

PHYSIQUE-CHIMIE
Analyse de documents scientifiques
Durée : 3 heures

L'usage d'une calculatrice est autorisé

Chaque candidat est responsable de la vérification de son sujet d'épreuve : pagination et impression de chaque page. Ce contrôle doit être fait en début d'épreuve. En cas de doute, il doit alerter au plus tôt le chef de centre qui vérifiera et éventuellement remplacera le sujet. Si au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Thème : Mécanisme du mouvement rapide de la plante carnivore dionée

L'objectif général est de comprendre comment un végétal tel que la dionée, organisme dépourvu de muscles, est capable de mouvements extrêmement rapides.

L'analyse proposée dans le sujet s'appuie sur huit documents scientifiques présentés ci-dessous. Elle mobilise également les acquis personnels dans le cadre de la préparation au concours. Le candidat est invité à lire attentivement les documents avant de répondre aux questions.

Documents scientifiques

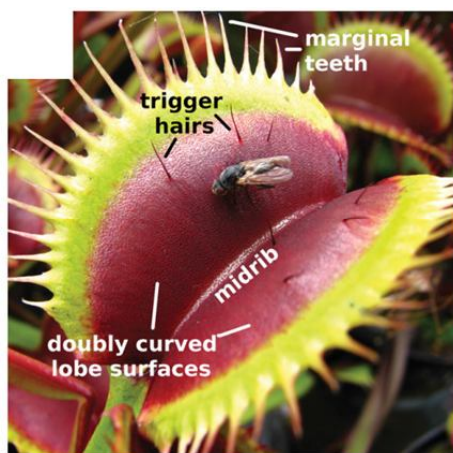


Figure 1. Piège de la dionée. *Trigger hairs* : poils déclencheurs ; *marginal teeth* : dent marginale (cil) ; *midrib* : nervure centrale ; *doubly curved lobe surfaces* : surfaces incurvées des lobes.

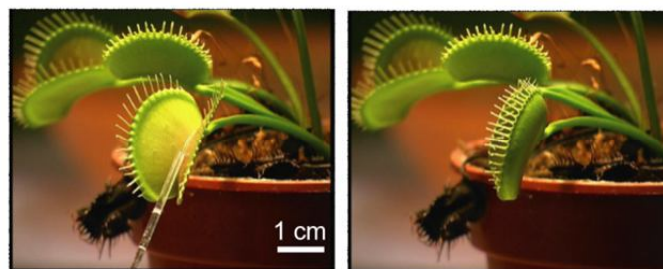


Figure 2. Piège de la dionée dans l'état ouvert (à gauche) et dans l'état fermé (à droite).

Document 1

La dionée (*Dionaea muscipula*) est une plante carnivore originaire des États-Unis d'Amérique, plus précisément de la côte est (Caroline du Nord et Caroline du Sud). C'est une plante de petite taille (une quinzaine de centimètres de diamètre), constituée d'un pied principal duquel émergent entre dix et vingt longues tiges qui portent chacune un piège d'environ 2 à 3 cm de diamètre. Habituees à vivre dans des tourbières, sols très pauvres en minéraux, ces plantes ont développé la capacité d'attraper des insectes (mouches, fourmis, etc.) dans leurs pièges. Chacun des petits pièges est constitué de deux lobes en regard reliés par une nervure principale, portant de nombreux cils qui ressemblent à des dents. Sur la face interne de chaque lobe, souvent de couleur rouge, se trouvent des

milliers de glandes digestives ainsi que trois ou quatre grands poils sensitifs (Figure 1). Un contact mécanique avec ces poils, deux fois en moins de 30 secondes, produit un signal électrique qui se propage dans toute la feuille et déclenche la fermeture immédiate du piège. Les deux contacts peuvent avoir lieu sur des poils différents d'un même piège. Le piège se ferme en une fraction de seconde mais il met entre 12 et 24 heures pour se rouvrir lorsqu'il est vide. Il met plus d'une semaine à se rouvrir lorsqu'il a capturé une proie et que le processus de digestion s'enclenche.

Document 2

Chaque lobe du piège a une forme de coque mince courbée vers l'extérieur dans l'état ouvert et vers l'intérieur dans l'état fermé (Figure 2). Lorsque le piège se déclenche, la plante change activement la courbure naturelle des lobes. Ce changement de courbure s'accompagne d'une compression du tissu végétal ce qui nécessite un apport d'énergie. Il existe une barrière d'énergie correspondant à l'état où la compression est maximale. Lorsque cette barrière est franchie, le lobe se retourne brutalement en prenant une courbure inverse de la courbure initiale. Le mécanisme de fermeture du piège comprend donc deux phases : une phase active nécessitant un apport d'énergie et une phase passive pendant laquelle l'énergie précédemment emmagasinée est brutalement libérée (Figure 3).

Le mécanisme par lequel la plante change activement sa courbure naturelle pour franchir le seuil d'énergie est encore fortement débattu. Ce changement actif de courbure est le véritable moteur interne du mouvement. Plusieurs hypothèses principales ont été avancées pour expliquer ce mouvement actif :

- La première hypothèse suppose que la fermeture est produite par un transport d'eau de type osmotique à travers l'épaisseur de la feuille, en réponse à un changement de pression de turgescence (Figure 4, cas (a)).
- Une seconde hypothèse suppose que le mouvement de fermeture provient d'une croissance très rapide des cellules de la face externe du piège. La croissance proviendrait d'une acidification de la paroi des cellules de l'épiderme externe, qui entraînerait un élongation irréversible sous l'effet de la pression de turgescence (Figure 4, cas (b)).
- Selon une troisième hypothèse, le tissu interne situé entre les épidermes (le mésophylle) serait sous compression dans l'état ouvert et maintenu comprimé par les deux épidermes plus rigides que lui. Lors du déclenchement du piège, l'épiderme de la face externe se ramollirait brutalement tandis que celui de la face interne resterait rigide. Cet effet entraînerait le changement de courbure (Figure 4, cas (c)).

Document 3

Représentation de la variation de la courbure moyenne d'un lobe en fonction du temps lors de la fermeture du piège (Figure 5). Une courbure nulle signifie que le lobe n'est pas incurvé (il est sensiblement plan). Plus la courbure

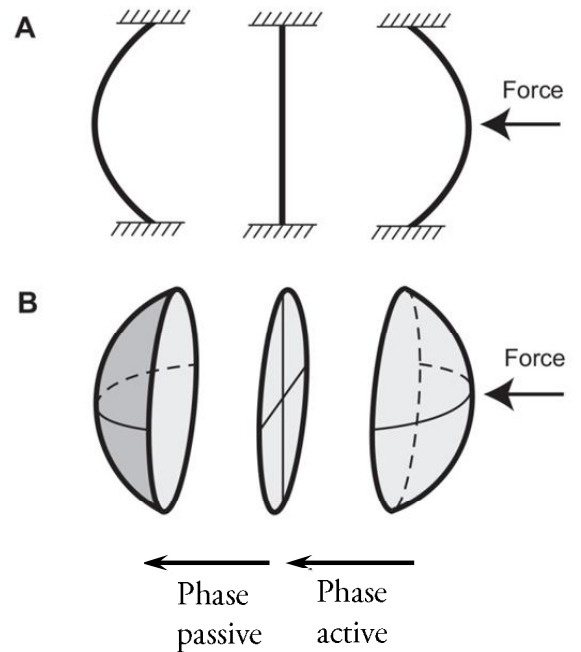


Figure 3. Passage en deux phases d'un état de repos avec une courbure naturelle à un autre état de repos avec une courbure inversée, pour une coque sphérique, sous l'action d'une force.

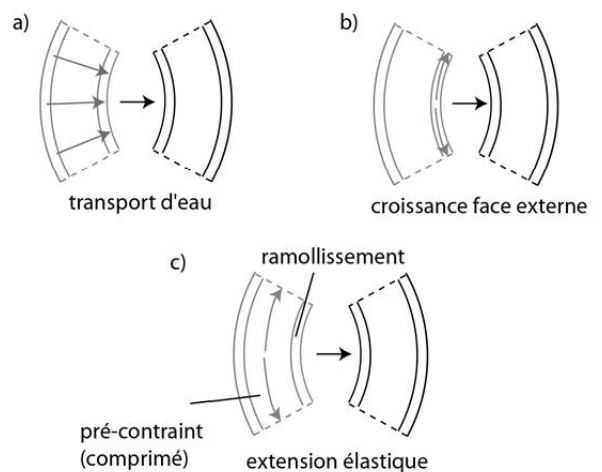


Figure 4. Les trois hypothèses expliquant le mouvement actif de fermeture du piège de la dionée (voir texte).

est grande en valeur absolue, plus le lobe est incurvé. Un changement de signe de la courbure signifie que le lobe est incurvé dans l'autre sens.

Document 4

Une cellule végétale peut être décrite, dans un modèle très simplifié, par une poche, appelée *vacuole*, contenant une *solution aqueuse*, entourée par une *membrane*, elle-même entourée par une *paroi rigide* (Figure 6). On considèrera que chaque cellule végétale du piège de la dionée a la forme d'un cube de côté δx et de volume V . Cette géométrie simplifiée ne change pas fondamentalement la physique du problème. Les membranes seront supposées parfaitement semi-imperméables, c'est-à-dire qu'elles sont perméables à l'eau et imperméables aux solutés. On définit le *potentiel hydrique* Ψ de la cellule par

$$\Psi = \frac{\mu(T, P, x_e) - \mu^\circ(T)}{V_m}$$

où $\mu(T, P, x_e)$ est le potentiel chimique de l'eau dans la solution, à la température T , la pression P et pour une fraction molaire en eau x_e , $\mu^\circ(T)$ le potentiel chimique standard de l'eau à la même température T et où V_m est le volume molaire de l'eau, que l'on peut supposer constant, de même que la température. On modélise la solution par la présence d'un seul soluté, très dilué, de fraction molaire $x_s = 1 - x_e$. Pour ce qui est du solvant, le mélange peut être considéré idéal. On peut alors montrer que le potentiel hydrique de la cellule s'écrit

$$\Psi = P_T - \Pi$$

où P_T est la *pression de turgescence*, égale par définition à la différence entre la pression et la pression standard, et où Π est la *pression osmotique*. On peut montrer que $\Pi = c_s RT$ où c_s est la concentration en soluté, R est la constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) et T la température.

Si le potentiel hydrique Ψ de la cellule est différent du potentiel hydrique Ψ_{ext} du milieu extérieur, un flux d'eau diffuse à travers la membrane avec un débit volumique

$$D_V = L_p S \Delta \Psi$$

où $\Delta \Psi = \Psi_{ext} - \Psi$, S est la surface traversée et L_p

membrane. Le volume de la cellule varie lorsqu'un flux d'eau traverse la membrane de sorte que

$$\frac{dV}{dt} = D_V.$$

Lorsque le volume de la cellule varie de ΔV et que le potentiel hydrique de la cellule varie de $\Delta \Psi$, le rapport de ces deux grandeurs vérifie

$$\frac{\Delta V}{\Delta \Psi} = \frac{V_0}{\varepsilon + \Pi_0} \approx \frac{V_0}{\varepsilon}$$

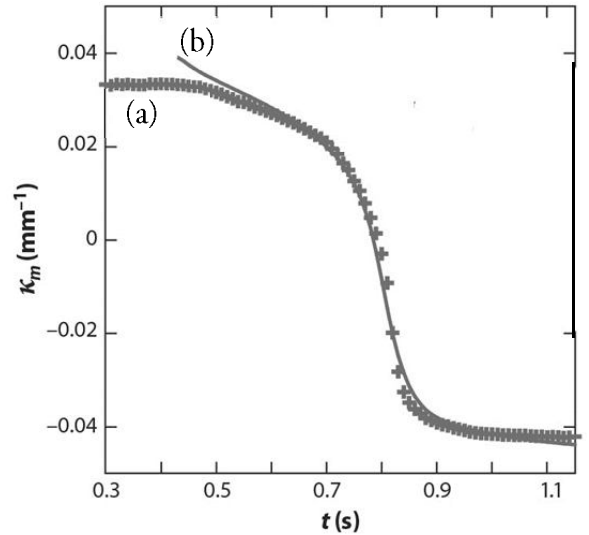


Figure 5. Courbure moyenne d'un lobe en fonction du temps :
(a) mesurée (+)
(b) théorique (trait plein)

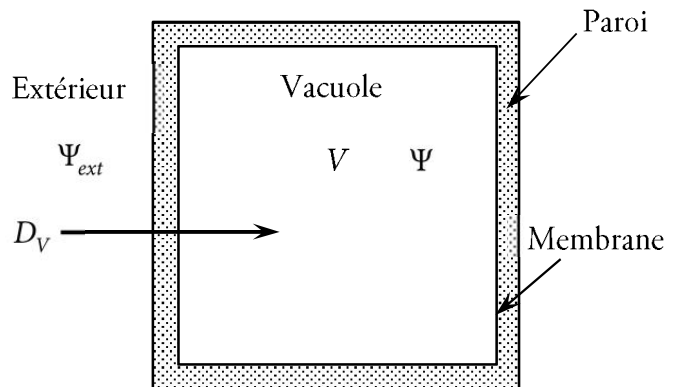


Figure 6. Modèle simplifié de cellule végétale, de volume V , de potentiel hydrique Ψ et dans laquelle entre un débit volumique D_V . Le potentiel hydrique extérieur est Ψ_{ext} .

où V_0 et Π_0 sont respectivement le volume et la pression osmotique de la cellule lorsque $P_T = 0$ et où ϵ est le module élastique de la cellule défini par $\epsilon = V dP/dV$. Les variations de volume restent faibles. On considère que Π_0 est négligeable devant ϵ .

Document 5

La pression dans les cellules de dionée a été mesurée grâce à un dispositif de sonde de pression cellulaire. Le dispositif permet aussi de mesurer le volume de la cellule, son module élastique et la perméabilité de la membrane L_p . Les mesures étant très délicates à obtenir et affectées d’une incertitude relativement grande, plusieurs mesures ont été effectuées dans les mêmes conditions. Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant (la mention NC indique que la grandeur n’a pas pu être mesurée correctement ou que la mesure n’était pas fiable).

Mesure n°	Pression (bar)	Volume (μm^3)	ϵ (Pa)	L_p ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)
1	6,75	NC	$4,14 \cdot 10^6$	$1,53 \cdot 10^{-12}$
2	4,6	NC	$2,78 \cdot 10^6$	$1,34 \cdot 10^{-12}$
3	6,55	$3,57 \cdot 10^5$	$4,56 \cdot 10^6$	$2,01 \cdot 10^{-12}$
4	4,45	NC	$5,66 \cdot 10^6$	$6,06 \cdot 10^{-13}$
5	6,22	$1,58 \cdot 10^5$	NC	NC
6	3,02	$3,47 \cdot 10^5$	$4,94 \cdot 10^6$	$1,22 \cdot 10^{-12}$
7	5,54	$1,68 \cdot 10^5$	$3,70 \cdot 10^6$	$7,86 \cdot 10^{-13}$

Document 6 : Modèle de Philip

Dans le modèle de Philip, le transport d’eau à travers un tissu végétal se fait de cellule en cellule par diffusion à travers les membranes (Figure 7). Pour passer d’une cellule i à la cellule $i+1$, l’eau doit traverser deux membranes, celle de la cellule i et celle de la cellule $i+1$. Dans le cas de la dionée, il y a environ 5 à 10 cellules dans l’épaisseur de la feuille d’un piège.

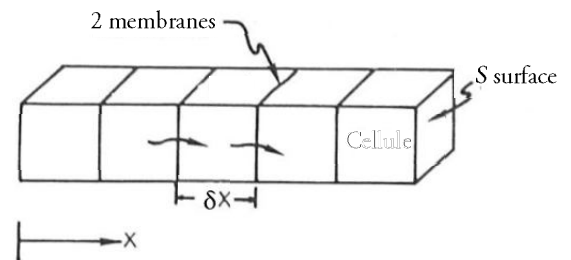


Figure 7. Schématisation du modèle de Philip d'un tissu végétal.

Le tissu est analogue à une succession de circuits RC : chaque cellule est équivalente à une capacité C. La diffusion de l’eau entre deux cellules consécutives correspond à une résistance R valant deux fois la résistance membranaire R_m . Le potentiel du nœud A de la cellule i correspond au potentiel hydrique de la cellule (Figure 8).

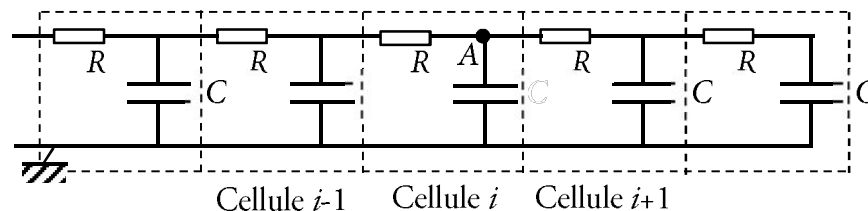


Figure 8. Schéma électrique équivalent du modèle de Philip. Chaque bloc encadré en pointillés

Document 7 : Modèle de Molz-Ikenberry

Dans le modèle de Molz-Ikenberry, le transport d’eau dans le tissu végétal se fait par deux voies parallèles : d’une part l’eau diffuse de cellule en cellule à travers les membranes comme dans le modèle de Philip. D’autre part, l’eau diffuse dans les parois des cellules (Figure 9).

Le tissu est modélisé par une succession de 5 à 10 blocs de longueur δx (un par cellule) tels que le bloc encadré en pointillés sur la Figure 10. Le potentiel électrique au nœud A de l'un des blocs correspond au potentiel hydrique de la cellule. Les résistances R_V et les capacités C_V sont égales respectivement aux résistances R et aux capacités C du modèle de Philip. La capacité C_P est estimée à environ 1% de la capacité C_V . La diffusion à travers la paroi, dont la section s (Figure 9) est égale à 10% de la section S du trajet vacolaire (de cellule en cellule), est caractérisée par une conductivité hydraulique (analogue d'une conductivité électrique)

$$\gamma = 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}.$$

Cette conductivité ne s'applique pas à la diffusion membranaire de cellule en cellule.

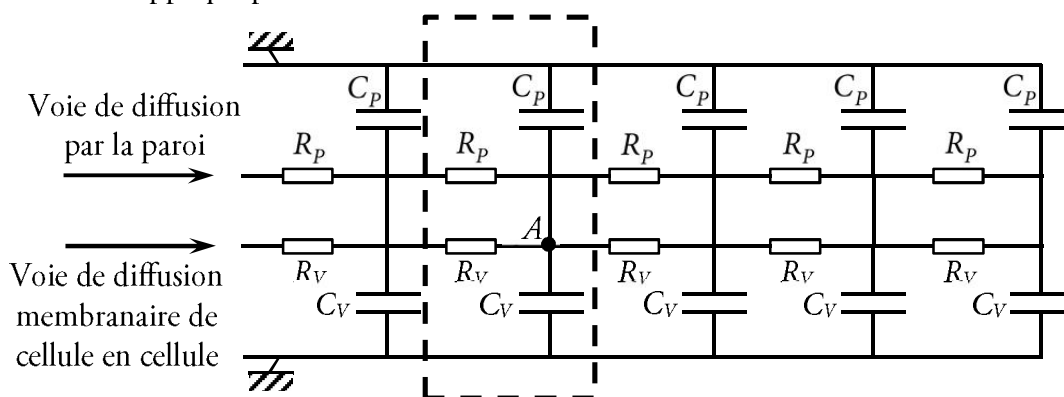


Figure 10. Schéma électrique correspondant au modèle de Molz-Ikenberry. Le tissu est modélisé par une succession de blocs tels que le bloc encadré en pointillés.

Document 8

Lorsqu'un système est modélisable par une succession de blocs RC de longueur δx (Figure 11), le phénomène global est un phénomène diffusif dont la diffusivité s'écrit

$$D = \frac{(\delta x)^2}{RC}.$$

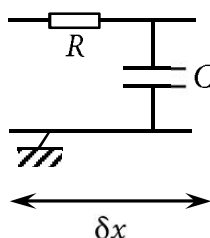


Figure 11. Bloc RC de longueur δx , s'insérant

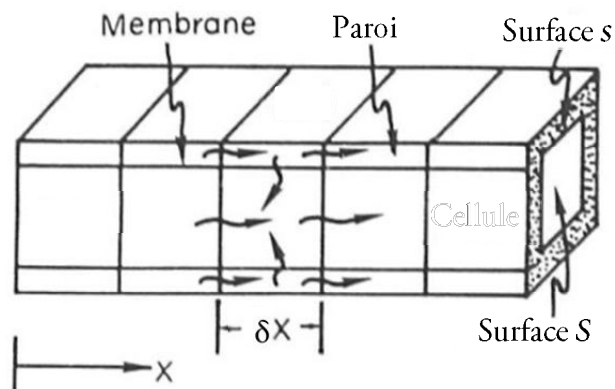


Figure 9. Tissu végétal selon le modèle de Molz-Ikenberry. Le transport de l'eau se fait dans la paroi des cellules ainsi que de cellule en cellule à travers les membranes. L'eau peut également diffuser des parois vers les vacuoles.

Questions

La résolution des questions de la partie 1 facilite l'analyse des documents dans la partie 2.

Partie 1 : Questions sur des notions du programme en lien avec le thème

1.1) Énergie potentielle

- a) On considère un système assimilable à un point matériel M de masse m , accroché à un ressort de raideur k et de longueur à vide ℓ_0 . L'autre extrémité du ressort est accrochée à un support fixe en un point O . La longueur du ressort est $\ell = OM$. L'ensemble est horizontal et posé sur un plan sur lequel M peut glisser (Figure 12). Tous les frottements sont négligés. La position de M est repérée par son abscisse x comptée à partir de la position où le ressort est au repos. À partir de l'expression de la force de rappel du ressort, établir l'expression de l'énergie potentielle élastique de M .

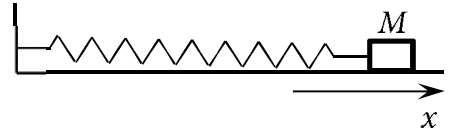


Figure 12

- b) Tracer l'allure du graphe de l'énergie potentielle élastique de M en fonction de x . En déduire les positions d'équilibre possibles et leur stabilité.
 c) Établir l'équation du mouvement à partir de l'équation mécanique.

- d) Le système précédent est maintenant remplacé par le suivant : le système assimilable à un point matériel M de masse m est astreint à glisser sans frottement sur un axe Ox horizontal. Il est accroché au même ressort mais l'autre extrémité de celui-ci est fixé en un point A situé à la verticale de O et à la distance fixe d de celui-ci (Figure 13). La longueur du ressort est $\ell = AM$. La distance d vérifie la condition $d < \ell_0$. Pour ce système, le graphe de l'énergie potentielle élastique en fonction de l'abscisse x de M est donné à la Figure 14. L'origine de l'énergie potentielle est prise lorsque le ressort est au repos. En déduire les positions d'équilibre possibles et leur stabilité.

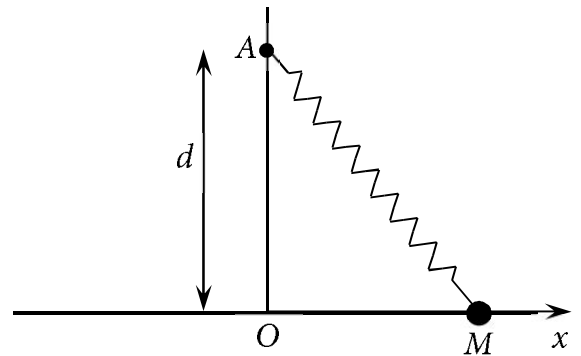


Figure 13

- e) Établir l'expression de x_0 , abscisse de M lorsque l'énergie potentielle est minimale (Figure 14).
 f) Le système étant initialement à une abscisse x_0 avec une vitesse nulle, établir l'expression de l'énergie minimale qu'il faut lui communiquer pour qu'il puisse atteindre l'abscisse $= -x_0$. On exprimera le résultat en fonction de k , d et ℓ_0 .

1.2) Potentiel hydrique

- a) On considère de l'eau dans un mélange de fraction molaire en eau x_e , à une température T et une pression P . Rappeler la définition de son état standard.
 b) Établir l'expression du potentiel chimique de l'eau pure à une température T et à une pression P , noté $\mu^*(T, P)$, en fonction du potentiel chimique standard, du volume molaire V_m de l'eau, de la pression P et de la pression standard P° .
 c) Écrire l'expression du potentiel chimique de l'eau dans un mélange idéal, à une température T , une pression P , et de fraction molaire en eau x_e en fonction du potentiel chimique standard, de V_m , T , P , x_e et P° .

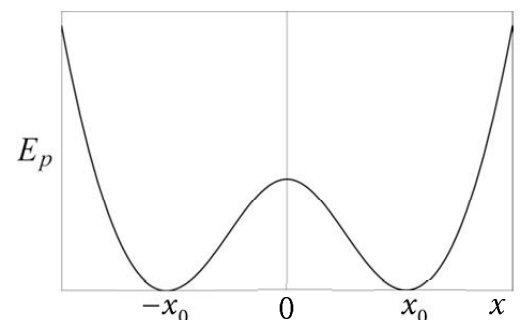


Figure 14. Énergie potentielle élastique en fonction de l'abscisse (voir texte).

- d) En déduire les expressions du potentiel hydrique et de la pression osmotique données dans les documents pour des solutions très diluées.
- e) Calculer numériquement la pression de turgescence d'une cellule végétale contenant un soluté de concentration $0,2 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, à une température de 298 K, en équilibre avec de l'eau pure à la pression standard.

1.3) Phénomènes de transport

- a) Écrire la loi d'Ohm locale.
- b) Exprimer la résistance électrique d'un conducteur filiforme de longueur ℓ , de section S et de conductivité σ (le vecteur densité de courant est uniforme).
- c) Après avoir écrit la loi de Fourier, rappeler l'analogie existant entre la conduction thermique et la conduction électrique en précisant les grandeurs analogues. On donnera la définition de la résistance thermique.
- d) Un liquide newtonien de viscosité η s'écoule dans une conduite cylindrique horizontale de longueur ℓ et de rayon a . La différence de pression entre l'entrée et la sortie étant $\Delta P = P_e - P_s$, le débit volumique en régime permanent et laminaire a pour expression (loi de Poiseuille)

$$D_V = \frac{\pi a^4}{8\eta\ell} \Delta P .$$

Définir et exprimer la résistance hydraulique de cette conduite.

- e) Exprimer le temps caractéristique τ d'un régime transitoire dans un système de longueur caractéristique L pour un phénomène diffusif de diffusivité D .

1.4) Circuit RC

- a) Le circuit RC de la Figure 15 est soumis à une tension d'entrée u_e telle que $u_e = 0$ si $t < 0$ et $u_e = E$ (constante positive) si $t \geq 0$ (échelon de tension). Établir l'équation différentielle de la réponse u_s et la résoudre pour $t > 0$.
- b) On branche une deuxième capacité de valeur C' en parallèle avec la capacité C . Déterminer la capacité unique C_{eq} qui est équivalente à l'ensemble de ces deux capacités.

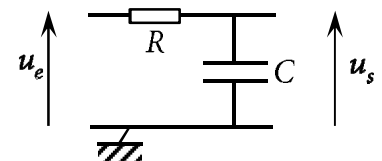


Figure 15

Partie 2 : Analyse des documents

2.1) Valeurs mesurées

Exprimer les résultats des mesures de pression dans les cellules de dionée, des mesures de volume et de module élastique de ces cellules ainsi que des mesures de perméabilité des membranes, par une valeur et une incertitude élargie. La valeur du coefficient d'élargissement de Student dépend du nombre de mesures dont on dispose : il sera pris égal à 3,18 pour les grandeurs qui ont fait l'objet de 4 mesures, à 2,57 pour les grandeurs qui ont fait l'objet de 6 mesures et à 2,45 pour les grandeurs qui ont fait l'objet de 7 mesures.

2.2) Durée des phases actives et passives

Estimer numériquement la durée de la phase active de fermeture du piège de la dionée et celle de la phase passive.

2.3) Analogie mécanique

Expliquer l'analogie entre les propriétés du système étudié à la question 1.1)d) et le mécanisme de fermeture du piège de la dionée.

2.4) Analogie électrique

- Justifier que la diffusion d'eau à travers une membrane de cellule est analogue au phénomène de conduction électrique. On précisera les grandeurs analogues du potentiel électrique, de l'intensité électrique, de la résistance électrique et de la charge électrique. On exprimera la résistance membranaire R_m d'une cellule végétale.
- Justifier que la grandeur $C = V_0/\varepsilon$ joue le rôle d'une capacité pour la cellule.

2.5) Modèle de Philip

- Exprimer la diffusivité liée au transport d'eau à travers la feuille du piège de la dionée dans le modèle de Philip.
- Estimer numériquement, en prenant comme données les valeurs mesurées par le dispositif à sonde de pression cellulaire, la durée de la phase active de fermeture du piège de la dionée dans le modèle de Philip.

2.6) Modèle de Molz-Ikenberry

- Montrer que chaque bloc du circuit équivalent au tissu végétal dans le modèle de Molz-Ikenberry peut se ramener à un circuit RC dont on exprimera la résistance équivalente et la capacité équivalente.
- Exprimer la diffusivité liée au transport d'eau à travers la feuille du piège de la dionée dans le modèle de Molz-Ikenberry.
- Estimer numériquement, en prenant comme données les valeurs mesurées par le dispositif à sonde de pression cellulaire, la durée de la phase active de fermeture du piège de la dionée dans le modèle de Molz-Ikenberry.

Partie 3 : Approche critique et prospective sur le thème

Expliquer en quoi les mesures expérimentales et les modèles présentés dans les documents permettent de tester l'une des hypothèses sur le mécanisme de la phase active de fermeture du piège de la dionée. Évaluer si les résultats obtenus confirment ou infirment cette hypothèse. Proposer une démarche expérimentale, dont on se contentera d'esquisser les grandes lignes, qui pourrait soit vérifier la conclusion précédente soit tester l'une des deux autres hypothèses. On rédigera une argumentation précise qui ne dépassera pas environ une page.

Bibliographie

- COLOMBANI, M. 2013 Mécanique du mouvement rapide de la plante carnivore dionée. Thèse de doctorat. Aix-Marseille Université.
- COLOMBANI, M., FORTERRE, Y. 2011 Biomechanics of rapid movements in plants : poroelastic measurements at the cell scale. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* **14** (Suppl. 1), 115–117.
- DUMAIS, J., FORTERRE, Y. 2012 "Vegetable Dynamicks": The Role of Water in Plant Movements. *Annual Rev. of Fluid Mech.* **44**, 453–478.
- FORTERRE, Y. 2013 Slow, fast and furious : understanding the physics of plant movements. *Journal of Experimental Botany* **64** (15), 4745–4760.
- FORTERRE, Y., SKOTHEIM, J. M., DUMAIS, J. MAHADEVAN, L. 2005 How the Venus flytrap snaps. *Nature* **433**, 421–425.
- HODICK, D., SIEVERS, A. 1989 On the mechanism of trap closure of Venus flytrap (*Dionaea muscipula* Ellis). *Planta* **179**, 32–42.
- MOLZ, F. J. 1976 Water Transport Through Plant Tissue : the Apoplasm and Symplasm Pathways. *Journal of Theoretical Biology* **59**, 277–292.
- MOLZ, F. J., FERRIER, J. M. 1982 Mathematical treatment of water movement in plant cells and tissue : a review. *Plant, Cell Environ.* **5**, 191–206.
- MOLZ, F. J., IKENBERRY, E. 1974 Water transport through plant cells and cell walls : theoretical development. *Soil Science Society of America Journal* **38**, 699–704.
- POPPINGA, S., HARTMEYER, S. R. H., MASSELTHER, T., HARTMEYER, I., SPECK, T. 2013 Trap diversity and evolution in the family Droseraceae. *Plant Signaling & Behavior* **8** (7), e24685-1–e24685-5.
- POPPINGA, S., MASSELTHER, T., SPECK, T. 2013 Faster than their prey : New insights into the rapid movements of active carnivorous plants traps. *Bioessays* **35**, 649–657.
- SKOTHEIM, J. M., MAHADEVAN, L.. 2005 Physical Limits and Design Principles for Plant and Fungal Movements. *Science* **308**, 1308–1310.