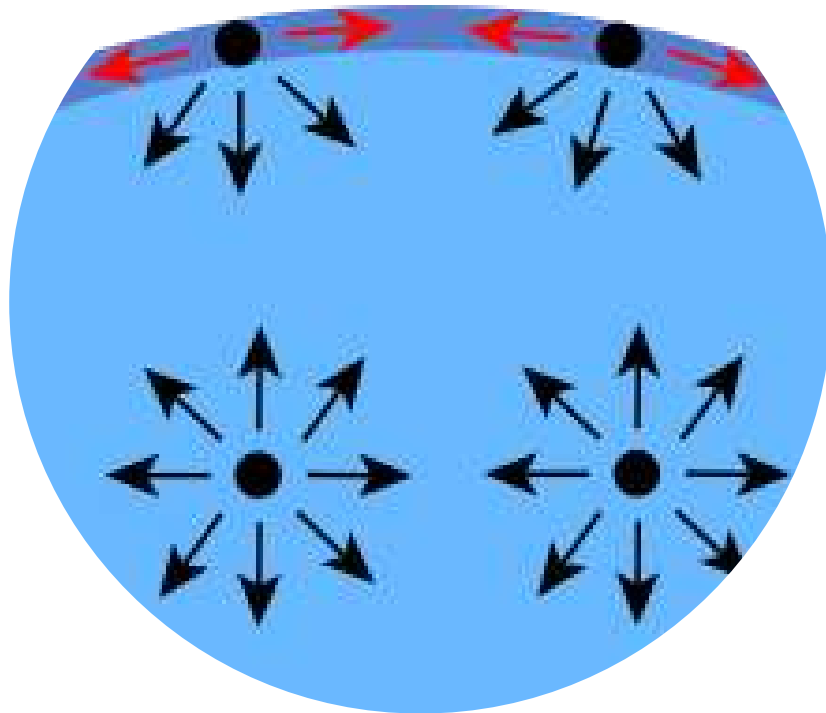


# Biophysique



## SCIENCES DE LA VIE



### Shop



- Cahiers de Biologie + Lexique
- Accessoires de Biologie



### Etudier



Visiter [Biologie Maroc](http://Biologie Maroc) pour étudier et passer des QUIZ et QCM en ligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.



### Emploi



- CV • Lettres de motivation • Demandes...
- Offres d'emploi
- Offres de stage & PFE

# M19: Biophysique

Université Abdelmalek Essaadi  
Faculté des Sciences de Tétouan  
Département de Biologie

N° d'ordre du module : M19

## MODULE DE

<sup>83</sup> <b>Bi</b> Bismuth	<sup>8</sup> <b>O</b> Oxygen	<sup>15</sup> <b>P</b> Phosphorus	<sup>1</sup> <b>H</b> Hydrogen	<sup>39</sup> <b>Y</b> Yttrium	<sup>14</sup> <b>Si</b> Silicon	<sup>122</sup> <b>Q</b> Quadium	<sup>92</sup> <b>U</b> Uranium	<sup>125</sup> <b>E</b> Etherium
---------------------------------------	------------------------------------	---	--------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	--



**Semestre S3**

Année universitaire 2021/2022

Interdit à la vente

Enseignant :

Pr. Khouzaima El Biari

# M19: Biophysique

INTRODUCCION .....	2
Aperçu historique.....	2
Définition de la Biophysique .....	8
<b>Partie I:</b> Interactions des ondes et des particules avec la matière biologique.....	12
1. Rappels du spectre électromagnétique.....	12
1.1. Rayonnements ionisants .....	14
1.2. Rayonnements non ionisants.....	16
2. Interaction de la lumière avec la matière biologique.....	18
2.1. La luminescence .....	18
2.2. Effets des rayonnements UV, visible et infrarouge.....	22
3. Étude de la fluorescence des molécules biologiques .....	29
3.1. Fluorescence intrinsèque naturelle.....	29
3.2. Fluorescence externe .....	33
<b>Partie II:</b> Les électrolytes en milieu biologique et les phénomènes de surfaces	37
<b>Chapitre I :</b> Les solutions bio-electrolytiques .....	37
1- Les électrolytes .....	37
2- Importance biologique des électrolytes .....	38
3- Propriétés des électrolytes .....	39
3-1 La concentration ionique .....	39
3-2 La concentration équivalente.....	39
3.3- Mobilité des ions .....	40
3.4- Le flux ionique ou électrique.....	41
3.5- La densité de courant.....	41
3.6- Le courant macroscopique.....	41
3.7- Le Coefficient de diffusion.....	42
3.8- La résistance et la résistivité.....	42
3.9- La Conductance et la conductivité électrique .....	43
3.10- Osmose et osmolarité .....	44
3.11- Abaissement cryoscopique .....	48
<b>Chapitre II :</b> Etudes des interfaces .....	51
1-Interface liquide-gaz : .....	52
1.1- Mise en évidence des interfaces liquides-gaz .....	52
1.2- Dissolution des gaz.....	55
2- Interface liquide-solide : .....	67
2.1- Énergie d'adhésion d'un liquide sur un solide.....	67
2.2- Capillarité : loi de Jurin .....	71
2.3- Mesure de la tension superficielle d'un liquide .....	73
2.4- Écoulement des fluides.....	79
2.4-1- Écoulement d'un liquide idéal .....	79
2.4.2- Écoulement d'un liquide réel .....	84
2.4.3.-Hémodynamique .....	93

# M19: Biophysique

## INTRODUCCION

### Aperçu historique

Les êtres humains ont toujours essayé de trouver une explication de la complexité de la matière qui nous entoure. Au début, ils ont pensé que les éléments de toutes les matières se résument dans le feu, l'air et la terre jusqu'à l'arrivée de l'ancien savant et philosophe grec **Democrite** qui a développé la **théorie atomique de l'univers**. D'ailleurs le terme « atome » est dérivé du mot grec atomos, qui signifie « ce qui ne peut être divisé ». Democrite a défini les atomes comme suit :

- Les atomes sont éternels, invisibles, homogènes, et incompressibles
- Les atomes se différencient juste en forme et en taille, mais les qualités internes restent les mêmes.
- Les propriétés de la matière varient selon le regroupement des atomes

Cette théorie, comme toutes les **théories philosophiques grecques**, ne s'appuie pas sur des expériences pratiques, mais elle est expliquée tout simplement par le **raisonnement logique**.

A l'origine, la connaissance de la nature était en grande partie l'observation et l'interrelation de toutes les expériences, sans établir les divisions. **Les Érudits pythagoriciens** ont distingués quatre sciences: **l'arithmétique, la géométrie, la musique et l'astronomie**.

A l'époque du philosophe grec **Aristote** (384-322 a.C) d'autres domaines ont été déjà reconnus ; **La mécanique, l'optique, la physique, la météorologie, la zoologie et la botanique**

La civilisation Grecque disparaît, les bibliothèques demeurent.

## M19: Biophysique

Dans leurs conquêtes, les arabes récupèrent les ouvrages grecs et les traduisent, il héritent des savoirs antiques, les approfondissent et innove.

**Ibn al Haitam** avec d'autres savants qui symbolisent une science arabe à son apogée au moyen age vers les années 1000, arrivent à établir **une science nouvelle**, basée sur **l'observation, l'expérimentation, la mesure**. Ces livres sont traduits en latin et circulent en europe

Avec le développement de la mécanique par le physicien et astronome italien **Galileo Galilei** (1564-1642) et le physicien britannique **Isaac Newton** (1642-1727), la bifurcation entre la médecine et la physique commence.

Au début de la seconde moitié du XVIIe siècle, il a été imposé un système qui fait la distinction entre la science fondamentale et clinique. Selon ce système, les sciences fondamentales contribuent à former les connaissances qui seront ensuite utilisées dans la formation clinique et la pratique médicale. A cette époque, le même individu a été engagé dans des études de la mécanique, de la physique et de la médecine. Par conséquent aujourd'hui on trouve encore dans la langue anglaise la même racine dans le mot utilisé pour désigner les professionnels médicaux et de la physique: *physicians* y *physicists*, respectivement.

La médecine et la physique ont eu un tronc commun à travers l'histoire, il existe de nombreux exemples d'interactions entre les deux sciences, parmi lesquelles on peut citer: **Galileo** (1564-1642), fondateur de la physique expérimentale qui, à son jeune age, était un étudiant de médecine; avec le philosophe **de Padoue** (1561-1636), qui ont inventé presque simultanément un **thermomètre**, un instrument qui avait une de ses premières utilisations en médecine pour déterminer l'état fébrile chez les patients.

Par la suite vient le père de la microbiologie **Anton van Leeuwenhoek** (≈1670) un physicien néerlandais qui a développé le premier microscope

## M19: Biophysique

optique à haute résolution avec une seule lentille, créent ainsi un outil unique pour la biologie, avec lequel il a arrivé à observer les cellules vivantes pour la première fois.

Au XVII<sup>e</sup> siècle, **Robert Hooke** (1635-1703) un scientifique anglais, introduit dans le vocabulaire biologique le concept de la cellule; A cette époque, le médecin anglais **William Harvey** (1578-1657) a mené les premières expériences d'études de flux sanguins, des études qui ont été poursuivies par le philosophe français **Jean Louis Marie Poiseuille** (1799-1869) au XIX<sup>e</sup> siècle.

Le physiologiste Italien **Luigi Galvani** (1737-1798) découvre la relation entre les contractions musculaires des grenouilles et les chocs électriques, une étape très importante dans l'étude de phénomènes électriques.

Le médecin allemand **Julius Robert von Mayer** (1814-1878) fut le premier à énoncer une des lois les plus générales de la nature, la loi de conservation de l'énergie. **Maxwell** (1831-1879) et **Helmholtz** (1821-1894) ont développé la théorie physique de la vision des trois couleurs, confirmée par la mesure de l'absorption de la lumière par différents cônes des yeux.

La découverte des **rayons X** par **Wilhelm Cornard Roentgen** (1845-1923) en 1895 et de la **radioactivité** par **Antoine Henri Becquerel** (1852-1908) l'année suivante, sont deux faits qui ont contribué à des changements importants dans la relation entre la physique et la médecine, et qui sont à la base de la détermination des traits spécifiques dans le développement atteint par la science médicale actuelle.

Il constate alors que ces rayons, jusqu'alors inconnus et qu'il baptise pour cette raison rayons "X", sont si pénétrants qu'ils sont capables non seulement de traverser l'air mais aussi le verre, le papier, le bois. Roentgen réalise une

## M19: Biophysique

expérience, il place sa propre main entre le tube et l'écran. Il voit alors distinctement l'ombre et aperçoit également celle, plus claire, de ses os.

A cette époque, ces expériences ont offert aux médecins une méthode avec laquelle ils rêvaient depuis longtemps: comment réaliser des études de l'anatomie sur les êtres vivants et non seulement sur les cadavres.

L'application du tube à rayons X de l'ingénieur physicien américain **William David Coolidge** (1873-1975) a permis d'avoir des faisceaux plus intenses de rayons X et introduire une utilisation plus efficace dans la pratique clinique quotidienne. La découverte a contribué à des progrès majeurs pour la spécialité médicale alors naissante, « **la radiologie** », et sa conception de base qui est toujours utilisée.

Le développement des théories de la physique atomique et nucléaire, ainsi que des méthodes de purification des substances radioactives et l'obtention de radioisotopes, a donné lieu à leur utilisation dans le diagnostic clinique à la fin des années 20, dont l'un des ces premières applications a été l'utilisation de l'**iode radioactif I-131** dans le diagnostic de l'**hyperthyroïdie**. Ainsi, elle est née **la médecine nucléaire** qui combine harmoniquement le système de connaissances des deux sciences qui, à première vue semblent très différentes.

L'interaction continue entre la science médicale et la science physique et contribue à l'émergence d'une nouvelle discipline scientifique, **la physique-médicale** qui traite de l'application des concepts et des méthodes de physique en médecine ou sciences de la santé.

La physique a réussi à ouvrir plusieurs portes à la science médicale par la fourniture de techniques comme **le diagnostic par l'imagerie, la médecine nucléaire** ou **l'utilisation du magnétisme**, ce qui a contribué sans

## M19: Biophysique

aucun doute à des améliorations significatives dans la prévention, le diagnostic et le traitement des maladies.

**Les Physiciens qui travaillent dans le domaine de la médecine, travaillent dans l'analyse des images, la radiothérapie, le développement des techniques et instruments, dans l'enseignement universitaire et, bien sûr, dans la recherche visant la protection de la santé.**

L'importance de la physique en médecine se reflète par des **Prix Nobel** en médecine et en physiologie accordées à des professionnels non médicaux en raison de l'importance des résultats de leur recherche dans ce domaine, c'est le meilleur exemple qui montre l'interaction actuelle des sciences médicales avec les sciences physiques et sciences appliquées.

- ❖ **Maurice Wilkins**, un biophysicien britannique, partage le prix Nobel de physiologie et de la médecine en 1962 avec **Watson et Crick**. C'est son travail, ainsi que celui de sa collègue **Rosalind Elsie Franklin** qui conduisit **James Dewey Watson** et **Francis Crick** à proposer la structure moléculaire de l'acide désoxyribonucléique (ADN) par des techniques de diffraction des rayons X en 1953.
- ❖ **Alan Lloyd Hodgkin**, biophysicien britannique qui a partagé le prix Nobel de physiologie et de médecine en 1963 avec **Andrew F.** en formulant des équations mathématiques exprimant les phénomènes électriques accompagnant la décharge d'une cellule nerveuse ou neuronale.
- ❖ **Max Delbruck** un biophysicien germano-américain, un physicien de l'Université de Göttingen, ces études, avec lequel il a remporté



## M19: Biophysique

le prix Nobel de physiologie et de médecine en 1969, portait sur les bactériophages.

- ❖ **Allan M. Cromack** de Johannesburg (Afrique du Sud), a étudié la génie électronique et la physique. Il a obtenu le prix Nobel de physiologie et de médecine en 1979 partagé avec **Mawbold Godfrey Hounsfield** par la découverte et le développement de la tomographie assistée par ordinateur.
- ❖ **Erwin Neher**, de nationalité allemande. Biophysicien qui a partagé le prix Nobel de physiologie et de médecine en 1991 avec **Bert Sakmann** pour ses études sur les canaux ioniques dans la membrane cellulaire
- ❖ **Peter Mansfield**, physicien britannique, reçoit le prix Nobel de physiologie ou médecine 2003 pour la découverte et le développement de l'imagerie par la résonance magnétique nucléaire, partagé avec **Paul Christian Lauterbur**.

Ces éléments de preuve montrent clairement le niveau de chevauchement entre les sciences et que l'intérêt des physiciens en biologie et science biomédicale n'est pas récente. Cela doit encourager les médecins et les professionnelles de la biologie pour entamer une meilleure demande d'alphabétisation dans les connaissances de la physique, de dépasser les limites et les barrières disciplinaires et essayer de faire l'effort de comprendre les arguments des autres disciplines.

## M19: Biophysique

### Définition de la Biophysique

#### *C'est quoi la biophysique?*

Biophysique c'est la science qui étudie la biologie avec les principes et méthodes de la physique.

La Biologie, fait l'étude de la complexité de la vie avec ces différentes variables, elle fait la description des habitudes de l'alimentation, de communication inter et intra, la relation avec le milieu et la reproduction.

Dans un autre coté, la science physique focalise son attention surtout dans la découverte des lois mathématiques de la nature et fait la prédiction précise des forces qui conduisent les processus dans les **systèmes idéales**.

Cette conception implique donc un enrichissement de la biologie descriptive, macroscopique et morphologique avec des apports quantitatifs, prédictifs et généralisateurs qui vont réduire la distance entre la simplicité des systèmes idéals de la physique classique et la complexité des êtres vivants.

La Biophysique est plus qu'une voie reliant la frontière entre les deux disciplines (Biologie et physique), mais c'est plutôt un amalgame de la physique, de chimie et de la biologie. C'est à dire une science qui dépasse les formules et les modèles élaborés pour les systèmes simple pour décrire à l'échelle moléculaire les processus de transformations complexes dans les systèmes multi composants auto-organisés.

Ainsi, la biophysique n'est pas une branche de la physique ou de la biologie, comme une sous-matière de ces dernières. Par contre, il s'agit d'une discipline autonome, qui englobe meme les phénomènes chimiques dans les systèmes biologique.

## M19: Biophysique

En introduisant des processus chimiques pour comprendre intégralement les processus biologiques, cette discipline devrait être plus correctement décrite comme **Biophysicochimique**, Bien que pour simplifier la nomenclature nous continuons de l'appeler Biophysique

### Qu'est-ce qu'elle fait?

La Biophysique c'est la science qui permet que les approches et les connaissances acquises en physique « pure » peuvent être appliquées à l'étude des systèmes biologiques.

### Qu'est-ce qu'elle apporte?

De nos jours, les apports de la biophysique complètent et alimentent les études et les **phénomènes macroscopiques** à travers la thermodynamique, la cinétique, la photochimie et l'électrochimie et les **phénomènes microscopiques** à travers la détermination de la structure moléculaire, de micro et nano ensembles, la compréhension des mécanismes chimiques de transport de matière, charge et énergie.

Pour cette raison, aujourd'hui c'est la branche de la science qui arrive à résoudre et répondre de plus en plus aux problèmes caractérisés par une multitude de variables, structures et conditions.

Dans ce cas, la Biophysique apporte des connaissances à la biologie mais pas à la physique, cependant, elle offre des preuves expérimentales pour corroborer les lois et les théories physiques dans différents domaines tel que:

- La réception des signaux externes par l'organisme
- La transmission de l'influx nerveux
- Les Processus bio-mécanique de l'équilibre
- Le déplacement du corps humain (biomécanique)

## M19: Biophysique

- L'optique géométrique de l'oeil
- La transmission du son à l'oreille interne et le cerveau (bioacoustique)
- La mécanique de la circulation sanguine
- Respiration pulmonaire
- Les processus d'alimentation et de maintien énergétique de l'organisme
- Le mécanisme d'action des molécules biologiquement fonctionnelles sur les structures cellulaires (Enzymes, ADN, des organites bioénergétiques)
- Les systèmes mécano-chimiques
- Modèles physico-mathématiques des processus biologiques

D'autre part, la mise en place des bases biophysiques dans les phénomènes mentionés ci-dessus est essentielle pour le développement des dispositifs techniques, des appareils et des compteurs pour l'obtention de la bio-information, des équipements de l'autometrie et de télémetrie; qui permettent un diagnostic médical plus efficace et plus fiable.

Actuellement, le développement de la médecine dépend en grande partie de sa capacité technologique, qui est déterminée par le développement des connaissances biophysiques et des supports bioénergétiques.

## M19: Biophysique

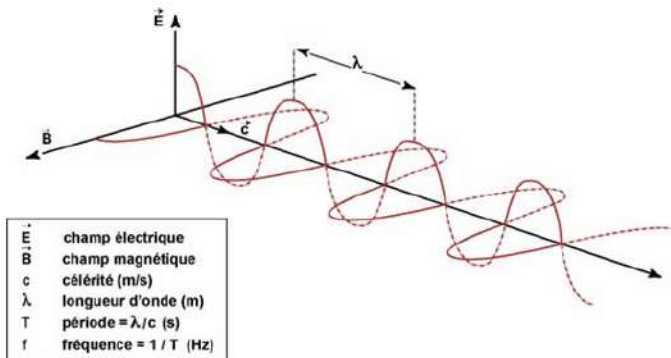
# Partie I: Interactions des ondes et des particules avec la matière biologique.

## 1. Rappels du spectre électromagnétique.

La notion d'onde électromagnétique est une conséquence de l'unification de l'électricité et du magnétisme élaboré par James Clerk Maxwell en 1877. Ce dernier fut le premier à énoncer les quatre équations différentielles qui décrivent la propagation d'ondes électromagnétiques. L'existence de telles ondes fut confirmée expérimentalement par Heinrich Hertz en 1887.

De la théorie de Maxwell, il résulte qu'une onde électromagnétique est la propagation (dans un milieu matériel ou dans le vide) d'un champ électrique et d'un champ magnétique associés, perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation.

Dans le vide, ces deux champs indissociables l'un de l'autre se déplacent à la célérité  $c = 3 \times 10^8$  m/s, la vitesse de la lumière dans le vide.



Nature et propagation d'une onde électromagnétique

## M19: Biophysique

Une radiation électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques:

La longueur d'onde ( $\lambda$ ): elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace. C'est la distance d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives. Elle est mesurée en nanomètres (nm).

- La période (T) : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde.
- La fréquence ( $\nu$ ): inverse de la période, elle traduit le nombre de cycles par unité de temps. Elle s'exprime en Hertz (Hz).

La longueur d'onde et la fréquence sont inversement proportionnelles et unies par la relation suivante:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Où

- $\lambda$  : longueur d'onde de l'onde électromagnétique
- $c$  : vitesse de la lumière ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )
- $\nu$  : la fréquence de l'onde

Les échanges d'énergie portée par le rayonnement électromagnétique se font sous forme de paquets d'énergie, véhiculés par des corpuscules élémentaires immatériels, les photons. Chaque photon transporte ainsi un quantum d'énergie proportionnel à la fréquence de l'onde électromagnétique considérée; cette énergie est d'autant plus grande que la fréquence est élevée.

## M19: Biophysique

**Relation de Planck:** Elle exprime la quantité d'énergie associée à un photon en fonction de la fréquence de l'onde.

$$E = h\nu$$

Où:

- $E$  : l'énergie de l'onde électromagnétique
- $\nu$  : la fréquence de l'onde
- $h$  : la constante de Planck ( $6,625 \cdot 10^{-34}$  J.s)

### 1.1. Rayonnements ionisants

Par convention, le seuil d'ionisation de 13.6 eV permet de classer les radiations électromagnétiques en deux catégories principales.

Les photons d'énergie supérieure à ce seuil sont qualifiés de rayonnements ionisants. Ceux de moindre énergie sont qualifiés de rayonnements non ionisants.

Cette distinction est essentielle, car elle permet de différencier les photons non ionisants de ceux, ionisants, susceptibles de briser des liaisons covalentes, donc de dénaturer des molécules biologiques et d'entraîner des pathologies variées. Lorsque la rupture de liaison se fait sur une molécule porteuse d'information comme une molécule d'ADN, elle peut, dans certaines situations, occasionner des erreurs non réparées au sein du génome, erreurs pouvant être à l'origine de pathologies cancéreuses ou de mutations. Une seule particule, ou un seul photon est suffisant pour ioniser un atome au sein d'une molécule.

Une radiation sera donc considérée comme ionisante dès qu'elle implique des photons d'énergie supérieure au seuil, soit encore dès que la fréquence de



## M19: Biophysique

L'onde électromagnétique dépasse  $3 \times 10^6 \text{ GHz}$  ou que sa longueur d'onde est inférieure à une centaine de nanomètres environ.

Le caractère ionisant concerne, par ordre d'énergie décroissante, les rayonnements  $X$  et  $\gamma$  et les rayonnements ultraviolets.

### *a) Rayonnements $X$ et $\gamma$*

Ils présentent des énergies très variables qui s'étendent de la centaine d'électronvolts à des valeurs dépassant le million d'électronvolts.

- Les rayonnements  $X$  sont utilisés en radiothérapie transcutanée, lorsque le tissu à irradier n'est pas superficiel. En imagerie radiologique, ils permettent d'obtenir des images de la densité des tissus traversés. Les rayons  $X$  ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième ( $10^{-12}$  m) et un cent millième ( $10^{-8}$  m) de millimètre.
- Les isotopes émetteurs de rayonnements  $\gamma$  sont mis à profit lors d'examens scintigraphiques destinés à produire une image du fonctionnement d'un organe. Dans certains centres très spécialisés en radiochirurgie, des rayonnements  $\gamma$  externes sont utilisés pour le traitement radiothérapique de tumeurs cérébrales ou malformations artérioveineuses inopérables (gamma knife). Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième ( $10^{-14}$  m) à un milliardième ( $10^{-12}$  m) de millimètre.

## M19: Biophysique

### *b) Rayonnements ultraviolets:*

Les rayonnements ultraviolets chevauchent la limite entre rayonnements ionisants et non ionisants. Il s'agit de photons d'énergies comprises entre 3eV et 124eV. Ils sont utilisés par exemple en dermatologie (traitement du psoriasis), mais peuvent aussi être pathogènes (cancers cutanés).

Heureusement pour nous, la grande partie des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules. Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millièmètre ( $10^{-8}$  m) à quatre dixièmes de millièmètre ( $4 \cdot 10^{-7}$  m) de millièmètre.

Les rayons UV sont subdivisés en trois régions distinctes en fonction de leurs propriétés d'absorption et des mécanismes d'interaction biologique. Il s'agit des **rayons ultraviolets C** (UVC) (100 à 280 nm), des **UVB** (280 à 315 nm) et des **UVA** (315 à 400 nm).

Les rayons UV sont essentiels à la vie sur terre. Ils participent notamment à la photosynthèse chez les plantes ainsi qu'à la production de vitamine D chez l'humain. Cependant, les rayons UV ont aussi des effets délétères comme le cancer de la peau.

### **1.2. Rayonnements non ionisants**

Les rayonnements non ionisants recouvrent une gamme étendue de rayonnements électromagnétiques qui vont de l'ultraviolet proche aux ondes hertziennes, en passant par le visible, les infrarouges et les microondes.

#### *a) Rayonnements visibles (pour un être humain)*

Ce sont des photons de 1 à 3 eV environ. Chaque longueur d'onde est associée par le cerveau humain à une couleur donnée du spectre visible, du

## M19: Biophysique

bleu au rouge en passant par le vert, le jaune et l'orange, suivant l'ordre observable dans un arc-en-ciel. Il s'étend de (400 nm) - lumière bleue - à (800 nm) - lumière rouge.

### *b) Rayonnements infrarouges*

Ils s'étalent de la limite supérieure des longueurs d'onde visibles, soit 760 nm (couleur rouge), jusqu'à quelques millimètres. Il est testé en diagnostic pour détecter une augmentation locale de chaleur pouvant orienter vers une pathologie tumorale (thermographie infrarouge), et en thérapeutique pour donner un effet thermique anti-inflammatoire. La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millièème de millimètre ( $8 \cdot 10^{-7}$  m) à un millimètre ( $10^{-3}$  m). On distingue généralement quatre types d'infrarouges qui vont du **proche infrarouge** à l'**infrarouge lointain**, en passant par l'**infrarouge moyen** et le **thermique**.

### *c) Rayonnements microondes*

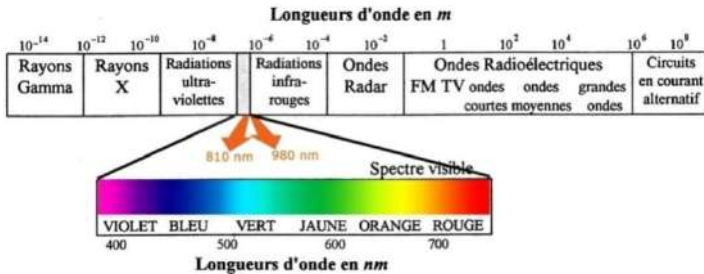
Ils correspondent à des longueurs d'onde évoluant entre quelques millimètres et un mètre. Lorsqu'ils traversent un matériau, ces rayonnements peuvent transférer une partie de ses énergies par effet Joule et provoquer ainsi un échauffement rapide qui dépend de la nature du matériau où a lieu la dissipation de l'énergie. Dans le domaine médical, le rayonnement microonde fait l'objet d'études en thermographie.

### *d) Rayonnements hertziens:*

Ce sont des rayonnements de longueurs d'onde qui peuvent varier du mètre au kilomètre et constituent le domaine des ondes radio (radiophonie, télévision, téléphonie, etc.). Ils sont utilisés pour transmettre des informations sur de longues distances. L'énergie des photons qui les

## M19: Biophysique

constituent est très largement insuffisante ( $E < 1 \mu\text{eV}$ ) pour provoquer la moindre pathologie secondaire à un phénomène d'ionisation. Dans la pratique médicale courante, elles sont utilisées pour les études de résonance magnétique nucléaire, tant en imagerie qu'en spectroscopie.



## 2. Interaction de la lumière avec la matière biologique

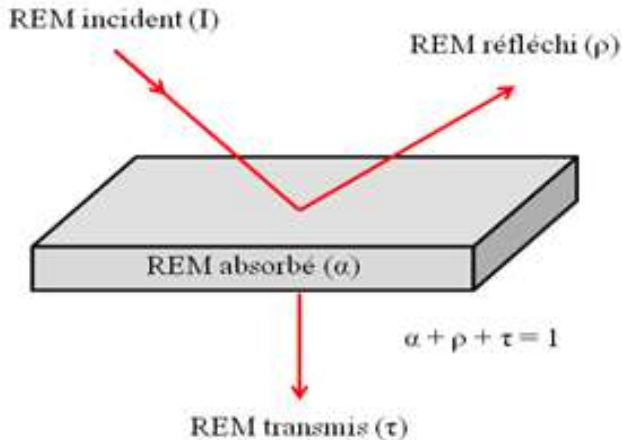
### 2.1. La luminescence

La luminescence est la propriété qu'ont certaines substances de restituer sous forme de photons d'énergie  $E = h\nu$  d'origine non thermique (c'est-à-dire que l'on ne considère pas l'incandescence comme un phénomène de luminescence) une partie de l'énergie absorbée au cours d'une excitation de type divers. Il s'agit donc de la désactivation d'une molécule excitée vers un état énergétique moins élevé.

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint un objet, certaines longueurs d'onde sont absorbées tandis que d'autres sont réfléchies par l'objet. Une partie du rayonnement peut éventuellement être transmise à travers l'objet si celui-ci est plus ou moins transparent, avec un changement de direction de la propagation dû à la réfraction. La partie du rayonnement

## M19: Biophysique

qui est absorbée modifie l'énergie interne de l'objet et produit de la chaleur qui sera réémise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde.



REM = rayonnement électromagnétique

Tous les objets sont ainsi caractérisés par un **coefficient d'absorption** (noté-  $\alpha$ ), un **coefficient de réflexion** (noté  $\rho$ ), et un **coefficient de transmission** (noté  $\tau$ ), qui expriment respectivement la part d'énergie absorbée, réfléchi et transmise. Ces trois coefficients ont des valeurs qui varient entre 0 et 1 et leur somme est toujours égale à 1, selon le principe de la conservation de l'énergie.

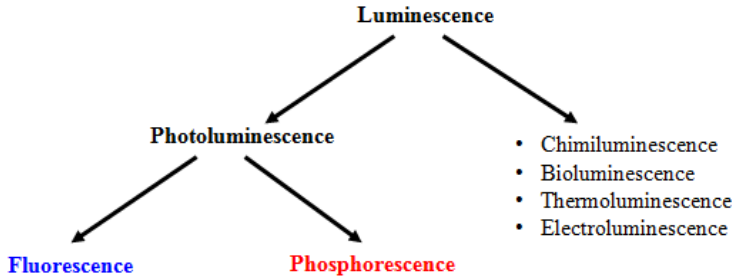
- Un corps totalement opaque ne transmet pas le rayonnement, qui est en partie absorbé et en partie réfléchi.

$$\tau = 0 \quad \Longrightarrow \quad \alpha + \rho = 1$$

## M19: Biophysique

- Un corps parfaitement transparent ne réfléchit pas le rayonnement, mais en absorbe et en transmet une partie.

$$\rho = 0 \quad \Longrightarrow \quad \alpha + \tau = 1$$



**La photoluminescence:** est un phénomène radiatif consécutif à une excitation lumineuse (photons de lumière infrarouge, infrarouge ou ultraviolette).

**La chimiluminescence:** est un phénomène radiatif consécutif à une réaction chimique (chimiluminescence) ou enzymatique (bioluminescence).

**La thermoluminescence :** est un phénomène physique qui se traduit par la propriété qu'ont certains cristaux d'émettre de la lumière lorsqu'on les chauffe.

## M19: Biophysique

**L'électroluminescence:** est un phénomène optique et électrique durant lequel un matériau émet de la lumière en réponse à un courant électrique.

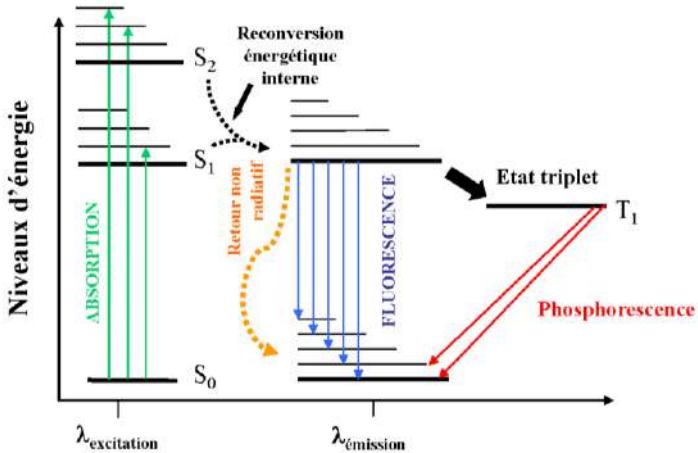


Diagramme de Jablonski

Le diagramme de Jablonski schématise l'ensemble du processus d'excitation et de désactivation.

Selon le spin, on distingue 2 états excités caractérisés d'énergie et de nature différente: l'état **Singulet** instable (**S**) et l'état **Triplet** métastable (**T**).

Par définition, une molécule à l'état fondamental "singulet" est dite stable avec un spin global nul. Après absorption d'un photon de longueur d'onde suffisamment énergétique, la molécule accède à un état énergétique supérieur "excité". Les niveaux d'énergie atteints étant par nature instables, la durée de vie d'un électron sur un tel niveau est de l'ordre de quelques nanosecondes. La molécule "excitée" devient alors le siège d'une série de

## M19: Biophysique

réactions dont les manifestations sont diverses, jusqu'à son retour à l'état stable. Deux types de processus photophysiques permettent à la molécule excitée de dissiper son énergie excédentaire :

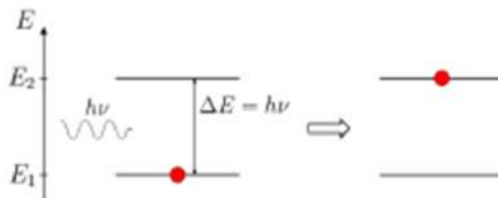
Les processus de désactivation **non radiative** et les processus de désactivation **radiative** ou **luminescence**.

- Si l'émission radiative se produit entre deux états de même multiplicité (singlet excité – singlet fondamental), le phénomène est appelé **fluorescence**.
- Si l'émission se produit entre deux états de multiplicité différente (Triplet – singlet fondamental), le phénomène est appelé **phosphorescence**.

### 2.2. Effets des rayonnements UV, visible et infrarouge

#### a) Définition

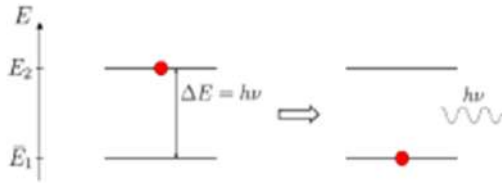
Pour qu'un électron change de niveau d'énergie (passage à un niveau supérieur), il doit recevoir une certaine quantité d'énergie  $\Delta E = h\nu$ , qui correspond à l'**absorption d'un photon** :



En revanche, si l'électron « retombe » sur un niveau d'énergie inférieur, c'est qu'il a libéré cette même quantité d'énergie  $\Delta E = h\nu$ , par **émission d'un photon**.



## M19: Biophysique

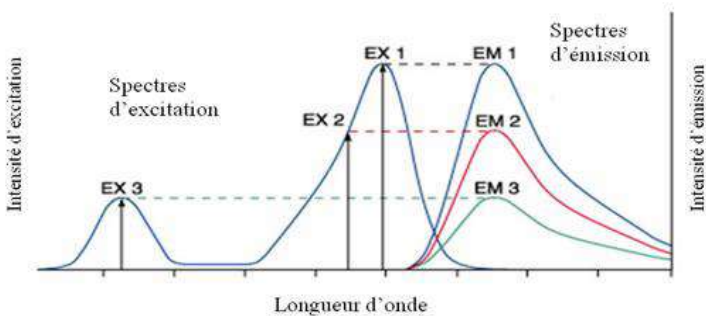


La relation entre l'énergie d'un photon  $E$  et sa longueur d'onde  $\lambda$  est donnée par la relation suivante:

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Un fluophore possède plusieurs niveaux excités, il peut absorber des photons de différentes longueurs d'onde:

Ce qui permet d'obtenir un Spectre d'absorption propre à chaque fluophore. Les photons qui sont émis par un fluorophore au cours de sa désexcitation n'ont pas tous la même énergie et donc pas la même longueur d'onde, par conséquent, le Spectre de fluorescence sera caractéristique pour chaque fluophore.



## M19: Biophysique

- L'excitation d'un fluorophore à 3 longueurs d'onde ne change pas le profil d'émission correspondant
- L'intensité d'émission est proportionnelle à l'intensité de l'excitation

### Déplacement de Stokes

La perte d'énergie entre les photons absorbés et les photons émis (conséquence des relaxations vibrationnelles qui s'opèrent au niveau de l'état excité), est responsable du décalage du spectre d'émission d'un fluorophore vers de plus grandes longueurs d'onde par rapport à son spectre d'absorption. C'est ce que l'on appelle le **déplacement de Stokes**.

$$\Delta\nu = \nu_a - \nu_f$$

$\lambda_a$  est la longueur d'onde d'absorption maximale

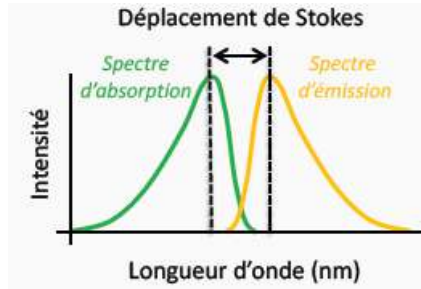
$\lambda_f$  est la longueur d'onde d'émission maximale

$$\nu_a = \frac{c}{\lambda_a}$$

$$\nu_f = \frac{c}{\lambda_f}$$

La détection d'une espèce fluorescente est d'autant plus facile que le déplacement de Stokes est grand.

## M19: Biophysique



### Loi de Beer-Lambert

L'absorption d'un faisceau de lumière est proportionnelle à la longueur du trajet optique suivi par cette radiation et la concentration, en solution, ou la pression partielle, en phase gazeuse, des espèces absorbantes.

La loi de Beer-Lambert s'écrit ainsi:

$$I = I_0 \times 10^{-\varepsilon \times l \times C}$$

Ou encore

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon \times l \times C$$

Le logarithme décimal,  $\log_{10}$ , est utilisé pour les liquides, alors que le logarithme népérien,  $\ln$ , est utilisé pour les gaz.

A: Absorbance (densité optique)

$I_0$ : Intensité lumineuse incidente

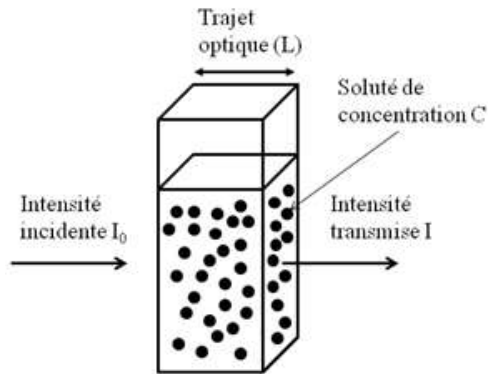
I: Intensité lumineuse transmise

C: Concentration de la molécule absorbante en  $\frac{\text{mol}}{\text{l}}$  (M)

l: Trajet optique en **cm**

$\varepsilon$ : Coefficient d'extinction molaire ( $\text{cm}^{-1} \cdot \text{M}^{-1}$ ) (Probabilité d'absorption d'une molécule à une longueur d'onde donnée)

## M19: Biophysique



### Rendement quantique

L'efficacité de fluorescence pour une molécule donnée est déterminée par le rendement quantique  $\phi_F$ . Il est défini par le rapport entre le nombre de photons émis et le nombre de photons absorbés par la molécule.

$$\phi_F = \frac{I_f}{I_a}$$

Le rendement quantique peut varier en fonction de l'environnement des fluorochromes: concentration, polarité et le pH.

Les meilleurs fluorophores ont un rendement quantique proche de 1

### ***b) Spectre d'absorption caractéristique d'une biomolécule***

L'absorbance provient de groupements chimiques appelés chromophores. En général les chromophores sont à électrons  $\pi$  ou à doublets libres  $n$  (voire tableau ci-dessous) et ils absorbent dans l'UV avec des  $\epsilon$  souvent assez faibles. Les alcools (longueur d'onde d'excitation < 160 nm) et l'eau sont

## M19: Biophysique

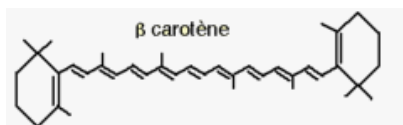
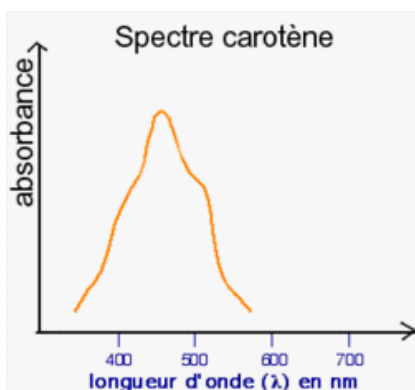
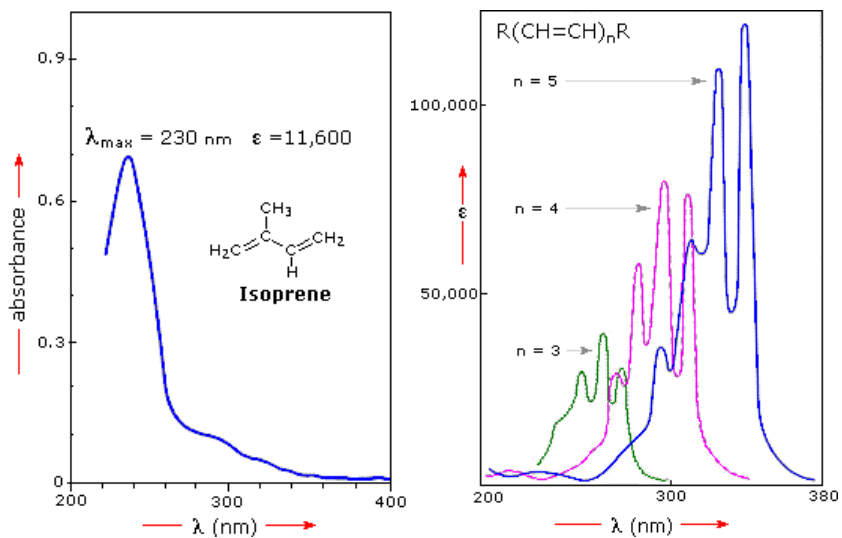
considérés comme les meilleurs solvants pour mesurer l'absorbance des molécules dans la bande 200 à 800 nm.

Chromophore	Exemple	$\lambda_{\text{max}}$ (nm)	$\epsilon$ ( $\text{cm}^{-1} \cdot \text{M}^{-1}$ )	Solvant
C=C	Éthylène	171	15000	hexane
C $\equiv$ C	1- Hexyne	180	10000	hexane
C=O	Éthanal	290	15	hexane
		180	10000	hexane
N=O	Nitrométhane	275	17	éthanol
		200	5000	éthanol
C-X X=Br X=I	Bromure de méthyle	205	200	hexane
	Iodure de méthyle	255	360	hexane

La présence de chromophore dans une molécule est bien étudiée par la spectroscopie UV-Visible, mais la détection des chromophores isolés reste problématique du à la limitation des instruments à fournir des données d'absorption inférieure à 200 nm.

La conjugaison (molécules à électrons  $\pi$  et/ou n conjugués) généralement déplace le maximum d'absorption vers les longueurs d'onde élevées. (Exemple: Isoprène)

# M19: Biophysique



# M19: Biophysique

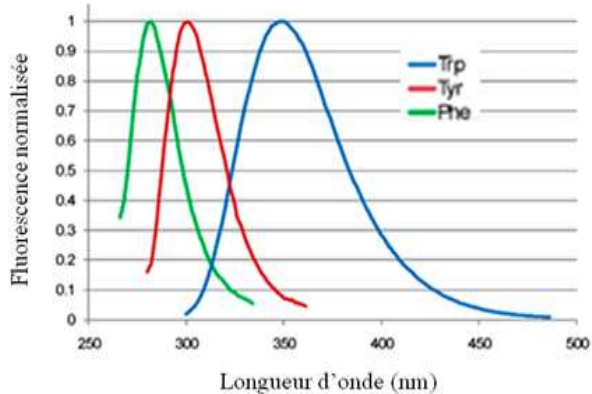
## 3. Étude de la fluorescence des molécules biologiques

### 3.1. Fluorescence intrinsèque naturelle

a) Acides aminés, acides nucléiques et cofacteurs

Sondes fluorescentes intrinsèques "naturelles" : Acides aminés

Fluophore	Conditions	Absorption		Fluorescence	$\Phi_F$
		$\lambda_{max}$ (nm)	$\epsilon_{max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\lambda_{max}$ (nm)	
Tryptophane (Trp)	H <sub>2</sub> O, pH 7	280	5.6	348	0.20
Tyrosine (Tyr)	H <sub>2</sub> O, pH 7	274	1.4	303	0.14
Phénylalanine (Phe)	H <sub>2</sub> O, pH 7	257	0.2	282	0.04

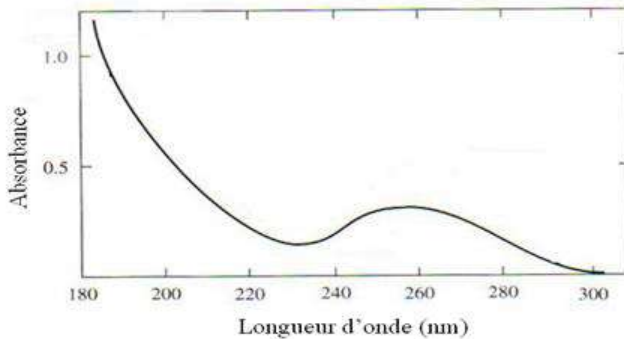


## M19: Biophysique

### Sondes intrinsèques "naturelles" : Acides nucléiques

Fluophore	Absorption		Fluorescence	$\Phi_F$
	$\lambda_{\max}(\text{nm})$	$\epsilon_{\max}(\times 10^{-3})$	$\lambda_{\max}(\text{nm})$	
Adénine	260	13.4	321	0.0003
Guanine	275	8.1	329	0.0003
Cytosine	267	6.10	313	0.00008
Uracile	260	9.5	308	0.00004

Les spectres d'absorption des acides nucléiques présentent une bande d'absorption maximale autour de 260 nm alors que le rendement quantique trop faible (molécules non fluorescentes).



Courbe d'absorbance d'ADN double brin (*E. coli*)



## M19: Biophysique

### Sondes intrinsèques "naturelles" : cofacteurs

La nicotinamide adénine dinucléotide, ou NAD, est une coenzyme d'oxydoréduction présente dans toutes les cellules vivantes.

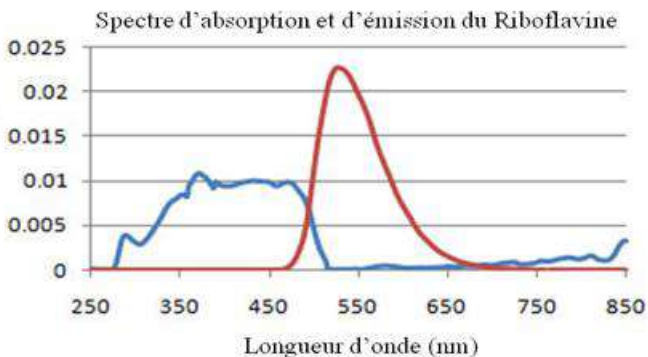
Cette coenzyme est présente sous deux formes dans la cellule.  $\text{NAD}^+$  est un agent d'oxydation et  $\text{NADH}$  est un agent de réduction.

$\text{NADH}$  est une molécule fluorescente avec :

$\lambda_{\text{ex}} = 340 \text{ nm}$  et  $\lambda_{\text{em}} = 450 \text{ nm}$ , alors  $\text{NAD}^+$  ne fluoresce pas. La liaison du  $\text{NADH}$  aux protéines est généralement accompagnée d'une augmentation de sa fluorescence.

**La Riboflavine**, ou lactoflavine, est une vitamine (vitamine B2) hydrosoluble nécessaire à la synthèse de la flavine adénine dinucléotide (**FAD**) et de la flavine mononucléotide (**FMN**), deux cofacteurs essentiels aux flavoprotéines.

La Riboflavine, la FAD et la FMN sont des molécules fluorescentes avec  $\lambda_{\text{ex}} = 450 \text{ nm}$  et  $\lambda_{\text{em}} = 515 \text{ nm}$

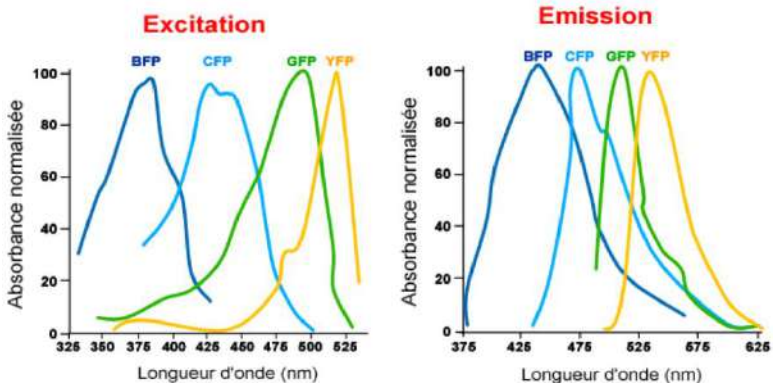


## M19: Biophysique

### *b) La GFP et ses mutants*

La protéine fluorescente GFP (Green Fluorescent Protein) est issue d'une méduse appelée *Aequorea victoria*, qui vit dans les eaux du Nord-Ouest Pacifique. Son gène peut être fusionné *in vitro* au gène d'une protéine que l'on souhaite étudier. Le gène recombinant est ensuite réintroduit dans des cellules, qui vont alors synthétiser la protéine fluorescente de fusion. Cette protéine est utilisée pour son rôle de marqueur, permet de localiser des protéines dans les cellules et d'en suivre les déplacements.

Il existe maintenant différentes variantes de la GFP qui ont été obtenues en modifiant celle-ci par ingénierie génétique. Il existe également d'autres protéines fluorescentes issues d'autres organismes qu'*Aequorea victoria*.



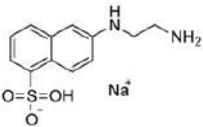
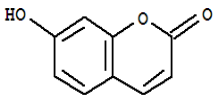
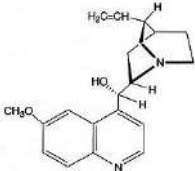
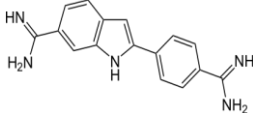
Spectres d'excitation et d'émission des variantes de la GFP.

# M19: Biophysique

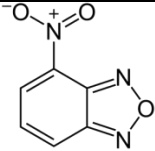
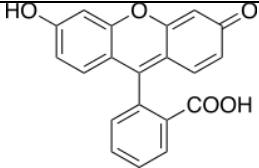
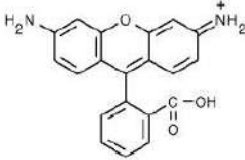
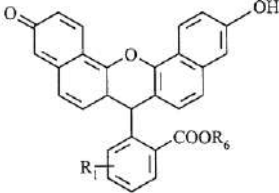
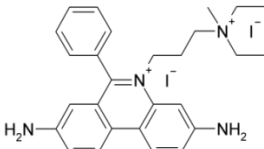
## 3.2. Fluorescence externe

### a) Sondes organiques

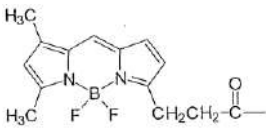
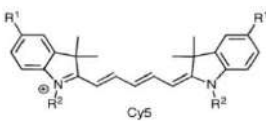
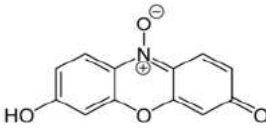
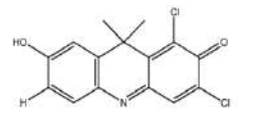
La caractéristique commune aux sondes organiques est la présence de plusieurs cycles aromatiques dans leur structure.

Fluorophores	Structures	$\lambda_{ex}$ (nm)	$\lambda_{em}$ (nm)	$\epsilon$ ( $M^{-1}.cm^{-1}$ )
Fluorophores polycycliques aromatiques carbonés (EDANS)		335	520	6100
Les coumarines (hydroxycoumarine)		360	450	11000
Les quinolines (Quinine)		350	450	5700
Les indoles et les imidazoles (DAPI)		353	465	27000

## M19: Biophysique

Les sondes NBD (NBD)		465	535	6600
Les fluorescéines (Fluorescéine)		490	514	88000
Les rhodamines (Rhodamine 110)		496	517	68000
Les sondes naphtoanthènes (Naphthofluorescéine)		495	660	6000
Les phénanthridines (Propidium)		535	617	702

## M19: Biophysique

Les Bodipy (Bodipy-FL)		505	511	85000
Les cyanines (Cyanine Cy5)		652	672	36000
Les oxazines (RéSORufine]		572	585	41000
L'acridine et ses dérivés (Fluorophore DDAO)		638	651	2000

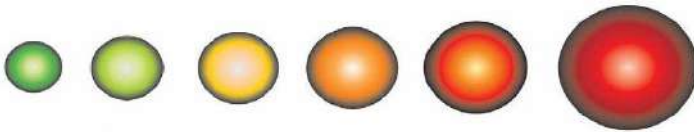
### *b) Sondes inorganiques*

Les sondes inorganiques les plus étudiées sont les Quantum Dot "Boite quantique". Ce sont des nanostructures de semi-conducteurs (souvent du CdSe, CdTe, CdS ou ZnSe enrobé de ZnS ou CdS). Les niveaux d'énergie de ces sondes sont liés à la longueur d'onde, on peut ajuster finement les propriétés optiques des quantum dots en modifiant leurs tailles. Ainsi en contrôlant leurs tailles on peut régler la couleur de la lumière que ces nanostructures absorbent ou émet. Comme les électrons sont confinés à des niveaux d'énergie très éloignés les uns des autres, chacune de ces sondes émet

## M19: Biophysique

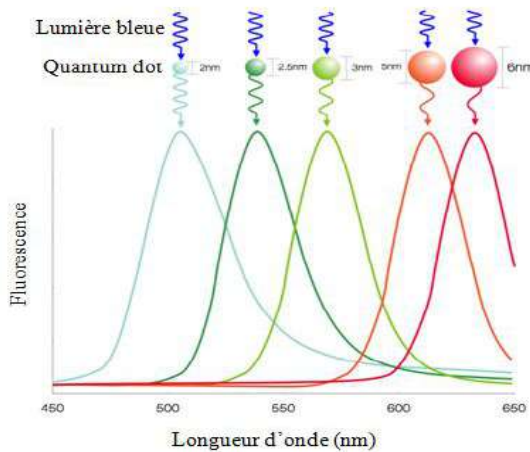
une seule longueur d'onde lorsqu'on l'excite. Cette propriété permet de les utiliser comme marqueurs biologiques.

Des progrès récents dans le développement des quantum dots permettent le contrôle de la taille, de la forme et de la surface fonctionnelle de ces nanostructures pour le traitement ciblé du cancer.



Quantum dot de différentes tailles

Par exemple: ils peuvent émettre de la lumière verte pour des grains de 3 nm, de la lumière jaune pour des grains de 4 nm et de la lumière rouge pour des grains de 5 nm.



Spectres d'émission de différents quantum dots

## M19: Biophysique

# Partie II: Les électrolytes en milieu biologique et les phénomènes de surfaces.

## Chapitre I : Les solutions bio-electrolytiques

### 1- Les électrolytes

Suite aux travaux de Humphrey Davy sur l'électrolyse des métaux en 1834, Michael Faraday a initié l'étude de la conduction électrique dans des solutions aqueuses de sels. Faraday a appelé *Anions*, les ions qui se déplacent vers l'anode et *Cations* ceux qui se déplacent vers la cathode, et les substances qui conduisent le courant, les *Electrolytes*.

Les électrolytes se sont des substances qui, en solution aqueuse permettent le passage du courant électrique en conduisant l'électricité. Ils peuvent être des acides; HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH ou des bases ; NaOH, Ba(OH)<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>OH ou des sels CH<sub>3</sub>COONa, NaCl.

Lorsqu'il y a une différence de potentiel électrique, les cations positifs se dirigent vers la cathode (électrode négative) et les anions négatifs se dirigent vers l'anode (électrode positive). Après avoir atteint les électrodes, les ions réagissent en donnant des électrons (le cas des anions) ou en gagnant des électrons (le cas des cations) pour conduire ainsi de l'électricité.

Chaque électrolyte a une dissociation différente, sauf en cas d'une dilution infinie, ou tous les électrolytes seront complètement dissociés

Selon le degré de dissociation, les électrolytes sont divisés en forts et faibles

- Électrolytes forts: des solutés qui se dissocient complètement dans le solvant donnant des solutions de forte conductivité électrique.

Les Électrolytes forts sont des acides et des bases minérales, à l'exception de l'acide phosphorique et carbonique, et les sels à la fois des acides minéraux et des acides organiques.

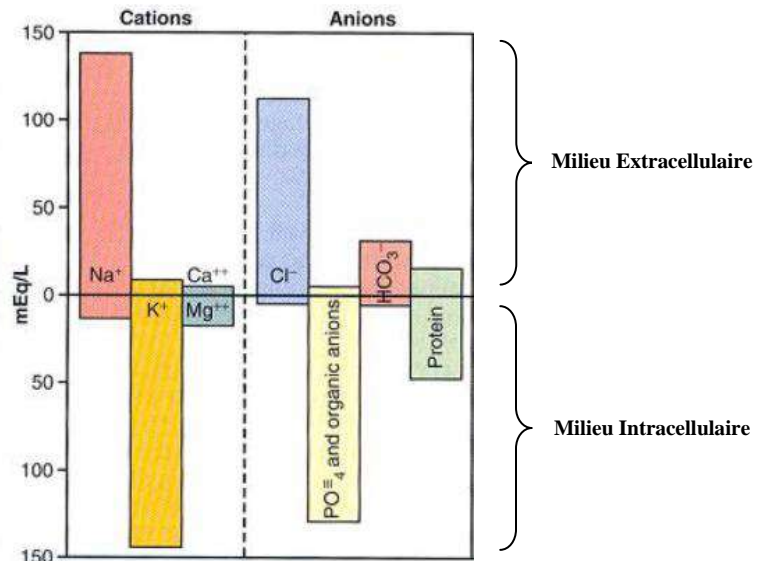
- Électrolytes faibles: des solutés qui se dissocient partiellement dans le solvant donnant des solutions de faible conductivité électrique.

# M19: Biophysique

Les Electrolytes faibles sont les acides carboxyliques et les bases organiques.

## 2- Importance biologique des électrolytes

Pour son caractère ionique, les électrolytes sont impliqués dans la régulation électrique, hydrique, aussi dans l'équilibre acido-basique et l'osmose. La distribution caractéristique des ions à l'intérieur et à l'extérieur des cellules est responsable de la génération du potentiel de membrane impliquée dans la transmission du flux nerveux et de la contraction musculaire.



Distribution intra- et extracellulaire des électrolytes, La concentration de Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> représente la somme des deux ions



## M19: Biophysique

L'équilibre électrolytique est étroitement lié à l'équilibre hydrique puisque les ions se déplacent toujours dans un milieu hydraté, par conséquent, dans les études cliniques, on considère simultanément les deux questions, comme l'un des facteurs les plus importants dans le maintien de l'état de santé.

### 3- Propriétés des électrolytes

#### 3-1 La concentration ionique

La concentration ionique est la quantité d'ions présents dans une solution.

$$C_i = C_i^+ + C_i^- = (n^+ \alpha C_m) + (n^- \alpha C_m)$$

Avec :

$C_i$  : La concentration ionique de la solution      Mole d'ion/m<sup>3</sup>

$C_i^+$  : La concentration ionique des cations      Mole d'ion/m<sup>3</sup>

$C_i^-$  : La concentration ionique des anions      Mole d'ion/m<sup>3</sup>

$n^+$  : Nombre de mole des cations

$n^-$  : Nombre de mole des anions

$\alpha$  : Degré de dissociation ionique du soluté qui varie entre 0 (pas de dissolution) et 1 (dissolution totale).

$C_m$  : La concentration molaire de la solution      Mole/m<sup>3</sup>

#### 3-2 La concentration équivalente

La concentration équivalente représente le nombre de moles de charges (+ ou -) correspondant à 1 litre de solution d'électrolytes.

$$C_e = C_e^+ + C_e^- = (z^+ C_i^+) + (z^- C_i^-)$$

Avec :

$C_e$  : La concentration équivalente de la solution      équivalent/m<sup>3</sup>

## M19: Biophysique

$C_i^+$  : La concentration équivalente des cations      équivalent/m<sup>3</sup>

$C_i^-$  : La concentration équivalente des anions      équivalent/m<sup>3</sup>

$z^+$  : nombre de valence des cations

$z^-$  : Nombre de valence des anions

$C_i^+$  : La concentration ionique des cations      Mole d'ion/m<sup>3</sup>

$C_i^-$  : La concentration ionique des anions      Mole d'ion/m<sup>3</sup>

### 3.3- Mobilité des ions

Les ions de charge (+ze ou -ze) se déplacent sous l'action d'un champ électrique E dans un milieu où ils subissent d'autre part l'action des forces de frottement antagonistes. En raison de ces frottements, la vitesse des ions est proportionnelle à la force motrice, c'est-à-dire au champ électrique E

Définition : On appelle mobilité d'un ion, la vitesse de cet ion pour un champ unité. Dans le système international, la mobilité ionique est mesurée par : m<sup>2</sup> .V<sup>-1</sup> .S<sup>-1</sup> .

$$\mu = \frac{z \times e}{f}$$

Mobilité des cations:

$$\mu^+ = \frac{z^+ e}{f^+}$$

Mobilité des anions:

$$\mu^- = \frac{z^- e}{f^-}$$

$f$ : Coefficient de frottement des anions ou cations (kg/s)

$z$ : Valence de l'ion

$e = 1.6 \times 10^{-19}$  coulomb  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb est la charge élémentaire

## M19: Biophysique

### 3.4- Le flux ionique ou électrique

Le flux ionique créé par une certaine concentration ionique désigne en général l'ensemble des ions évoluant dans le sens du champ électrique dont il est soumise l'électrolyte.

Le flux ionique est mesuré par mole d'ion par m<sup>2</sup> seconde (mole d'ion.m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$$\Phi_e = C_i (z \times e \times E) / f \quad C_i \frac{z \times e \times E}{f}$$

### 3.5- La densité de courant

Le flux ionique va créé une densité de courant électrique qui représente le nombre d'Ampères (I (A)) passant par mètre carré de section (S (m<sup>2</sup>)) du conducteur, ou encore la valeur de la charge qui traverse en une seconde un mètre carré de section du conducteur.

$$J = \frac{I}{S} \quad J = C_i \times z \times F_a \times \mu \times E$$

**Fa : Constante de Faraday**, elle représente la charge globale d'une mole de charges élémentaires. Elle est le produit de la charge élémentaire e par **le nombre d'Avogadro** **Na** (6.022 × 10<sup>23</sup> mol<sup>-1</sup>).

$$F = N_A \times e \quad F_a = N_A \times e \sim 96500 \text{ C/mol}$$

### 3.6- Le courant macroscopique

Un courant électrique est un déplacement d'ensemble de porteurs de charge électrique, des électrons, au sein d'un milieu (matériau conducteur ; électrolyte ;...).

$$I = J \cdot S$$

Le courant électrique est mesurée par Ampère (A)

# M19: Biophysique

## 3.7- Le Coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion  $D$  (unité:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) s'écrit:

$$D = \frac{k_B \times T}{f}$$

$k_B$  : Constante de Boltzmann  $\sim 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$T$  : Température (K)

La mobilité ionique et le coefficient de diffusion sont reliées par la relation d'Einstein:

$$\mu = \frac{z \times e \times D}{k_B \times T}$$

## 3.8- La résistance et la résistivité

La résistance est l'aptitude d'un matériau conducteur à ralentir le passage du courant électrique.

Elle dépend de sa forme géométrique. La résistance d'un conducteur filiforme est définie par la loi d'Ohm :

$$R = U/I$$

Avec :

R : La résistance du matériau	Ohm ( $\Omega$ )
U : Différence de potentiel entre les bornes du matériau	Volt (V)
I : Intensité du courant électrique	Ampère (A)

Pour un conducteur électrolytique, la résistance est définie aussi par :

$$R = \rho \cdot l/S$$

## M19: Biophysique

Avec :

- R : La résistance du matériau    Ohm ( $\Omega$ )  
 $\rho$  : La résistivité de la solution    Ohm. mètre ( $\Omega.m$ )  
l : Distance entre les deux électrodes (longueur du fil)          Mètre (m)  
S : Section commune des électrodes (section droite du fil) Mètre. mètre ( $m^2$ )

La résistivité d'un électrolyte, d'un matériau, représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique.

### 3.9- La Conductance et la conductivité électrique

La conductivité électrique est l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacer librement, donc à permettre le passage d'un courant électrique.

Elle est l'inverse de la résistivité.

$$\sigma = 1/\rho$$

Avec :

- $\sigma$  : La conductivité électrique    Siemens par mètre ( $S.m^{-1}$ )  
 $\rho$  : La résistivité de la solution    Ohm. mètre ( $\Omega.m$ )

La conductance mesure la facilité qu'a une solution à laisser passer le courant.

Elle est l'inverse de la résistance.

$$G = 1/R = I/U = S/\rho. l = \sigma. S/l$$

Avec :

- G : La conductance    Siemens (S)  
R : La résistance du matériau    Ohm ( $\Omega$ )

## M19: Biophysique

### Quelque domaines d'applications de la conductimétrie

- Contrôle de la pureté : dans la déminéralisation et la désionisation de l'eau, la mesure de la conductivité permet de contrôler et d'analyser les eaux permutées, usées, minérales, elle permet aussi de déterminer la salinité des eaux de mer.
- Détermination des constantes d'équilibre: la constante d'acidité des produits de solubilité.
- Analyse des gaz: l'absorption des substances ionisables dans desolvants permet de mesurer la variation de la conductivité.
- Détermination du point isoélectrique des acides aminés: la variation de la conductivité en fonction du pH passe par un minimum en ce point.
- Etude de la cinétique: souvent en cours de réaction, il se forme des produits dont la conductivité équivalente est différente de celle des réactifs.
- Dosage de substances moléculaires : il suffit que ces substances puissent être hydrolysées.
- Transport des ions médicamenteux dans l'organisme : l'électrolyte, appliqué sur la peau, est relié au pôle négatif/positif pour faire pénétrer un anion/cation.

### **3.10- Osmose et osmolarité**

L'osmose c'est un cas particulier des transports membranaires: phénomène de transfert de solvant de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée à travers une membrane imperméable au soluté considéré.

## M19: Biophysique

L'osmose dépend du type de membrane qui doit être spécifiée, puisque c'est elle qui déterminera les espèces qui passent à travers la membrane ou non.

- Membrane dialysante : perméable à l'eau, aux petits ions et molécules  $PM < 1000$
- Membrane semiperméable (ou hémiperméable): strictement perméable à l'eau

Dans un système biologique la **pression osmotique** c'est la pression qui empêche le passage du solvant au travers d'une membrane semi-perméable.

**Pression oncotique** c'est la pression osmotique attribuable aux protéines puisque les protéines ne passent pas les membranes dialysantes et sont donc responsables sur celles-ci d'une pression appelée pression oncotique, qui vaut environ 28 mmHg.

L'osmolarité totale du plasma est de 300 à 310 mOsm/l mesurée sur une membrane strictement semiperméable.

On appelle pression osmotique  $\pi$

Loi de VAN T'HOFF

$$\pi = \frac{nRT}{V}$$

Où  $V$  est le volume du solvant et  $n$  le nombre de moles, ou d'osmoles si le soluté est dissocié.

L'osmolalité  $c_{osm}$  désigne les particules qui ne peuvent pas traverser la membrane.

## M19: Biophysique

$$c_{osm} = n/V$$

En première approximation, le volume du solvant est confondu avec le volume de la solution.

Dans le cas où il existe plusieurs solutés différents qui ne peuvent pas traverser la membrane, la pression osmotique est égale à  $(\sum n_i)RT/V$  où  $\sum n_i/V$  désigne la concentration osmolale totale des particules de solutés, c'est-à-dire l'osmolalité totale  $c_{osm} = \sum c_{osm}$  des solutés qui ne peuvent pas traverser la membrane.

Ainsi, la pression osmotique de la solution: (loi de Van't Hoff)

$$\pi_0 = RTc_{osm}$$

Elle est égale à la somme des pressions osmotiques dues à chacun des solutés.

Une osmole est une mole de particule effectivement en solution. La distinction vient du fait qu'on utilise des concentrations molaires de soluté non dissous (particules).

Donc, l'osmole est égale au nombre de moles de particules qui peuvent être osmotiquement actives (capables de provoquer une pression osmotique) dans une solution idéale.

Attention à ne jamais oublier que toute osmole ne correspond pas automatiquement à des particules osmotiquement actives. Par exemple l'urée n'est pas une particule osmotiquement active, mais une osmole.

Une solution à 1 mol/L de NaCl correspond à une osmolarité de 2 osmoles/L.

Une fois dans l'eau NaCl se dissocie complètement en ion  $\text{Na}^+$  et en ion  $\text{Cl}^-$ , il y a donc deux osmoles pour une mole de NaCl.



## M19: Biophysique

1 mol/L de NaCl  $\longrightarrow$  une osmolarité de 2 osmoles/L

Une solution à 1 mol/L de  $\text{CaCl}_2$ , donne une solution à 3 osmoles/L :  $\text{Ca}^{2+}$  et  $2\text{Cl}^-$

1 mol/L de  $\text{CaCl}_2$   $\longrightarrow$  une osmolarité de 3 osmoles/L

Une solution de 1 mol/L de glucose correspond à une osmole/L

1 mol/L de glucose  $\longrightarrow$  une osmolarité de 1 osmole/L

$$\text{Osmolarité} = b(1 + \alpha(n - 1))$$

$b$  = La molarité

$\alpha$  = Coefficient de dissociation qui varie entre 0 et 1.

( $\alpha = 1$  quant la dissociation est complète)

$n$  = Nombre de particules

- Particules osmotiquement active : Ne diffusent pas librement entre les différents secteurs liquidiens de l'organisme. Les concentrations molaires entre les compartiments intra- et extracellulaires ne sont pas égales (glucoses, ions, solutés exogènes en cas de perfusion).
- Particules osmotiquement inactive : Comme l'eau, ces particules diffusent librement entre les différents secteurs liquidiens de l'organisme. À tout instant il y a une égalité de concentration entre les compartiments intra- et extracellulaires. L'urée est le seul soluté quantitativement important, mais non osmotiquement active.

## M19: Biophysique

La membrane du capillaire peut être considérée comme dialysante, elle permet un passage d'eau et de petites molécules. Dans le milieu interstitiel, le contenu en protéine est très faible et la pression osmotique est due en majorité aux protéines du plasma = 28 mmHg. Il existe d'autre part une différence de pression entre le milieu interstitiel et la lumière du capillaire, due essentiellement à la pression sanguine. Celle-ci diminue de l'artériole à la veinule du fait de la perte d'énergie dans le capillaire (cf hémodynamique). Au pôle artériel de l'anse capillaire la pression artérielle (32 mmHg) est toujours supérieure à la pression oncotique due aux protéines du plasma (28 mmHg) et permet une sortie de l'eau et des petites molécules vers l'intersticium. Au pôle veineux, la pression veineuse n'est plus que de 12 mmHg, donc inférieure à la pression oncotique qui permet la résorption des métabolites.

A l'état normal, les deux flux sont équivalents et il n'y a pas d'accumulation de fluide dans les tissus, c'est **l'équilibre de Starling**.

On peut expliquer (approximativement) la formation d'odèmes (surcharge hydrique du tissu interstitiel) si:

- P veineuse augmente, suite à une insuffisance cardiaque
- $\pi$  oncotique diminue, par baisse de la protidémie (principalement albumine) en cas de malnutrition, syndrome néphrotique (protéinurie), hépatite (synthèse protéique diminuée).

### 3.11- Abaissement cryoscopique

L'abaissement cryoscopique est l'abaissement du point de congélation du solvant.

Le point de congélation d'un solvant est proportionnel au nombre de moles de soluté qu'il contient. Ce phénomène a été découvert par le chimiste

## M19: Biophysique

Raoult qui a établi une loi de proportionnalité permettant de définir la masse molaire d'un soluté dans la solution en abaissant la température de fusion du mélange, soit la température à laquelle un corps solide et liquide peut exister en même temps. La loi de Raoult s'écrit:

$$\Delta\theta = -K_c \times C_s$$

$K_c$ : Constante cryoscopique du solvant en  $K \cdot \text{mol}^{-1} \cdot L$

Pour l'eau  $K_c \sim 1.86 K \cdot \text{mol}^{-1} \cdot L$

$C_s$ : Concentration cryoscopique du soluté en  $\text{mol} \cdot L^{-1}$

C'est à l'air libre, l'eau pure se solidifie à  $0^\circ\text{C}$ , on atteint alors l'égalité entre le flux de liquéfaction et le flux de solidification.

Pour une solution aqueuse à  $0^\circ\text{C}$ , le flux de solidification devient plus faible car les molécules du solvant sont devenues moins libres en présence du soluté. Il faut donc abaisser la température si l'on veut rétablir l'égalité des flux permettant d'atteindre la solidification.

$$T = T_{\text{cong. Solution}} - T_{\text{cong. solvant}}$$

$$\Delta T_{\text{cryoscopique}} = K_C \times C_s$$

$K_C$ : la constante cryoscopique

Pour tout solvant pur, la baisse de la température de congélation de la solution par rapport à la température de congélation du solvant pur est proportionnelle à la  $C_s$ .

Dans le cas des solutions non électrolytiques, la  $K_c$  et  $\Delta T_{\text{cryoscopique}}$  ne dépendent pas de la nature de la substance, mais du nombre de molécules dissoutes.

## M19: Biophysique

Il correspond à une **propriété colligative**, c'est-à-dire qu'il dépend uniquement du nombre de particules de solutés contenues dans la solution.

Le mot colligatives vient d mot latin colligatus qui signifie ensemble liés, c'est encore le phénomène de la diffusion passive des particules en présence d'un gradient de concentration mais ce transport a lieu entre une solution et le solvant. L'introduction d'un soluté dans un solvant limite la liberté de déplacement des molécules de ce dernier, cette modification ne dépend que de la concentration molaire du soluté.

Les propriétés colligatives sont étudiées surtout en solutions diluées, qui peuvent souvent être traitées approximativement comme solutions idéales qui suivent la loi de Raoult.

En regard du solvant pur, une solution présente :

- Un abaissement de la pression de vapeur (tonometrie)
- Une élévation du point d'ébullition (Ebullioscopie)
- Un abaissement du point de congélation (Cryoscopie)
- Dans certains cas, apparition d'une pression osmotique

Les propriétés colligatives peuvent être employées pour la détermination des masses moléculaires des solutés. Aux électrolytes par contre, les mesures des propriétés colligatives peuvent permettre à estimer le degré d'ionisation du soluté.

## M19: Biophysique

### Chapitre II : Etude des interfaces

Outre les variables extensives et intensives, les systèmes matériels présentent certaines caractéristiques qui dépendent de la nature et de l'extension de leur surface, telles que la tension superficielle, le coefficient d'adsorption, etc.

Ceux qui peuvent être quantifiés sont désignés comme des propriétés, ou des coordonnées de la surface et font l'objet d'une étude de la Bio chimie physique des surfaces.

En fait, en supprimant la phase qui se trouve dans le vide, toute phase d'un système est en contact directe avec une autre phase. Au niveau de la frontière qui sépare les deux, certains phénomènes se produisent en raison de la nature inégale, des phénomènes qui ne se produisent pas de même manière à l'intérieur de chacun.

Si la surface de contact entre les différentes phases est négligeable par rapport à la masse du système, la magnitude des propriétés superficiels est si faible par rapport à la magnitude des propriétés extensives des phases qu'elles peuvent être négligées.

Ce n'est pas le cas lorsque les surfaces des phases qui entrent en contact sont importantes par rapport à la masse du système comme ce serait le cas avec les solides pulvérisés ou le brouillard. Dans ce cas, les propriétés de surface, en particulier les propriétés extensives deviennent importantes et peuvent même conditionner le comportement global du système.

# M19: Biophysique

## 1-Interface liquide-gaz :

### 1.1- Mise en évidence des interfaces liquides-gaz

Nous avons tous remarquer que lorsque l'eau est en petites quantités ou en gouttes, elle represente des surfaces avec des courbes convexes, et quand nous introduisons un tube capillaire transparent dans un recipient avec de l'eau, on note que le niveau de liquide à l'intérieur de tube capillaire s'élève par rapport au niveau de l'eau dans le récipient et la surface acquiert la forme concave.

Il existe donc des forces autres que la gravité. Ces phénomènes s'expliquent à l'échelle moléculaire de la zone de transition entre les phases. Cette zone frontière interfaciale est appelée la couche capillaire ou superficielle qui est une frontière discrète où les propriétés changent brutalement, c'est une zone de discontinuité.

En effet, tous les phénomènes superficiels en phase liquide ou solide s'expliquent par

l'existence de forces de cohésion interatomiques et intermoléculaires.

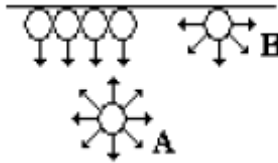
La création de nouvelles surfaces entraine la consommation d'une énergie.

Cas des liquides qui tendent spontanément à prendre une surface minimale (sphère : goutte) dont il faut une énergie pour les séparer.

#### *a- Constante de la tension superficielle*

Soit une molécule (A) à l'intérieur du liquide. Elle est entourée de tous les côtés par d'autres molécules. Si on néglige l'influence de l'agitation thermique, la résultante des forces d'attraction subies par la molécule (A) est en moyenne nulle :

## M19: Biophysique



Pour une autre particule (B) qui se trouve à la surface du liquide. Si on néglige l'attraction des molécules gazeuses, cette molécule est attirée en moyenne vers l'intérieur perpendiculairement à la surface par les molécules liquides voisines. Il en est de même de toutes les molécules superficielles qui forment ainsi une sorte de pellicule tendue qui comprime l'intérieur du liquide.

Pour amener la molécule (A) à la surface, c'est-à-dire augmenter la surface, il faut fournir un travail.  $M2m^2$

Toute augmentation de surface ( $\Delta S$ ) nécessite une énergie extérieure ( $\Delta E$ ), tel que :

$$\Delta W = \Delta E = \gamma \Delta S$$

Le coefficient de proportionnalité ( $\gamma$ ), toujours positif, est appelé tension superficielle. Son unité est :

$$\gamma = \frac{W}{S} \Rightarrow [\gamma] = \frac{J}{m^2} + \frac{Nm}{m^2} = \frac{N}{m}$$

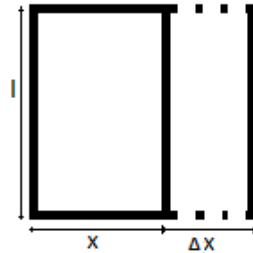
## M19: Biophysique

Soit, une petite surface liquide rectangulaire, de longueur ( $l$ ) est de largeur ( $x$ ). L'énergie correspondante pour augmenter la largeur d'une grandeur ( $\Delta x$ ) est :

- La surface augmente de :  $\Delta S = l \cdot \Delta x$
- Le travail nécessaire pour cette augmentation est :  $\Delta W = F \cdot \Delta x$
- L'énergie correspondante est :  $\Delta W = \gamma \cdot \Delta S$

Donc ;

$$\left. \begin{array}{l} \Delta W = F \cdot \Delta x \\ \Delta W = \gamma \cdot \Delta S \\ \Delta S = l \cdot \Delta x \end{array} \right\} \Rightarrow \gamma = \frac{F}{l}$$



Dont l'unité est :  $F = \gamma / l \Rightarrow \gamma = F / l \Rightarrow [\gamma] = \text{N/m}$

La tension superficielle définie correspond à une interface liquide – gaz et la présence de l'air ne la modifie pas considérablement. Sur le plan thermodynamique, l'énergie de surface d'un système est un constituant de son énergie libre, donc elle a tendance spontanée à prendre la valeur la plus petite possible, en rendant minimale la surface et donnant à ( $\gamma$ ) la valeur la plus faible valeur possible par des configurations moléculaires possible.

### *b- Tension superficielle de quelques liquides*

Parmi les liquides usuels, l'eau a la tension superficielle la plus élevée et ceci est dû à l'importance de ces liaisons intermoléculaires. On a ainsi, des



## M19: Biophysique

exemples de la tension superficielle de quelques liquides à différente température:

<b>Liquide</b>	<b><math>\gamma</math> (N.m<sup>-1</sup>)</b>
Eau à 0 °C	$75,6 \times 10^{-3}$
Eau à 20 °C	$73 \times 10^{-3}$
Eau à 37 °C	$70 \times 10^{-3}$
Plasma sanguin à 37 °C	$73 \times 10^{-3}$
Huile végétale	$32 \times 10^{-3}$
Glycérine à 20 °C	$63 \times 10^{-3}$
Mercure à 20 °C	$44 \times 10^{-3}$

Quand la température augmente la tension superficielle diminue, car l'agitation thermique qui s'accroît tend à masquer les effets des forces de liaisons intermoléculaires.

### *c- Surfactants*

Ce sont des substances qui réduisent la tension de surface d'un liquide. Les surfactants les plus connus sont les savons et détergents, ils réduisent la tension de surface de l'eau, ce qui est nécessaire pour permettre à l'eau de pénétrer plus facilement entre les fibres d'un tissu, ou pour faciliter avec un matériau.

### 1.2- Dissolution des gaz

#### *a- Relation volume pression (Loi de Laplace)*

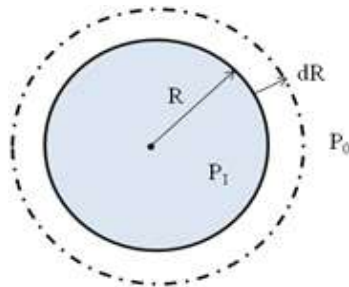
La forme de la goutte est liée à une surpression que le physicien français Pierre Simon de Laplace quantifia en 1805. Considérons une goutte

## M19: Biophysique

sphérique de rayon  $R$ . La pression  $P_1$  à l'intérieur de la goutte est supérieure à la pression atmosphérique  $P_0$ .

Si l'on augmente de  $dR$  le rayon de la goutte, la surface s'accroît de  $8\pi R dR$  et l'énergie de surface de  $\Delta W = 8\pi R \gamma dR$  correspondant à une surface de tension de valeur  $f = 8\pi R \gamma$ .

Prenons l'exemple d'une bulle de gaz au sein d'un liquide. Supposons, pour simplifier, que cette bulle est sphérique. Soit une membrane sphérique remplie d'un liquide. La résultante de toutes les forces de tension superficielle a pour effet d'exercer une compression de façon à réduire la surface de la sphère. Il existe donc une surpression à l'intérieur de la sphère. L'existence de cette bulle suggère que la pression interne  $P_1$  est supérieure à la pression externe  $P_0$ . Calculons  $P_1 - P_0$  en prenant un élément de surface de la bulle.



L'équilibre des forces conduit à la loi de Laplace donnant la surpression  $\Delta P$  pour une goutte:

## M19: Biophysique

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \frac{2\gamma}{R}$$

### Exemple : Surfactant de l'alvéole pulmonaire

Le phénomène de tension superficielle joue un grand rôle dans la respiration des êtres vivants. En effet, les alvéoles pulmonaires, qui sont groupées autour des bronchioles sont assimilables à de très petites sphères de rayon de l'ordre de 50 à 100  $\mu\text{m}$ . Elles sont au nombre de quelques centaines de millions et constituent la plus grande surface par laquelle nous sommes en contact avec l'air (environ 50 fois plus que la surface de la peau qui d'environ 2 m<sup>2</sup>). Ces alvéoles sont tapissées de vaisseaux sanguins qui permettent les échanges d'O<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub> à travers leur membrane. Elles sont également recouvertes d'un film très mince (0.5  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) d'une substance "surfactant" qui donne à la paroi l'élasticité nécessaire.

La surpression à l'intérieur des alvéoles, que l'on assimile à des petites sphères de rayon  $r$ , s'écrit:

$$P_{int} - P_0 = \Delta P = \frac{2\gamma}{r}$$

Où  $P_0$  est la pression dans la cavité pleurale. Cette surpression doit être la même pour toutes les alvéoles, quel que soit leur rayon, pour éviter que les petites ne se vident dans les grosses.

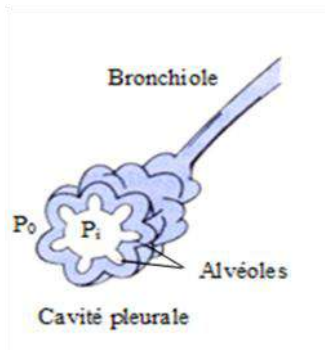
-Au cours de l'expiration,  $r$  diminue à cause de la contraction musculaire,  $\gamma$  doit donc diminué aussi pour éviter que  $\Delta P$  augmente, ce qui conduirait les petites alvéoles à se vider et à disparaître (collapsus).

## M19: Biophysique

- Au cours de l'inspiration  $r$  augmente,  $\gamma$  doit augmenter également pour éviter que  $\Delta P$  diminue, ce qui entraînerait une tendance aux alvéoles à se dilater et à se rompre.

Le surfactant pulmonaire est constitué de longues molécules qui ont pour effet de faire varier  $\gamma$  de façon à maintenir l'équilibre:

$$5 \times 10^{-3} < \gamma < 45 \times 10^{-3} \text{ N/m.}$$



$P_o$  = pression du liquide de la cavité pleurale

$P_i$  = pression à l'intérieur de l'alvéole

### *b- Loi de Henry*

William Henry a remarqué que la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression que ce gaz exerce sur le liquide.

Chaque gaz doit être pris en compte individuellement, ce qui oblige, lorsque l'on est en présence d'un mélange gazeux, à calculer la pression partielle  $P$  du

## M19: Biophysique

gaz considéré en appliquant la loi de Dalton qui dit que la pression totale d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles qui le composent. La loi de Henry s'écrit donc

$$C_{gaz}^{dissous} = K_H P_{gaz}$$

$C_{gaz}^{dissous}$  = concentration du gaz dissous dans l'eau

$K_H$  = constante de Henry (fonction de la température et de la nature du gaz)

$P_{gaz}$  = pression partielle du gaz au-dessus de la solution

### Exemples : Application à la plongée

L'une des conséquences de la loi de Henry est ce que les plongeurs sous-marins appellent l'accident de décompression: en plongée, on respire de l'air comprimé qui se dissout dans le corps selon la loi de Henry. Lorsque l'on remonte rapidement à la surface, l'azote de l'air (80% d'azote pour 20% d'oxygène environ), qui s'est dissout dans le plasma sanguin ou les tissus, n'a pas le temps d'être évacué et forme des microbulles provoquant des troubles graves de la circulation (embolie gazeuse): c'est le phénomène de sursaturation critique. Le remède consiste alors placer le patient dans un caisson de décompression qui, en élevant la pression environnante, augmente la pression partielle de l'azote et donc redissout les bulles de gaz.

Pour éviter cet accident, les plongeurs utilisent des tables de décompression qui déterminent les durées et les profondeurs des paliers qu'il faut faire au

## M19: Biophysique

cours de la remontée pour éliminer l'azote dissous. Pour une plongée courte et à faible profondeur, les paliers peuvent ne pas être nécessaires, mais il faut respecter une vitesse maximale de 15 mètres par minute pendant la remontée. Ces tables sont un peu complexes à calculer, car elles doivent prendre en compte la période du tissu, c'est à dire le temps qu'il met pour arriver à la moitié de la saturation.

Certains plongeurs utilisent pour cela des mélanges gazeux modifiés par rapport à l'air: c'est le cas du nitrox (proportion plus forte d'oxygène et inversement plus faible d'azote) qui permet de diminuer les paliers de décompression et augmente la résistance à la fatigue, mais aux prix de problèmes spécifiques liés à la concentration d'oxygène plus forte.

Exemple: Adaptation des phoques de Weddel (*Leptonychotes weddelli*)

Phoque de Weddel peut demeurer sous l'eau 1 heure.

- Contient deux fois plus d'O<sub>2</sub> par kg que l'humain.
- Chez humain : 36% de O<sub>2</sub> dans les poumons et 51% dans le sang.
- Chez le phoque : 5% de O<sub>2</sub> dans les poumons et 70% dans le sang.

Le peu de O<sub>2</sub> dans les poumons chez les phoques évite l'accumulation de N<sub>2</sub> dans le sang pendant la plongée.

### *c- La diffusion dans les fluides (Loi de Fick)*

À l'échelle macroscopique, le mouvement global des molécules et particules dans un fluide est appelé diffusion. Le phénomène de diffusion suit les lois empiriques de Fick. Ces lois de diffusion s'appliquent aussi bien aux systèmes monophasiques purs qu'aux mélanges (par exemple en phase

## M19: Biophysique

gazeuse ou liquide). Dans le cas d'un mélange liquide, on parle alors de solution.

Le flux de diffusion à travers une surface  $S$  est proportionnel au gradient de la concentration. Si l'on s'intéresse à la diffusion selon une direction  $x$ , la loi est traduite mathématiquement par:

$$\frac{1}{S} \frac{dN_i}{dt} = -D_i^m \frac{dC_i}{dx}$$

Avec  $D_i^m$  le coefficient de diffusion de l'espèce  $i$  dans le milieu  $m$  et  $\frac{dC_i}{dx}$  la variation de concentration de l'espèce  $i$  sur la distance parcourue  $dx$ .

$N_i$  est le nombre de particule ou molécule  $i$ .

Le signe négatif dans l'expression de la première loi de Fick provient du fait que le gradient de concentration est négatif et que l'on veut une expression du flux globalement positive.

Le flux de l'espèce  $i$  à travers une surface  $S$  est noté:

$$J_i = -D_i^m S \frac{dC_i}{dx}$$

En pratique, la concentration de l'espèce  $i$  dépend de la position,  $x$  mais aussi du temps. Il en est donc de même pour le flux. La seconde loi de Fick exprime que la variation d'une espèce  $i$  en fonction du

## M19: Biophysique

temps est proportionnelle à la dérivée seconde de la concentration par rapport à  $x$ :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i^m \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}$$

### Exemple : échanges gazeux au niveau de l'appareil respiratoires

La diffusion simple de l'oxygène et du gaz carbonique au travers des couches cellulaires (alvéoles capillaires pulmonaires/ capillaires systémiques-cellules) suit la règle de la diffusion simple au travers d'une membrane résumée par la loi de Fick.

Les membranes cellulaires sont perméables aux gaz dont le transfert transmembranaire s'effectue par diffusion passive depuis le compartiment où leur concentration (ou pression partielle) est plus élevée vers celui où elle est plus faible.

Pour une pression atmosphérique de 760 mmHg, et pour une ventilation normale, la pO<sub>2</sub> de l'air alvéolaire est égale à 104 mmHg. Elle est inférieure à celle de l'air atmosphérique (160 mmHg) du fait de la p<sub>H<sub>2</sub>O</sub> élevée (16 mmHg) et de la présence de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub> = 40 mmHg).

La durée du passage du sang au niveau de la membrane respiratoire est suffisante pour que les pressions partielles des gaz s'équilibrent entre l'air alvéolaire et le sang veineux pulmonaire quittant les capillaires alvéolaires qui deviendra le sang artériel systémique.

Au niveau des tissus, les échanges gazeux s'effectuent à travers un ensemble formé par la membrane de chaque cellule, l'endothélium capillaire et l'espace



## M19: Biophysique

liquidien extracellulaire qui les séparent. La constitution de cet ensemble est très semblable à celle de la membrane respiratoire et les échanges y sont aussi rapides.

La  $pO_2$  intracellulaire est un peu inférieure à 40 mmHg, et la  $pCO_2$  un peu supérieure à 45 mmHg. Dans le sang veineux systémique quittant les capillaires la  $pO_2$  et la  $pCO_2$  sont respectivement à 40 et 45 mmHg.

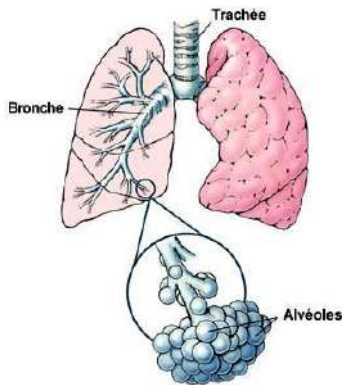


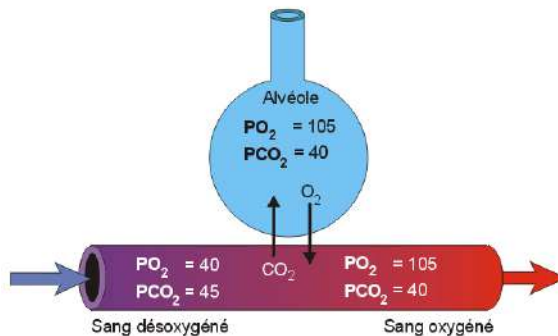
Schéma descriptif des alvéoles

Les alvéoles sont les zones où se produisent les échanges gazeux. Elles sont recouvertes de capillaires pulmonaires. La paroi des alvéoles et des capillaires forme la membrane alvéolo-capillaire dont le rôle est de faire une barrière air-sang. Les échanges se font par diffusion simple à travers cette dernière. L' $O_2$  va des alvéoles vers le sang et le  $CO_2$  fait l'inverse, du sang vers les alvéoles. Elles sont élastiques et la liaison, qui se fait grâce aux pores alvéolaires, des alvéoles adjacentes régule la pression de l'air dans les poumons et sont des voies de rechanges aux alvéoles. Enfin, toutes ces

## M19: Biophysique

structures se situent dans les poumons qui sont au nombre de deux. La partie supérieure du poumon est appelée l'apex. Le poumon droit est plus grand en largeur et plus volumineux que le gauche. Il est divisé en 3 lobes. Le poumon gauche est divisé en 2 lobes et a une cavité réservée à l'emplacement du cœur. Les lobes se divisent aussi en segments pulmonaires. La partie où il n'y a pas d'alvéoles s'appelle le stroma. Ce sont des organes mous et spongieux.

Ils sont enveloppés par la plèvre. Celle-ci est composée de deux feuillets : viscéral (extérieur du poumon) et pariétal (intérieur du poumon). Ces feuillets sont séparés par du liquide pleural qui facilite le glissement et empêche le décollement de la plèvre.

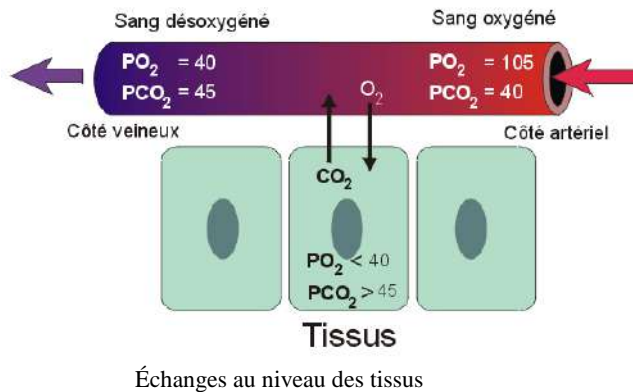


### Échanges au niveau des alvéoles

- ✓ L'air frais entre les poumons transportant de l'oxygène avec  $PO_2 = 160$  mmHg, la présence de l'humidité dans les poumons fait réduire la  $PO_2$  à 105 mmHg.

## M19: Biophysique

- ✓ L'air frais entrant dans les poumons transportant du  $\text{CO}_2$  avec un  $\text{PCO}_2 = 0.3 \text{ mmHg}$ . Le dioxyde de carbone livré aux poumons par le sang fait augmenter la  $\text{PCO}_2$  à  $40 \text{ mmHg}$ .
- ✓ Au niveau des bouts artériels des capillaires pulmonaires, l'oxygène diffuse de l'air dans l'alvéole vers le sang et le dioxyde de carbone diffuse du sang vers l'alvéole suite aux différences de la pression partielles.
- ✓ Comme un résultat de la diffusion aux pôles veineux des capillaires pulmonaires, La  $\text{PO}_2$  dans le sang est égale à la  $\text{PO}_2$  dans l'alvéole, et la  $\text{PCO}_2$  dans le sang est égale à la  $\text{PCO}_2$  dans l'alvéole.
- ✓ Lorsque la différence en pression partielle est nulle, le mouvement d'oxygène et du dioxyde de carbone s'arrête.

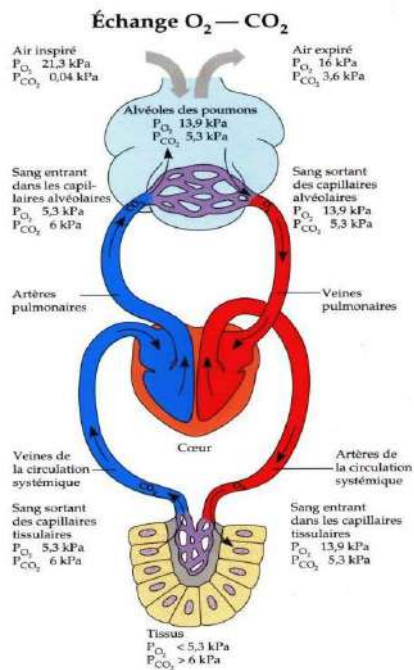


- ✓ L'oxygène diffuse à partir des extrémités artérielles des capillaires tissulaires vers le fluide tissulaire, puis vers les cellules, et le dioxyde de carbone diffuse à partir de cellules vers le fluide

## M19: Biophysique

tissulaire, puis vers le sang, à cause des différences de pressions partielles.

- ✓ À l'extrémité veineuse des capillaires tissulaires, la  $PO_2$  dans le sang est égale à la  $PO_2$  dans le fluide tissulaire et la  $PCO_2$  dans le sang est égale à la  $PCO_2$  dans le fluide tissulaire, donnant un arrêt des mouvements de l'oxygène et le dioxyde de carbone.
- ✓ Le sang transporte maintenant l'oxygène et le dioxyde de carbone aux poumons.
- ✓ Dans le corps, tous ces échanges s'effectuent simultanément.



## M19: Biophysique

Trajet des molécules d' O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>

### 2- Interface liquide-solide :

Un objet solide trempé dans un liquide peut en ressortir couvert d'une pellicule liquide : on dit alors qu'il mouillable par ce liquide, ou bien il peut en ressortir sec : on dit qu'il n'est pas mouillable.

#### 2.1- Énergie d'adhésion d'un liquide sur un solide

C'est le travail qu'il faut fournir pour séparer un liquide du solide sur une surface de 1m<sup>2</sup>. On appelle  $\sigma_L$  la tension superficielle du liquide ; la tension superficielle du solide est  $\sigma_S$ , celle de la tension interfaciale liquide – solide  $\sigma_{SL}$ . En séparant le liquide du solide, sur 1m<sup>2</sup>, on crée aussi 1 m<sup>2</sup> d'interface liquide – air, 1m<sup>2</sup> d'interface solide – air ; l'énergie d'adhésion solide – liquide vaut donc :

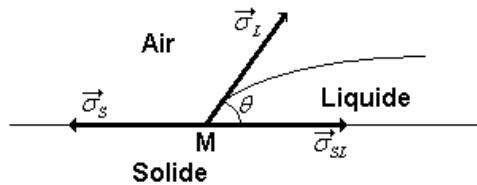
$$W_{SL} = \sigma_L + \sigma_S - \sigma_{SL}$$

Dans cette équation, seul  $\sigma_L$  est connu. La différence ( $\sigma_S - \sigma_{SL}$ ) peut être mesurée relativement facilement, alors que les deux termes ne peuvent l'être séparément.

#### *a- Angle de contact*

Considérant en effet l'équilibre d'une goutte liquide posée sur une surface horizontale du solide. La figure montre bien l'existence des trois (03) phases.

## M19: Biophysique



L'équilibre du point M s'écrit (composantes horizontales des forces superficielles) :

$$\sigma_S = \sigma_{SL} + \sigma_L \cos \theta$$

C'est à dire :

$$\sigma_S - \sigma_{SL} = \sigma_L \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = \sigma_S - \sigma_{SL} / \sigma_L$$

L'angle  $\theta$  s'appelle angle de contact. Celui-ci est accessible à la mesure. Le travail d'adhésion peut s'écrire :

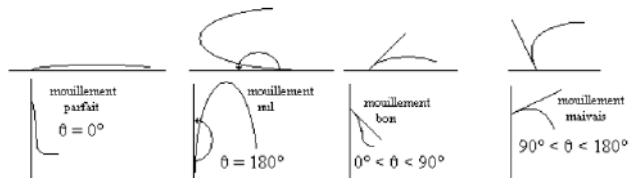
$$W_{SL} = \sigma_L + (1 + \cos \theta)$$

et devient aussi mesurable.

On voit que plus l'angle  $\theta$  est petit, plus le travail d'adhésion est grand. On considère les cas suivants :

## M19: Biophysique

- $\theta = 0^\circ, W_{SL} = 2 \sigma_L = W_L$  : le travail d'adhésion est égal au travail de cohésion du liquide. C'est le cas extrême de l'équilibre qui correspond à un étalement complet du liquide. La condition  $W_{SL} = W_L$  est le cas limite du mouillement parfait. A priori, le mouillement est parfait si  $W_{SL} \geq W_L$ .
- $\theta = 180^\circ, W_{SL} = 0$  : le travail d'adhésion est nul. Le mouillement est nul.
- $0 < \theta < 90^\circ$  (aigu) à un mouillement bon mais non parfait.
- $90^\circ < \theta < 180^\circ$  (obtus) à un mouillement mauvais mais non nul.

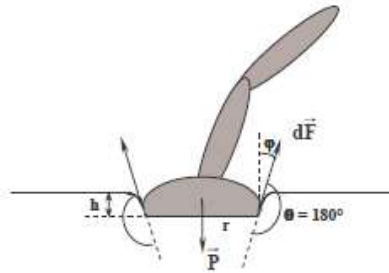
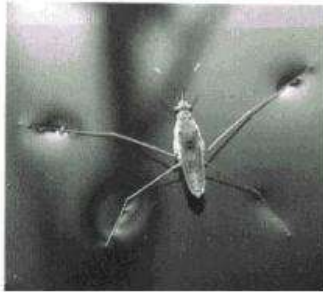


### Exemple : Flottabilité des insectes

Flottabilité des objets denses, non mouillants sur l'eau.

La tension de surface est responsable d'une quantité de phénomènes familiers. Les plus classiques concernant la flottabilité de certains objets légers sur l'eau, et plus particulièrement la marche d'un insecte sur l'eau.

## M19: Biophysique



L'insecte de masse  $m$  est en sustentation sur l'eau. Chaque patte produit une dépression  $h$  sans pénétrer la surface de l'eau. On suppose que la patte est non mouillante, si bien que l'angle de raccordement  $\theta$  vaut  $180^\circ$ . La force de tension superficielle  $F$  agissant le long du cercle de contact de rayon  $r$  est inclinée d'un angle de déformation de surface  $\varphi$  par rapport à la verticale. Le bilan des forces est le suivant:

- Poids de l'insecte qui s'exerce sur une patte:  $P = \frac{mg}{6}$  (vers le bas)

-Résultante des forces de tension superficielle verticales  $F = 2\pi r \gamma \cos\varphi$  (vers le haut)



## M19: Biophysique

- Force de pression hydrostatique:  $F_{ph} = \pi r^2 \rho g h$  (vers le haut)

L'équilibre donne:

$$\frac{m - 6\pi r^2 \rho h}{6} g = \frac{m_{eff}}{6} g = 2\pi r \gamma \cos\varphi$$

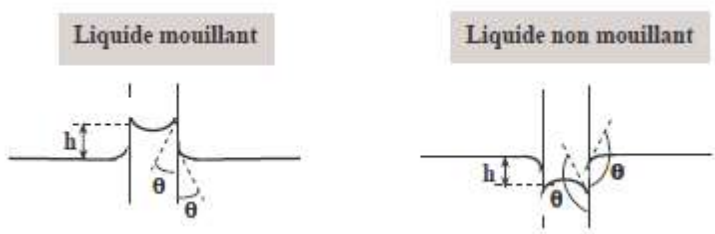
( $m_{eff}$  est une masse effective = masse - force de pression hydrostatique/g).

On peut calculer la masse effective maximum que peut avoir l'insecte: elle correspondrait à  $\cos\varphi = 1$  (déformation maximum).

$$m_{eff \text{ maxi}} = 12\pi r \gamma = 0.13 \text{ gramme}$$

### 2.2- Capillarité : loi de Jurin

Le phénomène de mouillage se produit bien entendu également si la paroi du solide est verticale. Lorsque l'on plonge un tube de verre de faible diamètre intérieur (capillaire) dans un liquide, on observe les comportements suivants:



## M19: Biophysique

On observe une ascension ou une descente capillaire d'une valeur  $h$  d'autant plus élevée que le tube est étroit. Il y a apparition d'un ménisque concave vers l'extérieur dans le cas d'un fluide mouillant, convexe dans le cas contraire.

### Calcul de dénivellation

Soit, par exemple, un liquide mouillant de masse volumique  $\rho$  dans un tube capillaire de rayon  $r$ . On suppose un angle de contact  $\theta$ . Le poids  $\vec{F}$  du liquide soulevé (ou enfoncé) est équilibré par la force de tension superficielle  $\vec{F}$  exercée par le fluide sur les parois du tube. Cette force est la somme des forces élémentaires  $d\vec{F}$  dont seules les composantes verticales contribuent à la résultante.

On a donc

$$F_{\text{Périmètre du tube}} = \oint dF \cos \theta$$

Avec  $dF = \gamma dl$ ,

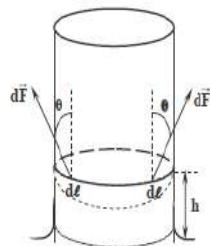
On obtient

$$F_{\text{Périmètre du tube}} = \oint \gamma \cos \theta dl = 2\pi r \gamma \cos \theta$$

Le poids de la colonne soulevée est

$P = mg = \pi r^2 h \rho g$ , où  $g$  est l'accélération de la pesanteur, est équilibré par la force de tension superficielle  $F_{\text{Périmètre du tube}}$

La condition d'équilibre donne donc la hauteur atteinte par le fluide dans le tube de section circulaire. C'est la loi de Jurin



$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho r g}$$

## M19: Biophysique

Remarque:

$$\text{Si } \theta = 90^\circ, \cos\theta = 0 \quad h = 0$$

$$\text{Si } \theta > 90^\circ, \cos\theta < 0 \quad h < 0 \quad \text{descente (liquide non mouillant)}$$

$$\text{Si } \theta < 90^\circ, \cos\theta > 0 \quad h > 0 \quad \text{ascension (liquide mouillant)}$$

Dans le cas du mouillage parfait,  $\cos\theta = 1$

Exemple: Hauteurs atteintes par l'eau et le mercure dans divers types de tubes.

	$r = 1 \text{ mm}$	$r = 10 \text{ mm}$
Eau ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \gamma = 7.3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ) Verre propre ( $\theta = 0^\circ$ )	$h = 14.5 \text{ mm}$	$h = 1.5 \text{ mm}$
Eau ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \gamma = 7.3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ) Verre sale ( $\theta = 60^\circ$ )	$h = 7.3 \text{ mm}$	$h = 0.7 \text{ mm}$
Mercure ( $\rho = 13600 \text{ kg/m}^3, \gamma = 0.44 \text{ N/m}$ ) Verre propre ( $\theta = 140^\circ$ )	$h = -5.3 \text{ mm}$	$h = -0.5 \text{ mm}$

La dénivellation devient très faible pour des tubes de rayon supérieur à 1 cm

### 2.3- Mesure de la tension superficielle d'un liquide

On distingue 3 méthodes de mesure :

## M19: Biophysique

- Les méthodes statiques, où le phénomène utilisé pour la mesure est un équilibre indépendant du temps : la constitution des surfaces reste invariable au cours de la mesure. Ces méthodes sont seuls utilisables pour les solutions tensio – actives, dont on sait que l’agitation peut modifier de façon considérable la concentration superficielle.
- Les méthodes dynamiques, où le liquide est en mouvement, ce qui ne laisse pas le temps aux surfaces de s’organiser. Ces méthodes sont inadéquates pour les solutions tensio – actives. Mais comme elles sont souvent de pratique très simple, elles sont fréquemment utilisées pour les liquides purs et les solutions non tensio – actives. De plus, la comparaison des résultats fournis par les méthodes statiques et dynamiques permet d’avoir des renseignements sur la cinétique de l’organisation des couches superficielles.
- Les méthodes mixtes, où le liquide est en mouvement, mais très lent, de sorte qu’on se rapproche de l’équilibre.

### *a- Méthode de la lame immergée :*

Considérant une lame mince verticale suspendue au plateau d’une balance en équilibre. A ce mouvement la tension ( $F$ ) du fil est égale et de signe opposé au poids ( $mg$ ) de la lame.

Faisons maintenant affleurer (toucher) à celle-ci, jusqu’à ce que le contact soit réalisé. L’équilibre est alors rompu par les forces superficielles, et pour le rétablir il faut que la tension du fil varie d’une quantité ( $\Delta F$ ). Si le liquide mouille la lame, celle-ci est attirée vers le bas, et ( $\Delta F$ ) est positif. Si le

## M19: Biophysique

liquide ne mouille pas la lame, elle se trouve au contraire repoussée vers le haut, et  $(\Delta F)$  est négatif. On peut montrer que la force  $(\Delta F)$  qui déséquilibre la balance vaut :

$$\Delta F = a. \sigma \cos \theta$$

Où  $\sigma$  est la tension superficielle du liquide,  $\theta$  est l'angle de contact du liquide et du solide constituant la lame (on voit que  $\Delta F > 0$  si  $0 < \theta < 90^\circ$ ),  $a$  est le périmètre de la lame. Si la lame est mince, on peut négliger la contribution de l'épaisseur et considérer que  $a = 2l$  ( $l$  : longueur de la lame). Finalement :

$$\Delta F = 2l. \sigma \cos \theta$$

$\Delta F$  représente la force d'attraction ou de répulsion mutuelle entre la lame et le liquide.

Les avantages de la méthode sont :

- Sa précision, qu'aucune autre méthode n'égale
- Sa rapidité pendant la mesure
- Son caractère statique, qui permet de suivre l'évolution dans le temps de la tension superficielle au fur et à mesure qu'il se modifie, la lame doit rester en permanence en contact avec le liquide.

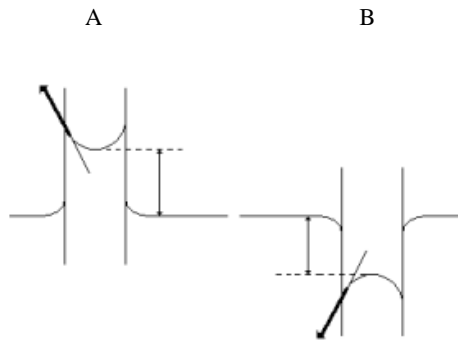
## M19: Biophysique

### *b- Méthode de tube capillaire – loi de Jurin*

Soit un tube, dont la mouillabilité est définie par un angle  $\theta$ . Mis en contact avec un liquide, ce tube exerce sur lui une attraction qui le fait monter, en cas de bon mouillement, ou descendre en cas de mauvais mouillement. De façon tout à fait comparable à la formule  $\Delta F = a \cdot \sigma \cos \theta$ , l'attraction exercée par le tube sur le liquide intérieur du tube est donnée par :

$$\Delta F = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \theta$$

Où ( $r$ ) est le rayon intérieur du tube.



Ascension capillaire : A) bon mouillement,  $h > 0$ . B) mauvais mouillement,  $h < 0$

L'équilibre n'est obtenu que lorsque cette force est équilibrée par le poids de la colonne liquide, c'est à dire :

$$P = h \pi r^2 \rho g$$

## M19: Biophysique

Où ( $g$ ) est l'intensité de la pesanteur, ( $\rho$ ) est la masse volumique du liquide, ( $h \cdot \pi \cdot r^2$ ) est le volume de la colonne liquide en négligeant les ménisques.

En égalant ( $\Delta F$ ) et ( $P$ ), on trouve :

$$\sigma = h r \rho g / 2 \cos \theta : \text{Loi de Jurin}$$

- Si le tube est parfaitement mouillable (verre très propre et eau), on a  $\theta = 0^\circ$  et :

$$\sigma = h r \rho g / 2$$

- Si le tube est rigoureusement non mouillable (verre très propre et mercure),

On a  $\theta = 180^\circ$ :

$$\sigma = - h r \rho g / 2$$

Dans ce cas, ( $h$ ) est une dénivellation négative.

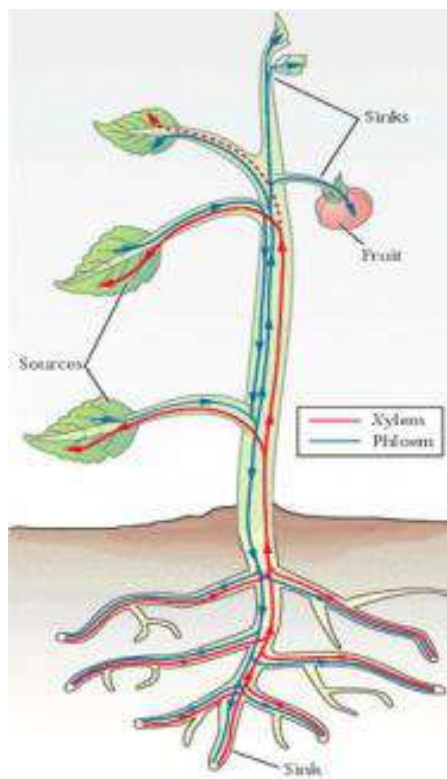
Cette méthode, bien que statique, est entachée d'imprécision, car on connaît pas toujours le rayon du tube. De plus le nettoyage parfait est très difficile à obtenir.

### **Exemple : l'ascension de la sève**

Les mécanismes impliqués dans l'ascension de la sève sont régis par des lois physiques. L'eau entre par osmose dans les racines, monte par capillarité dans les vaisseaux conducteurs du tronc et la transpiration crée un phénomène de succion qui fait monter la sève jusqu'aux feuilles.

La sève brute monte dans l'arbre à travers le xylème (ensemble de capillaires fins) par capillarité.

## M19: Biophysique





# M19: Biophysique

## 2.4- Écoulement des fluides

### 2.4-1- Écoulement d'un liquide idéal

Un fluide est parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de viscosité et de la conductivité thermique.

L'énergie totale  $E_t$  d'un fluide dépend de trois types d'énergie:

(1) énergie de pesanteur ou potentielle qui est liée à la masse et à la hauteur:  $E_1 = mgh$

(2) énergie cinétique:  $E_2 = \frac{1}{2}mv^2$

(3) énergie de pression statique:  $E_3 = PV$

Équation de Bernoulli:

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV$$

L'énergie totale d'un fluide est constante tout au long de la conduite (viscosité = 0)

$$\begin{aligned} E_t = E_1 + E_2 + E_3 &= mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV \\ &= \text{constante} \end{aligned}$$

En terme de pression, l'équation de Bernoulli s'écrit:

$$\begin{aligned} P_t = E_t/V &= mgh/V + \frac{1}{2}mv^2/V + PV/V \\ &= \text{constante} \end{aligned}$$

$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = \text{constante}$$

## M19: Biophysique

$\rho gh$  = pression de pesanteur

$P$  = pression statique

$\frac{1}{2} \rho v^2$  = *pression cinétique*

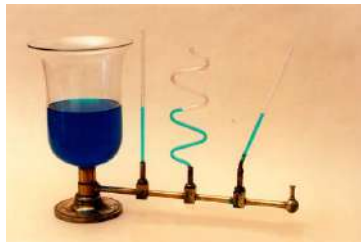
Conditions statiques: le fluide est immobile:  $v = 0$  (Loi de Pascal)

$$\rho gh + P = \text{constante} \implies P = \text{constante} - \rho gh \implies dP = -\rho g dz$$

La loi de Pascal représente le principe fondamental de la statique des fluides.

Le principe de Pascal dit que la pression est la même en tout point du liquide et cela aussi longtemps que ces points sont à la même profondeur.

(La pression à une hauteur donnée dans un récipient qui contient un liquide est indépendante de la forme du récipient).



## M19: Biophysique

Écoulement continu:  $v = cte$

$$\rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{constante}$$

$$\rho gh + P = \text{constante} - \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}'$$

Exercice: Variation de la Pression artérielle (PA) avec la position d'un patient debout

Sachant que  $P_A$  moyenne à la sortie du cœur = 13 kPa (à 1.30 m)

$$dP = -\rho g dz$$

Supposons que  $\rho_{sang} = \rho_{eau} = 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$$

$P_A$  en station verticale à 1.80 m (cérébral) et à 0 m (pieds)?

$$\rho gh + PA = \text{constante}'$$

Si zéro = niveau du cœur  $PA = \text{constante}' = 13 \text{ kPa}$

$$PA = \text{constante}' - \rho g dh = 13 - \rho g dh$$

La  $P_A$  est égal à la  $P_A$  cardiaque modifiée par la P liée au poids de la colonne de sang correspondante.

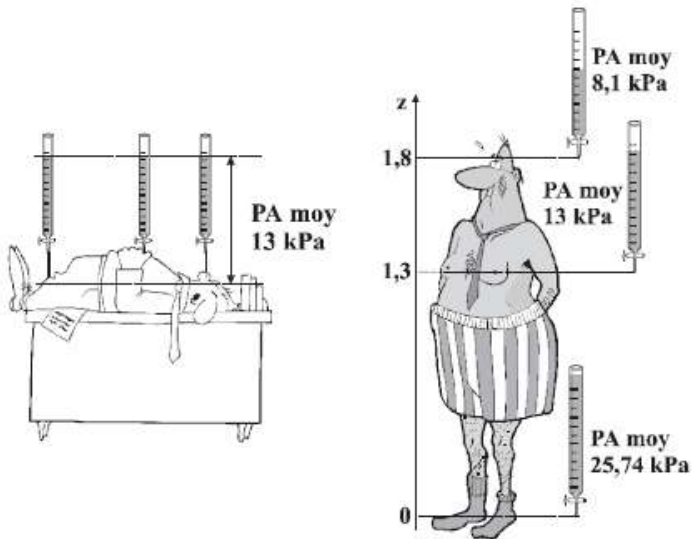
## M19: Biophysique

Le cerveau (1.80 m),

$$PA(1.8) = PA(1.3) + dP (dz = 0.5) = 13 \times 10^3 - \rho g \times 0.5 = 8.1 \text{ kPa}$$

Les pieds (0 m),

$$PA(0) = PA(1.3) + dP (dz = -1.3) = 13 \times 10^3 + \rho g \times 1.3 = 25.74 \text{ kPa}$$



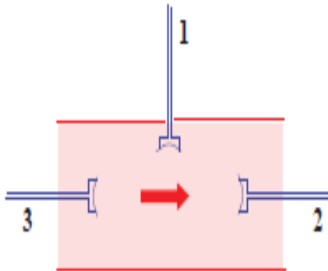
Variation de la pression artérielle dans le corps humain

Écoulement horizontal:

## M19: Biophysique

$$\begin{array}{c} h = \text{cte} \\ \text{cte} \end{array} \quad \Longrightarrow \quad \rho g h = \text{cte} \quad \Longrightarrow \quad P + \frac{1}{2} \rho v^2 =$$

Mesure des pressions et orientations des capteurs:



(1) pression latérale = P

(2) pression de sortie =  $P + \frac{1}{2} \rho v^2$

(3) pression d'entrée =  $P - \frac{1}{2} \rho v^2$

### Exercice: mesure de la pression artérielle en écoulement horizontal par cathétérisme

La pression de sortie est plus facile à mesurer

Ce qui est intéressant à mesurer dans le cathétérisme est la pression latérale.

Calcul de l'erreur induite par la vitesse d'écoulement sur l'évaluation de la pression latérale:

$$P_{\text{sortie}} = P_{\text{latérale}} + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{et} \quad P_{\text{latérale}} = 13 \text{ kPa}$$

Au repos:  $v = 30 \text{ cm.s}^{-1}$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \times 10^3 \times 0.3^2 = 45 \text{ Pa}$$

## M19: Biophysique

$$P_{\text{sortie}} = P_{\text{latérale}} + 0.045 \text{ kPa} = 13.045 \text{ Pa}$$

$$\text{Erreur} = \frac{P_{\text{sortie}} - P_{\text{latérale}}}{P_{\text{latérale}}} = 0.3\%$$

À l'effort:  $v = 1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \times 10^3 \times 1.2^2 = 720 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{sortie}} = P_{\text{latérale}} + 0.72 \text{ kPa} = 13.72 \text{ Pa}$$

$$\text{Erreur} = \frac{P_{\text{sortie}} - P_{\text{latérale}}}{P_{\text{latérale}}} = 5.5\%$$

Remarque: moyen de mesurer indirectement  $v$  :

$$P_{\text{sortie}} - P_{\text{latérale}} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

### 2.4.2- Écoulement d'un liquide réel

#### Fluides réels

- Tout fluide réel est un fluide visqueux:  $\mu \neq 0$ .
- Lors de son mouvement, toute particule est soumise aux forces de frottement et (en régime turbulent) à la turbulence.
- Pour vaincre ces forces, l'énergie cinétique est dissipée et transformée en énergie thermique traduite par une perte de charge.

## M19: Biophysique

Equation de Bernoulli n'est plus vérifiée:

$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P \neq \text{constante}$$

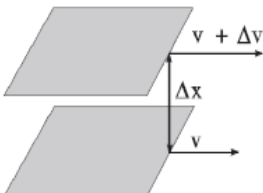
$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P + \text{chaleur} = \text{constante}$$

Dans le cas d'un liquide réel, il y a une perte de l'énergie utilisable lors de l'écoulement « perte de charge » liée à la dissipation d'énergie en chaleur du fait de la viscosité du liquide.

### a- Viscosité

Dans le cas des fluides parfaits, on considère que l'écoulement se déroule sans perte d'énergie. Dans un fluide réel, il existe des forces dites de viscosité. Elles sont dues à des frottements qui existent entre les couches de vitesses différentes et sur les parois.

La viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. Elle se manifeste chaque fois que les couches voisines d'un même fluide sont en mouvement relatif, c'est à dire lorsqu'il s'établit un gradient de vitesse.



Deux lames de fluide circulent parallèlement à des vitesses différentes.

La force de frottement que chacune exerce sur l'autre:

$$F = \frac{\eta S \Delta v}{\Delta x} \quad (\text{Newton})$$

## M19: Biophysique

Avec:  $S$  = surface commune aux 2 lames

$\frac{\Delta v}{\Delta x}$  = Gradient de vitesse (taux de cisaillement)

$\eta$  = viscosité (constante caractéristique du liquide)

$$\text{Unités: } [\eta] = \frac{N.m}{m^2.(m.s^{-1})} = Pa.s = \text{Poiseuille}$$

SI: Poiseuille (kg/m.s) ou Pa.s

CGS: Poise

1 Poiseuille = Poises

$\eta$  : La viscosité dynamique par opposition à la viscosité cinématique, notée  $\nu$

La viscosité cinématique est égale au rapport de la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide considéré.

$$\text{Viscosité cinématique: } \nu = \frac{\eta}{\rho}$$

L'unité de la viscosité cinématique, dans le système CGS, est le Stokes, notée St. ( $1m^2.s^{-1} = 10^4St$ )

Viscosité dynamique de quelques fluides à 20°C  
(en  $mPa.s$ ):

Fluide	Viscosité
Eau	1.005
Essence	0.652
Éthanol	1.2



## M19: Biophysique

Glycérine	1490
Huile d'olive	84
Lait	2
Mercure	1.554
Miel liquide	6000

La viscosité dépend fortement de la température. Pour conserver un sens à la mesure, on doit préciser la température à laquelle elle a été faite. Dans un liquide, la viscosité décroît rapidement en fonction de la température

La viscosité sanguine est fortement variable avec la concentration en globules rouges (hématocrite). En l'absence de cellules sanguines, le sérum (obtenu après coagulation) ou le plasma (obtenu par centrifugation) ont une viscosité proche de celle de l'eau à 20°C :

- Sérum:  $1.1 \text{ à } 1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$

- Plasma:  $1.4 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$

### *b- Nature du fluide*

Le gradient de vitesse  $\frac{\Delta v}{\Delta x}$  intervient dans la définition du coefficient de viscosité. On est ainsi amené à considérer deux cas:

- la force de cisaillement est proportionnelle au gradient de vitesse et donc le coefficient de viscosité constant, quel que soit le gradient de vitesse;

## M19: Biophysique

- la force de cisaillement diminue lorsque le gradient de vitesse augmente (les plans glissant plus facilement l'un sur l'autre à vitesse élevée qu'à faible vitesse) et dans ce cas le coefficient de viscosité diminue lorsque le gradient de vitesse augmente.

Ces considérations permettent de définir:

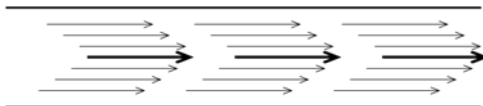
- **Les fluides newtoniens:** le coefficient de viscosité est constant, quel que soit le gradient de vitesse.  
Exemple eau: quand on tourne une cuillère dans un bol, la résistance à l'avancement ne change pas si on change la vitesse de rotation.
- **Les fluides non newtoniens:** la viscosité diminue lorsque le gradient de vitesse augmente.  
Exemple : le yogourt devient moins visqueux si on le bat rapidement (il se fluidifie).

Le sang est un liquide non newtonien, alors que les liquides purs et les solutions micromoléculaires sont en général newtoniens.

### *c- Nature de l'écoulement*

#### ➤ *Écoulement laminaire:*

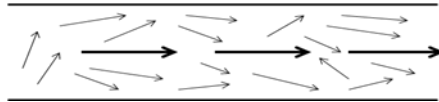
Dans ce cas toutes les particules se déplacent dans une direction parallèle au sens général de l'écoulement, ce qui veut dire que tous les vecteurs vitesse individuels sont parallèles entre eux et parallèles au vecteur vitesse moyenne;



## M19: Biophysique

### ➤ *Écoulement turbulent:*

Les vecteurs vitesse prennent toutes les directions, ce qui se traduit par l'apparition de tourbillons, mais la résultante de ces vitesses reste malgré tout dirigée dans le sens global de l'écoulement.



### d- *Le nombre de Reynolds*

Expérience de Reynolds: un fluide coule dans un tube. On augmente progressivement la vitesse du fluide. On évalue sa vitesse par la différence de pression mesurée entre deux points. L'écoulement est d'abord laminaire. À partir d'une certaine valeur de la vitesse, il devient turbulent

Les conditions dans lesquelles le régime d'écoulement d'un fluide se modifie, notamment pour passer d'un régime laminaire vers un régime turbulent, font appel à quatre variables qui participent à la définition du régime d'écoulement :

- la vitesse circulaire moyenne :  $V_m$
- le diamètre du tube :  $d$
- la masse volumique du liquide :  $\rho$
- la viscosité du liquide :  $\eta$

Les trois premières variables agissent dans le sens direct : le régime aura tendance à être turbulent lorsque la vitesse moyenne augmente, lorsque le diamètre du tuyau augmente et lorsque la masse volumique

## M19: Biophysique

du liquide augmente; la dernière variable au contraire agit en sens inverse : le régime sera d'autant plus volontiers turbulent que la viscosité sera plus faible, c'est-à-dire que le liquide sera plus "fluide".

Le rapport entre la force d'inertie et la force visqueuse est représenté en ordre de grandeur par le nombre de Reynolds ( $R$ ).

$$R = \frac{\rho V_m d}{\eta}$$

Quand  $R \ll 1$ , la force visqueuse est dominante

Quand  $R \gg 1$ , la force d'inertie est dominante

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimensions et selon les valeurs qu'il prend (dans le système international) on pourra caractériser la probabilité pour un écoulement d'être laminaire ou turbulent :

Si  $R < 2400$ , le régime est probablement laminaire

Si  $R > 3000$ , le régime est probablement turbulent

Si  $2400 > R \gg 3000$ , le régime instable (intermittent), c'est-à-dire qu'il peut être aussi bien laminaire que turbulent, en fonction des conditions extérieures: par exemple des vibrations extérieures peuvent conduire à faire passer un régime laminaire instable vers un régime turbulent.

La valeur seuil de 2400 permet de définir une vitesse dite "vitesse critique" en dessous de laquelle le régime est probablement laminaire et au-dessus de laquelle il aura tendance à devenir instable, avec une possibilité de devenir turbulent:

## M19: Biophysique

$$V_c = \frac{2400\eta}{\rho d}$$

### e- La loi de poiseuille

Dans un liquide visqueux, il existe une perte de charge le long de la canalisation qui exprime la baisse de pression  $\Delta P$  par unité de longueur  $l$  parcourue par le fluide dans un plan horizontal.

L'équation de Bernoulli doit donc être corrigée pour tenir compte de viscosité:

$$\begin{aligned} P_A + \rho g h_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 \\ = P_B + \rho g h_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \Delta P \end{aligned}$$

où  $\Delta P = \rho g \Delta h$  représente une différence de charge entre A et B.

La viscosité crée un profil de vitesse d'écoulement dans un tuyau cylindrique, dû en quelque sorte aux frottements des tubes de courant concentriques, le plus extérieur étant freiné par le frottement sur la paroi de la canalisation et freinant lui-même celui qui est en dessus et ainsi de suite jusqu'au centre de la canalisation.

La loi de poiseuille donne le débit  $Q$  en fonction de la perte de charge  $\Delta P/l$  et de la puissance 4 du rayon  $r$  et inversement en fonction de la viscosité  $\eta$ .

$$Q = \frac{\pi \Delta P}{8\eta l} r^4$$

Cette équation est valable tant que le nombre de Reynolds de l'écoulement reste modéré (régime laminaire).

## M19: Biophysique

Cette loi est parfois exprimée par la perte de charge en fonction du débit:

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{8\eta Q}{\pi r^4}$$

Par analogie avec un circuit électrique, on parle de la résistance  $R$  (résistance à l'écoulement) définie par:

$$R = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

Conséquences physiologiques de la loi de Poiseuille:

La loi de poiseuille est souvent appliquée aux écoulements de sang dans les vaisseaux (même s'il s'agit dans ce cas d'une approximation). Il est donc très important de considérer les conséquences de la dernière formule.

Le débit dans un vaisseau sanguin est dépendant:

- du gradient de pression aux extrémités du vaisseau;
- du rayon et de la longueur du vaisseau;
- de la viscosité sanguine.

Si l'on inverse la formule de poiseuille, on a :

$$\Delta P = \frac{8l}{\pi r^4} \eta Q$$

## M19: Biophysique

Cette formule est importante, car si l'on fait analogie avec la loi d'Ohm,  $U = RI$  reliant une différence de potentiel  $U$  à une intensité de courant  $I$  passant dans une résistance  $R$ , la loi de Poiseuille peut s'écrire  $\Delta P = R_{\text{vasc}}Q$ , où  $R_{\text{vasc}}$  est la résistance vasculaire à l'écoulement. On voit que cette résistance est le produit d'un terme  $(8l/(\pi r^4))$  qui dépend des caractéristiques géométriques du contenant (du vaisseau) et d'un terme qui dépend des caractéristiques physiques du contenu: la viscosité  $\eta$ .

La résistance vasculaire à l'écoulement est très fortement modifiée par des variations du calibre des vaisseaux (car le rayon intervient à la puissance quatrième). C'est ainsi que des diminutions ou des augmentations du calibre des vaisseaux (vasoconstriction ou vasodilatation), même si elles sont d'amplitude modérée, pourront réguler de façon importante le débit de sang arrivant à un organe.

Une augmentation de la viscosité du sang (présente dans certaines pathologies) pourra quant à elle avoir des conséquences délétères sur la viabilité de certains organes, car elle pourra induire une réduction des débits qui les perfusent.

### 2.4.3.-Hémodynamique

#### a) *Les pressions sanguines*

L'hémodynamique traite de l'application des lois de l'hydrodynamique à la circulation sanguine.

## M19: Biophysique

Les unités souvent utilisées pour la mesure des pressions sanguines (l'unité légale étant le pascal) sont les mmHg pour les pressions artérielles et les cm H<sub>2</sub>O pour les pressions veineuses. Les valeurs normales sont approximativement les suivantes:

- Pression artérielle (systolique: 130 mmHg, diastolique: 80 mmHg)
- Pression veineuse moyenne : 10 cm H<sub>2</sub>O

1 cm H<sub>2</sub>O est la pression exercée par une colonne de 1 cm d'eau à 4 °C

$$1 \text{ cm H}_2\text{O} = 98.0638 \text{ Pascal} = 98.0638 \times 10^{-5} \text{ bar}$$

Ces pressions sont variables avec la posture (patient debout ou couché) et dépendant de l'endroit du corps où on les mesure: tête, thorax ou jambes. Si l'on considère, par exemple une pression artérielle moyenne (intermédiaire entre la systolique et la diastolique) de 100 mmHg, les répartitions pourront être les suivantes:

Patient couché			Patient debout
Pieds	Thorax	Tête	Tête 60 mmHg
100 mmHg	100 mmHg	100 mmHg	Thorax 100 mmHg
			Pieds 200 mmHg



## M19: Biophysique

Il existe donc une influence non négligeable de la pesanteur sur la répartition des pressions sanguines.

Ce phénomène est particulièrement important chez des cosmonautes en apesanteur et un séjour prolongé dans l'espace peut entraîner des perturbations hémodynamiques importantes.

### *b) La viscosité sanguine*

Dans les situations pathologiques, et notamment en cas de polyglobulie, la viscosité sanguine peut devenir très élevée, avec comme conséquence une augmentation parallèle des résistances mécaniques, étant donné que la viscosité intervient directement dans l'expression de la résistance mécanique. Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences graves sur la perfusion sanguine des tissus et sur l'apport d'oxygène par la circulation.

Une autre donnée relative à la viscosité sanguine concerne le caractère du sang. La présence de protéines et de cellules se traduit par deux phénomènes caractéristiques de la circulation sanguine (en régime laminaire) :

- Il existe une concentration plus élevée de globules rouges dans la partie centrale du vaisseau par rapport aux bords (concentration axiale des globules rouges);
- Sur les bords, en revanche, il existe une couche de protéines (couche de glissement) qui favorise l'écoulement et de ce fait le profil de la vitesse s'éloigne du profil parabolique théorique, valable pour un liquide newtonien.

## M19: Biophysique

### *c) Les régimes d'écoulement dans les vaisseaux*

Dans la majorité des vaisseaux, le régime circulaire est laminaire. Il n'existe en pratique que deux exceptions : le régime circulaire dans l'aorte au cours d'un effort, et le régime en aval d'une sténose vasculaire. Dans ces deux cas, on peut observer éventuellement un régime turbulent.

Dans le cas de l'aorte, on peut calculer la vitesse critique, celle qui rend possible (mais pas obligatoire) le régime turbulent, à partir de la formule de Reynolds : par exemple si

$$d = 2 \text{ cm}$$

$$\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

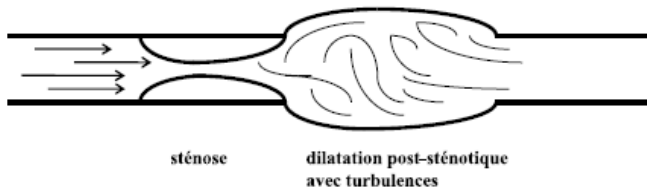
$$\eta = 4 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$\text{vitesse critique} = 50 \text{ cm/s}$$

Ainsi, la circulation dans l'aorte dans les conditions de repos (25 à 30 cm/s) s'effectue en régime laminaire. À l'effort, par contre, le débit cardiaque peut être multiplié par un facteur 4 (et donc également la vitesse circulaire moyenne) de telle sorte que la vitesse critique se trouve dépassée. Ce régime turbulent à l'effort se traduit à l'auscultation par un souffle innocent (sans rapport avec une cardiopathie congénitale) et une telle observation est fréquente chez des sujets jeunes et sportifs.

## M19: Biophysique

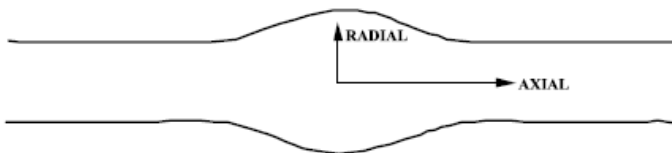
An niveau des sténoses vasculaires comportant une réduction importante du calibre des vaisseaux, il existe une accélération du flux (loi de la continuité) qui peut provoquer des turbulences à la sortie de la sténose (là encore on aura un souffle à l'auscultation).



### *d) Les effets des parois vasculaires*

Contrairement à ce qui se passe pour un tube rigide, dont le diamètre reste constant quelle que soit la pression qui s'exerce sur les parois, un vaisseau sanguin possède des parois souples qui peuvent se déformer lorsqu'arrive une onde de pression : ceci est particulièrement le cas pour les artères qui sont soumises à une circulation pulsée.

D'un point de vue physique, ce phénomène se traduit par l'existence d'une composante radiale de la vitesse circulaire, en plus de la composante axiale traditionnelle :



## M19: Biophysique

Le débit axial s'effectue en fonction de la chute de pression entre l'entrée et la sortie du segment vasculaire; le débit radial se traduit par une distension du vaisseau que l'on peut percevoir à la palpation.

## M19: Biophysique

### TD 1 : Radiation électromagnétiques

**I-** Un laser de puissance 2 watts (J/s) émet un rayonnement dont la longueur d'onde dans le vide est de 662 nm pendant 15 secondes

- 1) Calculer le nombre de photons émis pendant 10 secondes
- 2) Le rayonnement se situe dans quel domaine du spectre électromagnétique ?

**II-** On étudie l'absorption de la lumière par une solution renfermant deux composés A et B. Leurs masses moléculaires sont respectivement  $M_A = 200$  g/mol et  $M_B = 400$  g/mol.

Dans la solution la concentration en composé A est de 0.05 g/l et celle en B est de 0.06 g/l

Les coefficients d'extinction molaires sont :

Pour A : à 500 nm  $\epsilon_{500(A)} = 500 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  et à 450 nm  $\epsilon_{450(A)} = 1000 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

Pour B : à 500 nm  $\epsilon_{500(B)} = 2000 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  et à 450 nm  $\epsilon_{450(B)} = 3000 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

La largeur de la cuve est de 1 cm.

Quelle sera l'absorbance de la solution à deux longueurs d'onde : 500 nm et 450 nm?

**III-** Une solution de concentration 0.001 mol/l est placée dans une cuve de trajet optique de 2 cm. Le pourcentage de la lumière transmise est de 18.4% à 470 nm.

La masse moléculaire du soluté est de 215 g/mol.

Le solvant n'absorbe pas à 470 nm

Calculez le coefficient d'extinction molaire

## M19: Biophysique

### TD 2 : Propriétés électriques

- I- Soit une solution de phosphate tri-sodique a 20°C  
( $M = 164 \text{ g/mol}$ ) contenant 3.28 g/l.

Le tiers des molécules est dissocié dans une cuve munie de deux électrodes de  $7 \text{ cm}^2$  de surface, distante l'une de l'autre de 20 cm, et entre lesquelles règne une différence de potentiel de 10 volts. Le coefficient de frottement des anions est  $0.22 \times 10^{-11} \text{ kg/s}$ . calculez, pour les cations et pour les anions, les grandeurs suivantes

- 1- La concentration ionique équivalente
- 2- Les mobilités
- 3- Les coefficients de diffusion
- 4- Les densités de courant et les intensités de courant
- 5- Les conductivités et les résistivités.

- II- Des ions  $\text{Na}^+$  pénètrent à l'intérieur d'une cellule de  $1 \mu\text{m}^2$  de surface et d'épaisseur  $l = 100 \text{ \AA}$ .

- 1- Quelle sont les polarités de la membrane?
- 2- Si sa résistance est de  $10^{11} \Omega$  et la différence de potentiel de 90 mV, Calculer :
  - a) L'intensité du courant traversant la membrane.
  - b) La résistivité de la membrane
  - c) Le module du champ électrostatique entraînant les ions
  - d) Le nombre des ions traversant la membrane par seconde
- 3- Si la vitesse limite des ions est de l'ordre de  $10^7 \text{ m/s}$ , calculer la mobilité, les coefficients de diffusion et de frottement ainsi que la concentration équivalente.

## M19: Biophysique

### TD 1 : Dialyse et Osmolarité

I- On considère un rein artificiel. Le sang, de volume  $V_0$  à épurer, a une concentration uréique initiale  $C_0$  à  $t=0$  et  $C$  à  $t > 0$ . La concentration est uniformisée par la pompe cardiaque. La solution physiologique extérieure, de volume  $V_0'$ , à une concentration initiale nulle en urée et une concentration  $C'$  à l'instant  $t > 0$ .

La concentration dans la solution est également uniformisée et, à partir de  $t = 0$ , la formation d'urée est stoppée.

- 1- Cinq litres de sang contenant 3.8 g/l d'urée sont à épurer. Quel volume  $V_0'$  doit-on mettre dans le circuit épurateur pour que le sang ne contienne plus que 0.25 g/l après un temps long (considéré comme infini) ?
- 2-  $V_0'$  est infini et le sang ne contient plus que 1.9 g/l d'urée après 3 heures d'épuration à travers une membrane dialysante dont la surface totale des pores (de longueur égale à 0.5 mm) est égale à  $20 \text{ dm}^2$   
Quelle est la constante de diffusion de l'urée ?

II- L'osmolarité efficace du plasma d'un diabétique est égale à  $0.3 \text{ osmo/l}$

1- Quel abaissement cryoscopique va-t-on mesurer en présence d'une glycémie de 18 g/l ?

On admet que le glucose ( $M = 180 \text{ g/l}$ ) est seul en cause.

2- On dispose de 3 l de solution aqueuse : le premier litre contient 60 g de glucose, le seconde 9 g de NaCl (dont un quart est dissocié ; on donne  $M_{\text{NaCl}} = 58.44 \text{ g/mol}$ ) et le troisième 40 g d'albumine ( $M =$

## M19: Biophysique

$7.10^4$  g/mol). Les trois litres mélangés ensemble donnent un abaissement cryoscopique égale à  $-dt$ .

- a- Quel litre de solution faut-il choisir, pour qu'il donne, à lui seul, un abaissement voisin ?
- b- Comment se comporteraient les hématies dans la solution glucosidique ? Même question pour la solution de NaCl.
- c- Comment peut-on corriger les solutions (de NaCl, du glucose et de l'albumine) pour conserver correctement le sang ?

3- L'abaissement cryoscopique du plasma est égal à  $0.65$  °C chez un sujet en ébriété. Quel est le taux d'alcoolémie exprimé en g/l de sang ( $M= 46$  g/mol pour l'alcool) ?

4- Combien de grammes de NaCl doit-on dissoudre dans un litre d'eau distillée pour préparer un collyre sachant que la température de solidification du liquide lacrymal est de  $-0.89$  °C ? Même question avec le sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  complètement dissocié ( $M = 142$  g/mol).

III- On a dosé le sang d'un patient les éléments suivants :

$$[\text{Na}^+] = 152 \text{ mosmol/l} \quad [\text{K}^+] = 6 \text{ mosmol/l}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 3 \text{ mosmol/l} \quad [\text{Mg}^{2+}] = 2 \text{ mosmol/l}$$

$$[\text{glucose}] = 1 \text{ g/l} \quad [\text{Urée}] = 3.6 \text{ g/l}$$

$$[\text{Protéïnémie}] = 80 \text{ g/l} \quad \text{Hématocrite} : 49\%$$

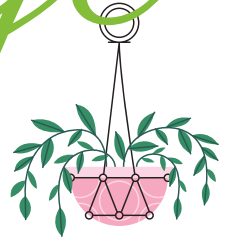
L'osmolarité totale du sérum de ce patient est de  $360$  mosmol/l

La masse molaire du glucose est  $180$  g/mol alors que celle de l'urée est  $60$  g/mol

- 1- Quelle est la concentration équivalente totale du plasma de ce patient?
- 2- Quelle est l'osmolarité efficace du sérum de ce patient ?



# Bon courage



## LIENS UTILES 🙌

### Visiter :

1. <https://biologie-maroc.com>

- Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. <https://biologie-maroc.com/shop/>

- Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
- Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
- Trouver des bourses et des écoles privées

3. <https://biologie-maroc.com/emploi/>

- Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
- Trouver des offres d'emploi et de stage

