage de filles à l'épreuve de physique-chimie du concours général des lycées lors des sessions futures.

1. Note d'information de la DEPP n° 24.06, mars 2024.

Les candidates et les candidats des lycées français à l'étranger représentent 50 pays différents. Ils se répartissent comme suit :

Ambassade	Nombre
Ambassade de France en Afrique du Sud	3
Ambassade de France en Algérie	7
Ambassade de France en Allemagne	10
Ambassade de France en Arabie Saoudite	1
Ambassade de France en Australie	3
Ambassade de France en Autriche	3
Ambassade de France au Bahrein	2
Ambassade de France en Belgique	1
Ambassade de France au Bénin	1
Ambassade de France en Brésil	5
Ambassade de France au Canada	8
Ambassade de France en Chine	2
Ambassade de France en Colombie	4
Ambassade de France au Corée du Sud	3
Ambassade de France en Côte d'Ivoire	10
Ambassade de France au Danemark	3
Ambassade de France à Djibouti	1
Ambassade de France en Égypte	15
Ambassade de France aux Émirats Arabes Unis	14
Ambassade de France en Équateur	2
Ambassade de France en Espagne	12
Ambassade de France aux États-Unis	6
Ambassade de France au Gabon	3
Ambassade de France en Guinée	1
Ambassade de France au Honduras	2
Ambassade de France en Italie	4
Ambassade de France au Japon	4
Ambassade de France au Koweït	1
Ambassade de France au Liban	30
Ambassade de France au Luxembourg	9
Ambassade de France à Madagascar	7
Ambassade de France en Malaisie	2
Ambassade de France au Maroc	69
Ambassade de France à Maurice	12
Ambassade de France au Mexique	1
Ambassade de France à Monaco	3
Ambassade de France au Nigéria	2
Ambassade de France en Norvège	3
Ambassade de France au Panama	1
Ambassade de France aux Pays-Bas	4
Ambassade de France au Portugal	1
Ambassade de France au Qatar	5
Ambassade de France au Royaume-Uni	3
Ambassade de France au Sénégal	7
Ambassade de France en Serbie	1
Ambassade de France en Suisse	4
Ambassade de France en Thaïlande	2
Ambassade de France en Tunisie	24
Ambassade de France en Turquie	4

3. Commentaires sur l'épreuve écrite

L'épreuve de la session 2024 portait sur quelques aspects de la physico-chimie du corps humain. Le sujet se compose de quatre parties totalement indépendantes :

- La première décrit le fonctionnement de l'œil (formation des images sur la rétine et caractéristiques des capteurs photosensibles).
- La seconde partie s'intéresse à la synthèse d'un médicament antispasmodique : l'hymécromone.
- La troisième partie modélise la propagation de l'influx nerveux dans les neurones.
- La quatrième partie traite du cœur, pompe de la circulation sanguine.

De nombreux candidates et candidats ont abordé un nombre important de questions et sont ainsi parvenus à progresser de façon satisfaisante dans le sujet. Ils font preuve de compétences assurées en physique-chimie. Le jury leur adresse ses plus vives félicitations. Que leurs professeurs trouvent également ici une marque de reconnaissance du jury pour la qualité de leur travail de préparation des candidates et des candidats. Le jury constate en outre avec satisfaction que les questions ouvertes et la résolution de problème ont été abordées par de nombreux candidates et candidats, qui tirent ainsi profit de leur capacité à mettre en œuvre une démarche scientifique de façon autonome.

3.1 Remarques à propos des réponses apportées

Partie 1

1. Le jury attendait un raisonnement se basant sur la définition du foyer image.
2. Le jury attendait une expression littérale de f_{PP} avant de procéder à l'application numérique.
3. Un schéma précis était attendu. En particulier, le rayon réfracté atteint la rétine en son centre. Le jury attendait également le tracé de la normale. La définition des angles d'incidence et de réfraction a souvent posé problème.
6. Le jury attendait un schéma ou bien une présentation claire des notations employées (points objets et images de chaque lentille).
7. Plusieurs raisonnements étaient envisageables ici. Le jury a constaté avec satisfaction que lorsque la question a été abordée, le raisonnement proposé était généralement bien construit.
10. La confusion entre rayon et diamètre a souvent été faite dans l'expression littérale de l'aire de la surface d'un disque.
12. La taille des capteurs a en général été correctement évaluée par les candidats et les candidates. En revanche, la suite de la question n'a été que très peu abordée.
15. Le phénomène de diffraction a été correctement identifié par la plupart des candidats et candidates mais le reste de la question a été très peu traité.

Partie 2

Lorsqu'elle a été abordée, la partie 2 a été bien traitée.

18. L'écriture de l'équation de réaction complète a souvent posé problème. Les candidates et candidats sont invités à prendre bien connaissance de tous les documents proposés. Ici, la figure 6 permettait d'identifier clairement les sous-produits formés.
21. Le jury attendait une réponse précise : les candidates et candidats ne devaient pas se contenter d'évoquer l'élimination d'impuretés, il était nécessaire de préciser quelles impuretés étaient éliminées.
22. Le jury a pu constater avec une grande satisfaction que cette question avait en général été très bien rédigée par une grande majorité de candidats et candidates, avec l'établissement d'une expression littérale suivie d'une application numérique.
25. Cette question n'a que rarement été traitée dans son intégralité et correctement. Le jury rappelle que les flèches courbes dans l'écriture d'un mécanisme réactionnel représentent un déplacement de doublets d'électrons et qu'elles doivent en conséquence toujours être issues d'un doublet d'électrons.

Partie 3

29. Très peu de candidats et candidates ont évoqué la résistance interne très élevée d'un voltmètre pour justifier l'absence de courant.

- 32. Dans cette question, l'expression à établir était donnée dans l'énoncé. Le jury attendait donc une démonstration soigneuse et bien justifiée.
- 35. Cette question était difficile. Le jury a valorisé toute proposition raisonnable des candidats et candidates.
- 38. Il fallait remarquer ici que $\alpha \geq 0$ par définition.
- 42. Le jury attendait ici une réponse justifiée soigneusement.
- 48. Cette question n'a été que très peu abordée par les candidats et candidates. Tout début de raisonnement avec des ordres de grandeur raisonnables a été valorisé par le jury.
- 54. L'expression de R_T étant donnée dans l'énoncé, le jury attendait l'établissement de l'équation du second degré à résoudre ainsi que le détail de la résolution de cette équation.

Partie 4

- 58. Les réponses devaient être correctement justifiées.
- 59. L'attribution et les justifications des signes ont souvent été hasardeuses. Il était attendu qu'il soit bien précisé si le travail est réellement fourni ou en réalité reçu par le ventricule pour conclure.
- 60. Le jury attendait une expression littérale des différents travaux avant d'exécuter l'application numérique. Les candidats et candidates n'ont pas systématiquement pensé à convertir les mmHg en Pa et les mL en m³ pour obtenir un résultat en J.

3.2 Conseils aux futurs candidates et candidats

Le jury attend des candidates et des candidats que la présentation de leurs copies soit soignée, et que leurs réponses soient claires, précises, et accompagnées, le cas échéant, de schémas explicites. Il importe que les affirmations soient justifiées au moyen du vocabulaire scientifique adapté. Les candidates et les candidats doivent se montrer attentifs au respect de l'homogénéité des relations littérales qu'ils établissent. Le jury rappelle qu'une expression non homogène est nécessairement erronée, mais qu'à l'inverse, une relation homogène n'est pas forcément juste. Chaque application numérique doit être précédée d'une relation exprimée sous forme littérale. Les valeurs numériques doivent toujours être accompagnées de l'unité correspondante. La résolution de certaines questions demande une prise d'initiative : toute démarche, même non aboutie, est systématiquement valorisée.

3.3 Proposition de corrigé

Le corrigé de l'épreuve écrite de physique-chimie de la session 2024 qui suit n'est qu'une proposition qui n'a d'autre but que celui d'aider les futurs candidates et candidats dans leur préparation au concours général des lycées. Il ne s'agit donc absolument pas d'un modèle normatif.

Physico-chimie du corps humain : proposition de corrigé

1. La vue

1.1 Formation des images

1.1.1 Œil sain

1 – Lorsque l'œil regarde à l'infini, l'image se forme sur le plan focal image, et doit se former sur la rétine pour que l'image soit nette.

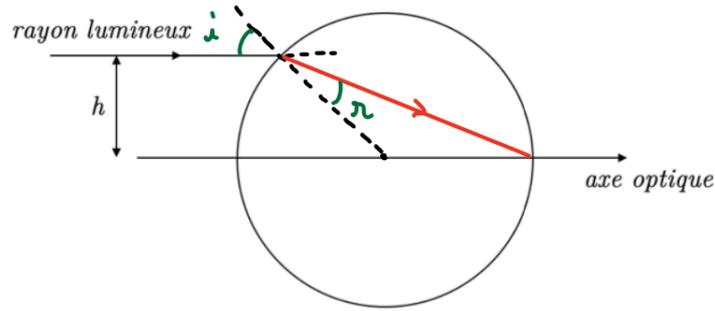
Ainsi, au repos la rétine est confondue avec le plan focal image, d'où $f_{PR} = 1,5$ cm.

2 – L'objet au punctum proximum est conjugué avec la rétine si l'œil le voit net. Donc dans la relation de Descartes, on a $\overline{OA'} = 1,5$ cm et $\overline{OA} = -25$ cm.

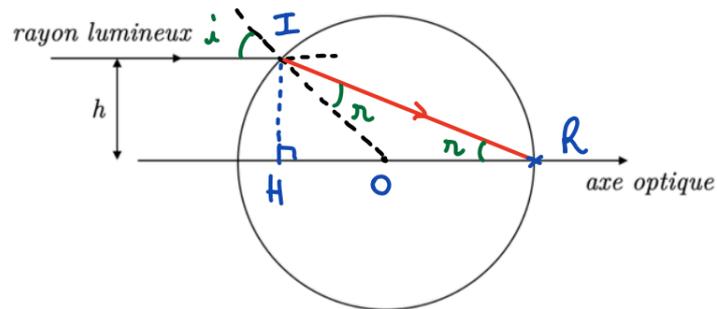
Ayant $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$, on a donc

$$f_{PP} = \frac{\overline{OA'} \cdot \overline{OA}}{\overline{OA} - \overline{OA'}} = 1,42 \text{ cm}$$

3 – On peut tracer :



4 – Avec les notations supplémentaires :



On a d'une part, par la loi de Snell-Descartes :

$$n_{air} \sin(i) = n \sin(r)$$

ou dans l'approximation des petits angles

$$n_{air} i = nr$$

Par ailleurs, si le rayon passe par le point R, on a l'angle $\widehat{IRH} = r$ puisque le triangle OIR est isocèle.

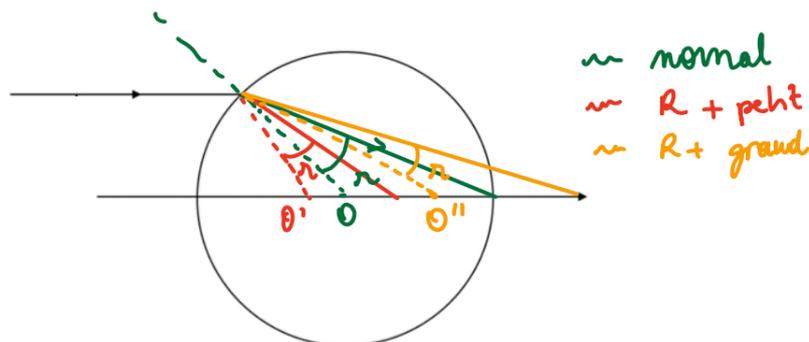
En outre, on a $\widehat{HIR} = \widehat{HIO} + r$ et $\widehat{HIO} + \pi/2 + i = \pi$, d'où $\widehat{HIR} = \pi/2 - i + r$.

Ainsi, dans le triangle IHR rectangle en H, on a $\pi/2 - i + r + r = \pi/2$, d'où $i = 2r$.

On doit donc avoir

$$n = 2n_{air} = 2,0$$

5 – Pour voir de plus près, l'oeil doit diminuer sa focale (cf questions précédentes). On voit sur les schémas que pour cela, le rayon de courbure doit être plus petit.



1.1.2 Correction d'un œil myope

6 – Si les lentilles sont accolées, on peut noter O leur centre optique commun.

Soit A l'objet, A_1 l'image de A par la lentille 1 et A' l'image de A_1 par la lentille 2 et ainsi l'image de A par l'association des deux lentilles.

On a alors $\frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f_1}$ et $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA_1} = \frac{1}{f_2}$.

On a donc $\frac{1}{OA_1} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{f_2}$, en réinjectant dans la première relation, on aboutit à :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

ce qui revient à la relation de Descartes pour un système de focale équivalente $\frac{1}{f_{eq}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$

7 – On veut que la focale corrigée soit égale à f_{PR} d'un oeil sain.

Calculons f_{PRm} la focale de l'œil myope quand il regarde à son punctum remotum :

$$f_{PRm} = \frac{\overline{OA'} \cdot \overline{OA}}{\overline{OA} - \overline{OA'}}$$

En considérant que la lentille de contact est accolée à la rétine, on veut

$$\frac{1}{f_{PR}} = \frac{1}{f_{PRm}} + \frac{1}{f_{corr}} \quad \text{d'où} \quad f_{corr} = \frac{f_{PR} f_{PRm}}{f_{PRm} - f_{PR}} = \overline{OA} = -40 \text{ cm}$$

Remarque : si on fait l'application numérique intermédiaire, on trouve $f_{PRm} = 1,45 \text{ cm}$ et en utilisant cette valeur pour calculer f_{corr} , on obtient $-43,5 \text{ cm}$

1.2 Les capteurs photosensibles : cônes et bâtonnets

1.2.1 Sensibilité des capteurs photorécepteurs

8 – On voit que les bâtonnets sont sensibles à une intensité lumineuse plus petite que les cônes, ce qui justifie leur rôle dans la vision nocturne.

9 – Les cônes 1 sont les plus sensibles pour les petites longueurs d'onde, donc vers le bleu.

Les cônes 2 sont les plus sensibles vers les longueurs d'onde à partir de 600 nm, ce qui correspond au début du rouge. Enfin, les cônes 3 seront sensibles au vert.

10 – Si on considère en ordre de grandeur que le cône est sensible à 10^3 lux , on obtient une puissance surfacique minimale

$$P_s = \frac{10^3}{683} \times 1 \text{ W.m}^{-2}$$

La surface laissant entrer la lumière est celle de la pupille, soit

$$S = \pi \frac{D_p^2}{4}$$

Il faut donc que l'œil reçoive au minimum

$$P = \frac{10^3}{683} \times \pi \frac{(3 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ W}$$

Remarques :

-si l'élève considère (ou sait) que la valeur de 683 lux est en fait exactement la valeur minimale de sensibilité, il obtient $7 \mu\text{W}$.

-On tolère en lecture graphique jusqu'à $10^{2,6} \text{ lux}$, ce qui donne une puissance de $4 \mu\text{W}$.

11 – L'énergie d'un photon de fréquence ν est, par la loi de Planck, $\mathcal{E} = h\nu$.

Par ailleurs, on sait que $\lambda = \frac{c}{\nu}$, on a donc une énergie $\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda}$.

L'énergie apportée par le flux de photons pendant un temps Δt est

$$\mathcal{E}_{tot} = \mathcal{P} \Delta t = \Phi \Delta t \mathcal{E}$$

Finalement, on a donc

$$\Phi = \frac{\mathcal{P} \lambda}{hc} = 2,8 \cdot 10^{13} \text{ photons/s}$$

Remarque : pour $\mathcal{P} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ W}$, on a $\Phi = 1,1 \cdot 10^{13} \text{ photons/s}$.

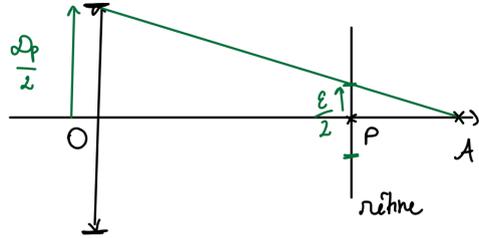
1.2.2 Taille des capteurs

12 – Etape 1 : taille d'un cône.

En considérant qu'un cône est carré et que la zone la plus dense est compacte : on a sur une surface S de 1 mm^2 de la fovéa : $S = 2.10^5 \varepsilon^2$ avec ε le côté du carré. On en déduit $\varepsilon = \sqrt{5}.10^{-3} \text{ mm} = 2,2.10^{-6} \text{ m}$.

Etape 2 : Position de A' .

On peut tracer le rayon arrivant en A' , image du point A le plus proche visible avec la mise au point à l'infini :



En appliquant le théorème de Thalès, on obtient :

$$\frac{OA'}{A'P} = \frac{D_p/2}{\varepsilon/2}$$

et $A'P = -f_{PR} + OA'$. Ainsi,

$$OA' = \frac{D_p}{\varepsilon} \frac{f_{PR}}{(-1 + D_p/\varepsilon)}$$

Etape 3 : Position de A .

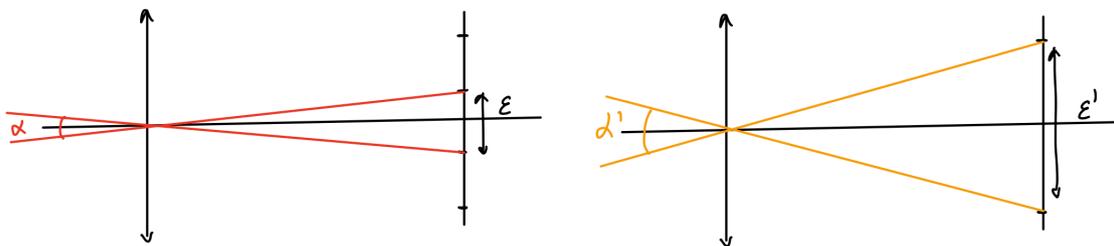
On utilise la relation Descartes :

$$\overline{OA} = \frac{f_{PR} \overline{OA'}}{f_{PR} - \overline{OA'}}$$

Dans la situation étudiée, on a $\overline{OA'} = OA'$, et en calculant, on obtient :

$$\overline{OA} = -f_{PR} \frac{D_p}{\varepsilon} = -20 \text{ m}$$

13 – On peut tracer les rayons venant de 2 points qu'on ne peut pas toujours distinguer (donc dont les rayons atteignent les extrémités d'un même capteur) :



On voit que plus la taille du capteur est grande, plus l'angle de résolution est grand.

14 – Deux points à l'infini ayant un écart de moins de α peuvent former leur image sur le même photorécepteur dans le plan focal du cristallin. Cf schéma précédent. Si on note ε le diamètre de la tache et qu'on se place dans l'approximation des petits angles, $\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\varepsilon/2}{f_{PR}} = \frac{\alpha}{2}$.

On a donc

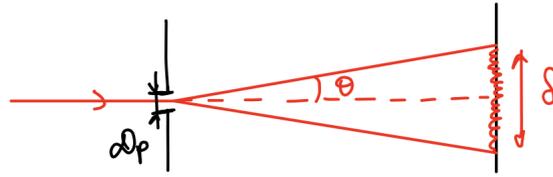
$$\varepsilon = f_{PR} \alpha = 4,5.10^{-6} \text{ m}$$

Dans une zone de 1 mm^2 on peut donc avoir (en considérant toujours les photorécepteurs comme des carrés)

$$N = \frac{1}{(4,5.10^{-3})^2} \simeq 5.10^4$$

Ce résultat est satisfaisant.

15 – Il y a phénomène de diffraction par la pupille :



Si on note δ le diamètre de la tache image d'un point à l'infini et qu'on se place dans l'approximation des petits angles, on a $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{D_p} \approx \theta$ et $\tan(\theta) = \frac{\delta}{2f_{PR}} \approx \theta$

On a donc $\delta = 2f_{PR} \frac{\lambda}{D_p} = 5.10^{-6}$ m pour $\lambda = 500$ nm, ce qui correspond à une surface de $\delta^2 = 2,5.10^{-11}$ m² pour la tache de diffraction.

A la question 12, on avait estimé $\epsilon = 2,2.10^{-6}$ m, soit une surface de $\epsilon^2 = 5.10^{-12}$ m² pour les capteurs.

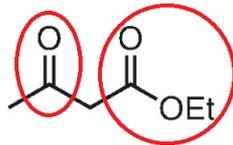
Ainsi, on constate que bien qu'une diminution de la taille des capteurs devrait entraîner une meilleure résolution, elle n'est pas utile car le phénomène de diffraction impose une taille minimale pour la tache image.

Par ailleurs, une diminution de la taille des capteurs entraînerait une diminution de la profondeur de champ de netteté. On peut considérer que la taille actuelle des photorécepteurs est un bon compromis.

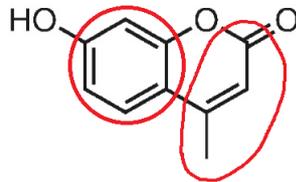
2. La digestion : synthèse d'un médicament antispasmodique

2.1 Etude du protocole

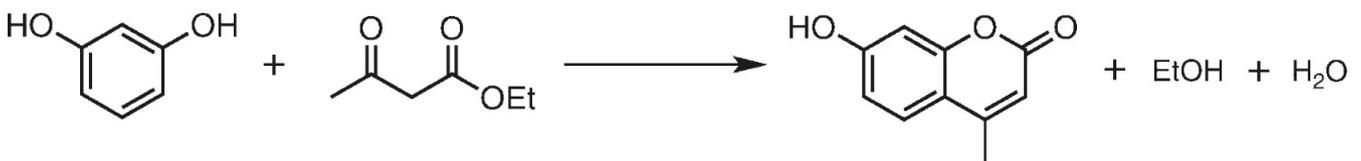
16 – Les groupes caractéristiques de l'acétoacétate d'éthyle sont entourés sur la figure ci-dessous. L'acétoacétate d'éthyle présente une fonction cétone et une fonction ester.



17 – Formule topologique de l'hymécromone : on reconnaît la chaîne carbonée du résorcinol à gauche et celle de l'acétoacétate d'éthyle à droite.



18 – Equation de la réaction :



19 – Le léger dégagement gazeux observé pendant la transformation (étape 1) est dû à la formation d'éthanol gazeux dont la température d'ébullition (78 °C sous P = 1 bar) est inférieure à la température du milieu réactionnel (bain-marie à 80 °C).

20 – La solution se trouble lors de l'ajout d'eau chaude lors de l'étape 3 car il y a précipitation du produit (apparition d'hymécromone solide). D'après les données, l'hymécromone est soluble dans l'éthanol (la solution contenue dans l'erenmeyer n°2 est donc limpide à l'issue de l'étape n° 2) mais très peu soluble dans l'eau chaude; l'ajout d'eau chaude fait ainsi diminuer la solubilité de l'hymécromone dans le mélange eau-éthanol; quand on atteint la limite de solubilité de l'hymécromone, du solide se forme.

21 – Le lavage à l'eau froide lors de l'étape 4 permet d'éliminer les impuretés présentes (réactifs restants : résorcinol et acétoacétate d'éthyle) ainsi que les traces d'éthanol restant. On utilise de l'eau froide pour limiter les pertes de produit solide (l'hymécromone est un peu plus soluble dans l'eau chaude que dans l'eau froide).

22 – Quantités de matière introduites :

$$\text{Résorcinol} : n_1 = \frac{m_1}{M_1} = \frac{0,805}{110,11} = 7,31 \text{ mmol}$$

$$\text{Acétoacétate d'éthyle} : n_0 = \frac{m_0}{M_0} = \frac{d \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V_0}{M_0} = \frac{1,03 \times 1,00 \times 1,00}{130,14} = 7,91 \text{ mmol}$$

$\frac{n_1}{1} < \frac{n_0}{1}$ donc le résorcinol est le réactif limitant.

23 – Détermination du rendement de la synthèse :

$$\text{Quantité de matière de produit obtenue} : n_2 = \frac{m_2}{M_2} = \frac{0,907}{176,17} = 5,15 \text{ mmol}$$

$$\text{Rendement de la synthèse} : \eta = \frac{n_2}{n_1} \times 100 = 70,4 \%$$

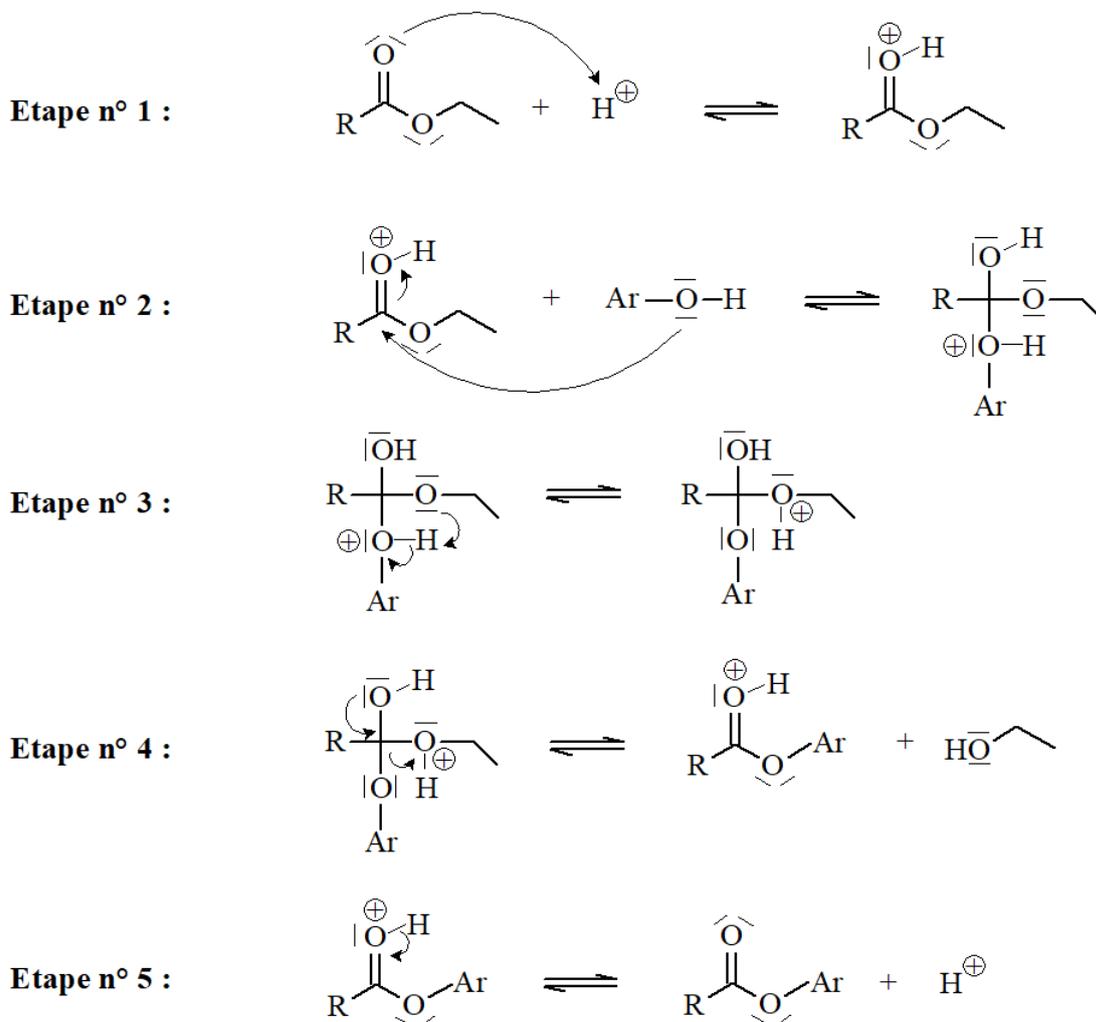
24 – Analyse du spectre infrarouge de l'hymécromone :

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Attribution
3167	OH
2924	CH
1680	C = O (ester conjugué)
1458 - 1601	C = C aromatique et C = C conjuguée
1390	C - O*

* Il s'agit en fait certainement d'une vibration de déformation C - H du CH₃.

2.2 Etude du mécanisme réactionnel

25 – Mécanisme de la transestérification :



Type de réaction mis en jeu dans chacune des différentes étapes de ce mécanisme :

- l'étape n° 1 est un équilibre acide-base,
- l'étape n° 2 est une addition (nucléophile),
- l'étape n° 3 est un équilibre acide-base,
- l'étape n° 4 est une élimination,
- l'étape n° 5 est un équilibre acide-base.

26 – Les protons H^+ (fournis par la résine Dowex) sont consommés puis régénérés au cours de la réaction. Ils jouent le rôle de catalyseur.

2.3 Etude de l'impact environnemental de la synthèse

27 – La voie de synthèse présentée ici peut être qualifiée de synthèse « verte » :

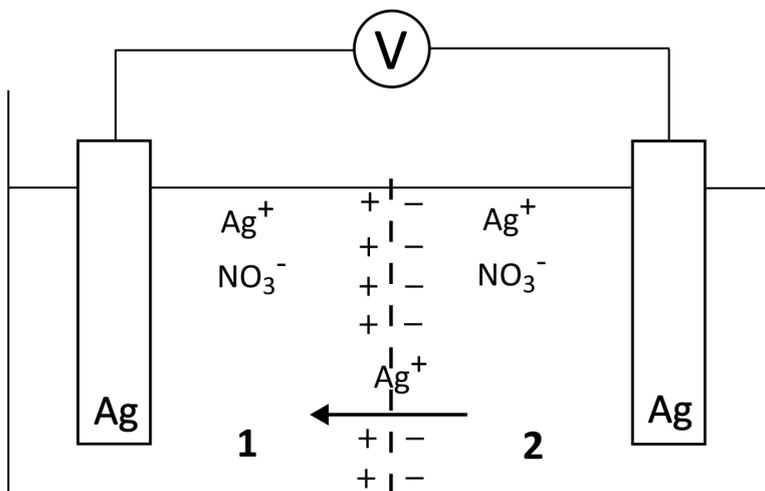
- Principe 2 : la quasi-totalité des atomes des réactifs se retrouvent dans le produit final, on réalise donc une économie d'atomes.
- Principe 3 : la synthèse proposée évite l'utilisation de produits toxiques comme le trichlorure de phosphore (composé toxique et cancérigène).
- Principe 5 : la synthèse proposée utilise des solvants non toxiques : la transformation se fait sans solvant ce qui réduit les déchets et limite les risques (dans la synthèse classique, le solvant utilisé est le toluène qui est nocif, cancérigène et tératogène) et l'on utilise de l'eau et de l'éthanol, beaucoup moins nocif, pour la séparation du produit du milieu réactionnel.
- Principe 6 : la transformation se fait ici à 80 °C, une température plus basse que la synthèse classique (température d'ébullition du toluène : 111 °C) ce qui limite les dépenses énergétiques.
- Principe 9 : on utilise ici un catalyseur non toxique et réutilisable, ce qui réduit les déchets.

- Principe 12 : l'utilisation d'un catalyseur acide sous forme de billes faciles à manipuler rend la synthèse proposée plus sûre.

3. Le système nerveux

3.1 Potentiel d'équilibre et potentiel de repos

28 – Schéma de la pile :



Initialement la concentration en Ag^+ dans le compartiment 1 est plus faible que celle dans le compartiment 2 donc les ions Ag^+ traversent la paroi en se déplaçant du compartiment 2 vers le compartiment 1.

29 – Les deux électrodes sont reliées par un voltmètre dont la résistance électrique est très élevée. Il n'y a donc pas de courant traversant la pile dans cette situation.

30 – Ce phénomène de diffusion se produit tant que la concentration entre les deux compartiments est différente. S'il était seul à expliquer le mouvement des charges, on devrait donc avoir au bout d'un temps long un état d'équilibre tel que :

$$[Ag^+]_1 = [Ag^+]_2$$

31 – Initialement les deux compartiments sont électriquement neutres. La diffusion des ions Ag^+ du compartiment 2 vers le compartiment 1 entraîne un excès de charges positives dans le compartiment 1 (donc chargé +) et un déficit pour le compartiment 2 (donc chargé -) non compensé par un mouvement des ions NO_3^- puisque la paroi n'est perméable qu'aux ions Ag^+ . Les ions Ag^+ vont donc se coller à la paroi dans le compartiment 1 et les ions NO_3^- dans le compartiment 2 (cf schéma). Cela va avoir tendance à retenir les ions Ag^+ dans le compartiment 2 (attirés électriquement par cette surcharge négative au voisinage de la paroi côté 2 et repoussés par cette surcharge positive côté 1) et ce, même si la concentration en Ag^+ est toujours plus importante du côté 2 que du côté 1.

32 – A l'équilibre $\mu_{A1} = \mu_{A2}$ Soit

$$\frac{RT}{N_a} \ln([A]_1) + qV_1 + E_p = \frac{RT}{N_a} \ln([A]_2) + qV_2 + E_p$$

$$\frac{RT}{N_a} \ln\left(\frac{[A]_1}{[A]_2}\right) = q(V_2 - V_1)$$

D'où

$$E_A = V_2 - V_1 = \frac{RT}{neN_a} \ln\left(\frac{[A]_1}{[A]_2}\right) = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{[A]_1}{[A]_2}\right)$$

33 – Avec la définition $E_{repos} = V_{intra} - V_{extra}$ dans le cas du neurone le milieu extra-cellulaire joue le rôle du compartiment 1 et le milieu intra-cellulaire celui du compartiment 2. Les potentiels à l'équilibre sont donc :

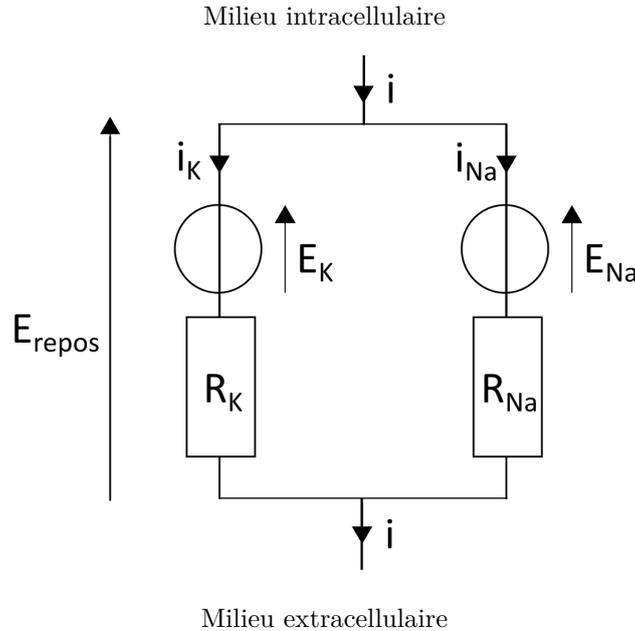
$$E_K = \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{[K^+]_{ext}}{[K^+]_{int}}\right) = 8.31 \frac{310}{96500} \ln\left(\frac{5}{140}\right) = -89mV$$

$$E_{Na} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{[Na^+]_{ext}}{[Na^+]_{int}} \right) = 8.31 \frac{310}{96500} \ln \left(\frac{140}{14} \right) = 61 mV$$

$$E_{Cl} = -\frac{RT}{F} \ln \left(\frac{[Cl^-]_{ext}}{[Cl^-]_{int}} \right) = 8.31 \frac{310}{96500} \ln \left(\frac{147}{14} \right) = -63 mV$$

34 – On voit que dans le cas de Cl^- le potentiel à l'équilibre est proche du potentiel de repos (-65mV) alors que pour les deux autres ions ce n'est pas le cas. Au repos, la situation concernant les ions sodium et potassium n'est donc pas une situation d'équilibre. On peut montrer qu'en plus de ce qui a été étudié il existe un transport actif (appelé pompe Na-K) qui permet de maintenir la situation de ces deux ions hors-équilibre.

35 – Au repos, il existe une différence de potentiel E_{repos} aux bornes de chaque canal qui est modélisé par une fem E_A et une résistance R_A en série. Le circuit électrique modélisant le neurone à deux canaux est donc :



36 – Au repos $i = 0$ donc en appliquant la loi des noeuds : $i_{Na} + i_K = 0$

37 – En appliquant la loi des mailles et en substituant dans la relation précédente on obtient :

$$\frac{E_{repos} - E_{Na}}{R_{Na}} + \frac{E_{repos} - E_K}{R_K} = 0$$

donc finalement

$$E_{repos} = \frac{\frac{E_{Na}}{R_{Na}} + \frac{E_K}{R_K}}{\frac{1}{R_{Na}} + \frac{1}{R_K}} = \frac{\alpha E_{Na} + E_K}{1 + \alpha}$$

38 –

$$\alpha = \frac{E_K - E_{repos}}{E_{repos} - E_{Na}} = \frac{-89 + 65}{-65 - 61} = 0,19 = 19\%$$

39 – $\alpha < 1$ donc $R_K < R_{Na}$. On retrouve bien que les canaux sodium sont moins conducteurs que les canaux potassium. Les ions K^+ diffusent facilement vers le milieu extra-cellulaire du fait de la différence de concentration en revanche les ions Na^+ diffusent moins facilement dans l'autre sens. Il en résulte une polarisation de la membrane, chargé positivement du côté extérieur et négativement du côté intérieur.

3.2 Potentiel d'action

40 – La membrane de l'axone se comporte comme deux armatures chargées électriquement avec des charges opposées qui se font face. Le modèle du condensateur permet de rendre compte de ce phénomène.

41 –

$$R_a = \frac{\rho_a \Delta x}{\pi r^2} = 1,0 \times 1,0 \times \frac{10^{-3}}{\pi \times (3,0 \cdot 10^{-6})^2} = 3,5 \cdot 10^7 \Omega$$

$$R_f = \frac{1}{G_{fs} 2\pi r \Delta x} = \frac{1}{5 \times 2\pi \times 3,0 \cdot 10^{-6} \times 1,0 \cdot 10^{-3}} = 1,1 \cdot 10^7 \Omega$$

On remarque que $R_f < R_a$ donc le courant de fuite est important et ne peut être négligé.

$$C = C_{ms} \times 2\pi r \Delta x = 1,0 \cdot 10^{-2} \times 2\pi \times 3,0 \cdot 10^{-6} \times 1,0 \cdot 10^{-3} = 0,19 nF$$

42 – La présence de myéline va augmenter la valeur de R_f (puisqu'elle diminue fortement la valeur de G_{fs} sans modifier r ou Δx) et diminuer la valeur de C (diminuant la valeur de C_{ms} sans modifier r ou Δx). Elle n'influence pas la valeur de R_a . Conclusion : le courant de fuite est plus faible.

43 –

$$Q = C|E_K| = 1,9 \cdot 10^{-10} \times 89 \cdot 10^{-3} = 1,7 \cdot 10^{-11} C$$

44 – Volume de la cellule : $V_{cell} = \pi r^2 \Delta x$

Nombre d'ions à l'intérieur de la cellule : $N_{tot} = N_a [K^+]_{int} V_{cell}$

Nombre d'ions ayant traversé la membrane : $N_{eq} = \frac{Q}{e}$

$$p = \frac{N_{eq}}{N_{tot}} = \frac{Q}{e N_a [K^+]_{int} \pi r^2 \Delta x} = \frac{2 E_K C_{ms}}{e r N_a [K^+]_{int}} = \frac{2 \times 0,089 \times 1,0 \cdot 10^{-2}}{1,6 \cdot 10^{-19} \times 140 \cdot 10^{-3} \times 10^3 \times 3,0 \cdot 10^{-6} \times 6,02 \cdot 10^{23}} = 4,4 \cdot 10^{-3} \%$$

On peut considérer la composition du milieu intracellulaire inchangée du fait de ce mouvement d'ions.

45 – En appliquant la loi des noeuds :

$$i_a = \frac{V}{R_f} + C \frac{dV}{dt}$$

Or en appliquant la loi des mailles :

$$V_0 - R_a i_a - V = 0$$

donc

$$i_a = \frac{V_0 - V}{R_a}$$

Finalement

$$\frac{V_0 - V}{R_a} = \frac{V}{R_f} + C \frac{dV}{dt}$$

et sous forme canonique :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_f} \right) V = \frac{V_0}{R_a C}$$

qui peut se réécrire :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\tau} V = \frac{V_0}{R_a C}$$

avec $\tau = \frac{R_a R_f C}{R_a + R_f}$

46 – Lorsque la tension aux bornes du condensateur de la cellule 1 atteint E_{exci} , le condensateur de la cellule 2 se met en charge. Cependant la tension à ses bornes n'atteint jamais E_{exci} (il faudrait un temps infini pour cela) donc les grandeurs électriques de la cellule 3 ne changent pas. Le potentiel d'action devrait s'arrêter à la cellule 2. L'hypothèse faite dans le sujet permet de modéliser un potentiel d'action poursuivant sa propagation au-delà de la deuxième cellule.

47 – Physiquement, τ donne l'ordre de grandeur de la durée de propagation du potentiel d'action dans une cellule de l'axone. Cette durée est la même pour toutes les cellules compte tenu de l'hypothèse précédente.

48 – En l'absence d'information on prend l'initiative de négliger les temps de traitement de l'information par les différents centres (cerveau et moëlle épinière) par rapport au temps de propagation du signal dans les fibres nerveuses. On néglige également toute durée de transmission de l'information entre les neurones via les synapses.

On note $t=0$ l'instant auquel on se pique le doigt. L'information douloureuse étant ressentie en deux temps, cela signifie qu'elle emprunte deux fibres nerveuses sensibles différentes. Compte tenu du tableau fourni, on associe à ces deux douleurs les trajets par les fibres A-delta et C. On notera 1 l'événement correspondant à la première douleur ressentie et 2 pour la seconde.

Lorsque la moëlle épinière reçoit l'information en premier (par la fibre dans laquelle l'information se propage le plus vite), elle transmet aussitôt la commande de mouvement à la main par un neurone moteur A-alpha. On notera 3 l'événement du mouvement de retrait de la main.

Ces trois fibres ayant été identifiées, on calcule pour chacune d'entre elles le temps caractéristique τ et la vitesse moyenne de propagation de l'information $v = \frac{\Delta x}{\tau}$:

Fibre	A-delta	C	A-alpha
$R_a(\Omega)$	$8,0 \cdot 10^7$	$5,1 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^6$
$R_f(\Omega)$	$4,8 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^8$	$9,5 \cdot 10^8$
$C(F)$	$7,5 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$3,8 \cdot 10^{-12}$
$\tau(s)$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Vitesse de propagation $v(m \cdot s^{-1})$	17	0,51	84

On note que la vitesse de propagation est beaucoup plus importante dans les fibres avec myéline (A-delta et A-alpha) et qu'elle augmente avec le rayon de l'axone (A-alpha vs A-delta).

Calculons les instants t_1 et t_2 auxquels la douleur véhiculée par les fibres A-delta et C est ressentie. Concernant les distances parcourues on prendra $L_{cerveau} = 1,2m$ la distance entre le bout du doigt et le cerveau et $L_{moelle} = 0,8m$ la distance entre le bout du doigt et la moëlle épinière :

$$t_1 = \frac{L_{cerveau}}{v_{delta}} = \frac{1,2}{17} = 71ms$$

$$t_2 = \frac{L_{cerveau}}{v_C} = \frac{1,2}{0,51} = 2,3s$$

L'instant de retrait est

$$t_3 = \frac{L_{moelle}}{v_{delta}} + \frac{L_{moelle}}{v_{alpha}} = 0,8 \left(\frac{1}{17} + \frac{1}{84} \right) = 57ms$$

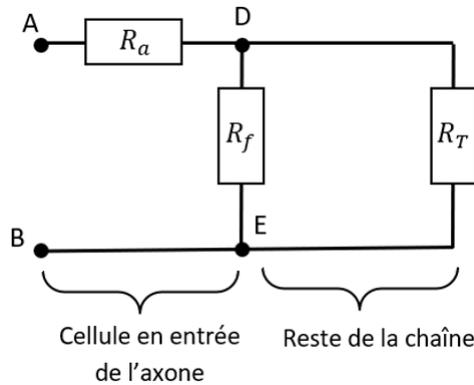
Remarque : Pour $L_{cerveau} = L_{moelle} = 1$ m, on trouve $t_1 = 59$ ms, $t_2 = 2,0$ s et $t_3 = 71$ ms.

La première douleur vive mais fugace est d'abord ressentie au bout d'environ $70ms$ à peu près en même temps que se produit le mouvement de retrait de la main. Ensuite au bout d'environ $2s$ une douleur plus diffuse et de durée plus longue est ressentie.

49 – La longueur de l'axone (qui peut aller jusqu'à $1m$) est très grande par rapport à la taille d'une cellule ($1mm$), on peut donc en première approximation considérer la chaîne de cellules qui la modélise comme « infinie ».

50 – La chaîne perçue à droite de DE est la même qu'à droite de AB si elle est infinie donc la résistance à droite des points D et E est égale à celle à droite de A et B et égale à R_T .

51 – On schématise la chaîne :



52 –

$$U = R_1 i + R_2 i = (R_1 + R_2) i = R_{eq,serie} i$$

avec

$$R_{eq,serie} = R_1 + R_2$$

53 – En appliquant la loi des noeuds :

$$i = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = \frac{U}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{U}{R_{eq,||}}$$

avec

$$R_{eq,||} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

54 – Les deux résistances à droite (R_f et R_T) sont en dérivation. On peut donc les remplacer par une résistance équivalente $R_{eq1} = \frac{R_T R_f}{R_T + R_f}$. Cette résistance est elle-même en série avec R_a donc l'ensemble peut être remplacé par une unique résistance $R_{eq2} = R_a + \frac{R_T R_f}{R_T + R_f}$. Or la résistance totale entre A et B n'est autre que R_T d'où

$$R_T = R_a + \frac{R_T R_f}{R_T + R_f}$$

Finalement,

$$\begin{aligned} R_T^2 - R_a R_T - R_a R_f &= 0 \\ \Delta &= R_a^2 + 4R_a R_f \\ R_T &= \frac{R_a \pm \sqrt{R_a^2 + 4R_a R_f}}{2} \end{aligned}$$

Une résistance électrique étant positive on garde

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

55 – En notant i l'intensité circulant dans la résistance R_a de la première cellule de A vers D et en reprenant le schéma simplifié avec R_a et R_{eq1} en série.

$$V_0 = (R_{eq1} + R_a) i$$

De plus

$$V_1 = R_{eq1} i$$

Donc

$$V_1 = R_{eq1} \frac{V_0}{R_{eq1} + R_a} = \frac{V_0}{1 + R_a / R_{eq1}} = \frac{V_0}{1 + \beta}$$

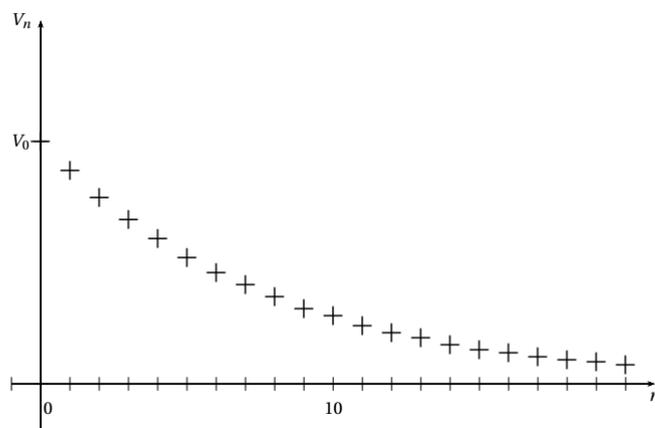
avec

$$\beta = \frac{R_a}{R_{eq1}} = \frac{R_a}{R_T - R_a}$$

56 – Pour la n^{eme} cellule on a par le même raisonnement que : $V_n = \frac{V_{n-1}}{1 + \beta}$. (V_n) est donc une suite géométrique de raison $\frac{1}{1 + \beta}$ d'où

$$V_n = \frac{V_0}{(1 + \beta)^n}$$

On remarque que cette expression n'est vérifiée que pour une cellule éloignée de la dernière cellule. V_n décroît d'une valeur V_0 en $n = 0$, pour tendre vers 0 pour les fortes valeurs de n .



57 – En notant $x = 2mm$ la distance entre 2 nœuds de Ranvier ceux-ci sont donc séparés par $N = 2$ cellules (chacune mesurant $1mm$).

$$\frac{V_2}{V_0} = \frac{1}{(1 + \beta)^2}$$

Avec les valeurs obtenues précédemment sans myéline :

$$R_a = 3,5 \cdot 10^7 \Omega$$

$$R_f = 1,1 \cdot 10^7 \Omega$$

$$R_T = \frac{R_a + \sqrt{R_a^2 + 4R_a R_f}}{2} = 4,4 \cdot 10^7 \Omega$$

$$\beta = \frac{R_a}{R_T - R_a} = 3,9$$

D'où

$$\frac{V_2}{V_0} = 4\%$$

Au bout de deux cellules, l'amplitude du signal a chuté de 96 % d'où le nom de chaîne atténuatrice. On comprend la nécessité d'amplifier périodiquement le signal (avec les nœuds de Ranvier) pour qu'il puisse se propager sur des distances de plus d'un mètre.

4. Le cœur : pompe de la circulation sanguine

4.1 Puissance fournie par le cœur au sang

58 – L'étape *A* vers *B* correspond à une augmentation du volume à faible pression. Il s'agit donc du remplissage du ventricule.

L'étape *B* vers *C* correspond à un volume élevé et une augmentation de la pression. Il s'agit donc de la contraction systolique.

L'étape *C* vers *D* est à pression constante et correspond à une diminution du volume. Il s'agit donc de l'éjection du sang.

Enfin, l'étape *D* vers *A* est la relaxation diastolique.

59 – Lors de l'étape *AB*, le sang est celui qui donne de l'énergie au cœur en le gonflant. Ainsi, le travail fourni par le cœur au sang est négatif.

Lors de l'étape *CD*, le cœur éjecte le sang, lui donnant de l'énergie. Le travail fourni par le cœur au sang est donc positif.

60 – On a immédiatement $W_{BC} = W_{DA} = 0$ car l'aire sous la courbe est nulle.

Ensuite,

$$W_{AB} = -(V_B - V_A)P_A - \frac{1}{2}(V_B - V_A)(P_B - P_A) = -60 \cdot 10^{-6} \times 133 - \frac{1}{2}60 \cdot 10^{-6} \times 4 \times 133 = -24 \text{ mJ}$$

$$W_{CD} = (V_B - V_A)P_C = 60 \cdot 10^{-6} \times 100 \times 133 = 0,80 \text{ J}$$

61 – On a $\frac{W_{AB}}{W_{CD}} = 0,03$, on peut donc négliger W_{AB} devant W_{CD} .

On a alors

$$W_g = (V_B - V_A)P_C$$

Il suffit de poser $V_B - V_A = V_{ES}$ qui représente le volume de sang éjecté lors de la systole (ou admis lors de la diastole).

62 – On peut définir le rendement η_c

$$\eta_c = \frac{W_d + W_g}{W_{tension}} = \frac{1,2 \times 800 \cdot 10^{-3}}{20} = 0,048$$

Le rendement du cœur est très faible : autrement dit, la part de l'énergie fournie pour fonctionner transférée au sang est très faible.

4.2 Débit cardiaque et facteurs d'adaptation

63 – $\mathcal{D}_v = f \cdot V_{ES} = 1 \times 60 \cdot 10^{-3} = 0,06 \text{ L/s}$ (On peut proposer $f = 1 \text{ Hz}$ (60 battements par minute)).

64 – Dans ce cas, en 10 min, 1L de sang se serait accumulé dans les poumons, ce qui paraît dangereux.