

BCPST

1^{re} année

Joseph Segarra
Éric Chauvet
Céline Colson-Proch
Maxime Huille
Marie Labrousse
Florent Louet
Florence Metz
Emmanuel Piètre

PRÉPAS SCIENCES

COLLECTION DIRIGÉE PAR **BERTRAND HAUCHECORNE**

BIOLOGIE

Nouveau programme

Livre
en couleurs

- Cours complet conforme aux objectifs du programme
- Fiches de travaux pratiques intégrées au cours
- Nombreuses illustrations originales en couleurs
- Analyses de documents scientifiques corrigées
- Encarts pour développer une culture scientifique
- Techniques de biologie sous forme de fiches

ellipses

PRÉPAS SCIENCES

collection dirigée par **Bertrand Hauchecorne**

BCPST

1^{re} année

Biologie

nouveau programme

ouvrage coordonné par **Joseph SEGARRA**

Professeur en TB2, Lycée Pierre-Gilles de Gennes – ENCPB, Paris

Éric CHAUVET

*Professeur en TB1 et TB2, Lycée Marie Curie,
Marseille*

Céline COLSON-PROCH

Professeur en BCPST1, Lycée Limosin, Limoges

Maxime HUILLE

*Professeur en BCPST2, Lycée Camille Guérin,
Poitiers*

Marie LABROUSSE

*Professeur en BCPST1, Lycée Pierre-Gilles
de Gennes – ENCPB, Paris*

Florent LOUET

Professeur en BCPST1, Lycée René Descartes, Tours

Florence METZ

*Professeur en BCPST2, Lycée Jean-Baptiste Say,
Paris*

Emmanuel PIÈTRE

*Professeur en BCPST1, Lycée Champollion,
Grenoble*



Illustrations de Sophie Martinet - Cyrille Martinet (Atelier 55)

ISBN 978-2-7298-8537-3

© Ellipses Édition Marketing S.A., 2014
32, rue Bague 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

Un ouvrage conforme au nouveau programme, entièrement pensé pour faire progresser les élèves des classes préparatoires tout au long de l'année

■ **Biologie BCPST 1^{re} année** est conçu pour accompagner les étudiants des classes préparatoires aux grandes écoles BCPST et TB vers la maîtrise des connaissances du nouveau programme entré en vigueur à la rentrée 2013. Il s'attache particulièrement à prendre en compte l'état d'esprit de ce nouveau programme : une présentation des connaissances articulée avec des savoir-faire regroupant des compétences techniques et pratiques, des capacités de raisonnement et d'investigation et la mise à distance critique des savoirs.

Un ouvrage complet alliant cours, travaux pratiques et analyses de document, complémentaire des enseignements de la classe préparatoire

■ Cet ouvrage a vocation à être consulté en complément du cours de classe préparatoire, entre première et deuxième année ou au moment des révisions pour le concours. Ce livre présente non seulement les notions et données qui doivent être connues des étudiants, mais propose aussi des ressources et des clés pour mieux comprendre les mécanismes biologiques. Il s'adresse également aux étudiants de licence, à la recherche d'un ouvrage synthétique et pratique.

■ Pour chaque partie du programme, l'étudiant trouvera :

- **un cours complet** construit sur des faits et des résultats expérimentaux afin de développer la démarche scientifique et adapté aux besoins d'un étudiant de niveau Licence.
- **des travaux pratiques** : pour la première fois dans un ouvrage de ce type les travaux pratiques ne sont pas dissociés en des chapitres distincts, ils sont traités en fiches TP incluses dans le cours. L'objectif est de permettre à l'étudiant de faire la mise en relation directe des connaissances d'ordre pratique avec le traitement conceptuel du cours.
- **des analyses de documents** pour s'entraîner et réinvestir les concepts du cours. Ces documents comportant des données scientifiques et des résultats expérimentaux de toute nature sont proposés à chaque fin de chapitre pour se préparer aux épreuves écrites et orales du concours.
- **des fiches de présentation des principales techniques utilisées couramment en biologie.**

Une présentation claire, rigoureuse et adaptée aux besoins des étudiants

■ Pour aider les étudiants à progresser en classe préparatoire et à réussir les concours, l'ouvrage propose :

- **une iconographie privilégiant les documents photographiques** à la fois pour renforcer les connaissances concrètes, le sens de l'observation et préparer aux épreuves de travaux pratiques.
- **des schémas originaux** pour mieux comprendre les notions abordées, à utiliser pour les épreuves écrites et orales.
- **une mise en relation des savoirs et savoir-faire par de nombreux liens** entre chapitres qui contribuent à construire le réseau de connaissances.

- de nombreux encarts pour approfondir le cours et développer la culture générale de l'étudiant ;
- une synthèse des connaissances fondamentales et des capacités exigibles du programme pour aider les étudiants à faire le point sur leurs connaissances.

Une équipe d'auteurs parfaitement au fait des attentes des étudiants en classe préparatoire BCPST et des exigences des concours

- Les auteurs de l'ouvrage sont professeurs en classes préparatoires et/ou interrogateurs aux concours de la filière BCPST. Ils connaissent les exigences de la filière mais aussi les difficultés inhérentes à l'apprentissage de domaines scientifiques nécessitant une prise en compte de différentes échelles spatiales et temporelles. Exploitant leurs différents domaines d'expertise, ils ont eu à cœur de construire des cours fondés sur une démarche scientifique fondamentalement adossée à l'observation des phénomènes naturels.

Le programme de sciences de la vie et de la Terre de première et seconde années BCPST est disponible sur le site du *Bulletin Officiel* de l'Éducation nationale :
B.O.E.N. spécial n°1 du 23 janvier 2014.

Le programme de sciences de la vie et de la Terre et de biotechnologies de première et seconde années TB est disponible sur le site du *Bulletin Officiel* de l'Éducation nationale :
B.O.E.N. spécial n°1 du 23 janvier 2014.

<http://www.education.gouv.fr/pid285/le-bulletin-officiel.html>

Sommaire

Des molécules du vivant à la cellule : organisation fonctionnelle..... 1

Chapitre 1

L'eau et les petites molécules organiques	3
1. L'eau : une molécule minérale fondamentale du monde vivant	4
2. Les petites molécules glucidiques : oses et diosides	12
3. Les lipides.....	24
4. Les acides aminés et la liaison peptidique	40
5. Les nucléotides	50
6. Transformations chimiques dans les cellules et interconversions entre familles de petites biomolécules.....	57

Chapitre 2

Les macromolécules	69
1. Les macromolécules glucidiques : les polysides.....	70
2. Les acides nucléiques.....	82
3. Les protéines	92

Chapitre 3

Membrane et échanges membranaires	131
1. La membrane est une mosaïque moléculaire fluide.....	132
2. Les échanges transmembranaires sont divers.....	138
3. Les transferts de particules volumineuses sont couplés aux flux de membranes.....	151
4. La membrane plasmique permet des interactions mécaniques entre la cellule et son environnement	157
5. Les phénomènes membranaires sont essentiels dans la communication nerveuse.....	171

Chapitre 4

Les réactions chimiques du vivant	187
1. Thermodynamique des réactions biochimiques.....	188
2. Les enzymes, catalyseurs spécifiques des réactions biochimiques	193

Chapitre 5

Synthèses des principales biomolécules chez les eucaryotes	221
1. Panorama des biosynthèses cellulaires chez les eucaryotes	222
2. La biosynthèse des protéines chez les eucaryotes.....	226

Chapitre 6	
Métabolisme et formes d'énergie de la cellule	257
1. L'ATP, principale source d'énergie chimique dans la cellule	258
2. Du transfert électronique à la production d'ATP au sein des membranes transductrices d'énergie.....	264
3. Origine et diversité des types trophiques	289
Chapitre 7	
Métabolisme et transferts de matière dans la cellule	299
1. Fondements métaboliques de l'hétérotrophie	300
2. Fondements métaboliques de l'autotrophie.....	326
Chapitre 8	
Organisation fonctionnelle de la cellule : synthèse	353
1. Les cellules sont des volumes limités par une membrane plasmique	354
2. Toutes les cellules eucaryotes sont compartimentées et possèdent un cytosquelette	355
3. Les cellules eucaryotes et procaryotes sont parcourues par différents flux.....	364
4. Les cellules eucaryotes et procaryotes sont issues de divisions cellulaires.....	366
5. Les cellules eucaryotes proviennent de l'endosymbiose de cellules procaryotes	367
L'organisme, un système en interaction avec son environnement	381
Chapitre 9	
Regards sur l'organisme animal : l'exemple d'un ruminant, la vache	383
1. L'organisme animal se maintient en vie en échangeant de l'énergie et de la matière avec son environnement	384
2. L'organisme animal est capable de se reproduire	408
3. L'organisme animal interagit avec l'environnement : il perçoit des stimuli externes, se déplace et se protège	423
4. La communication entre les organes permet le bon fonctionnement de l'organisme animal.....	434
Chapitre 10	
Diversité des plans d'organisation chez les animaux et relations entre fonctions, milieux de vie et organismes	445
1. Les organismes animaux réalisent les mêmes fonctions.....	460
2. Les organismes animaux ont des structures fonctionnelles adaptées à leur milieu de vie	507
Chapitre 11	
Reproduction des organismes animaux et végétaux	521
1. La reproduction sexuée implique le rapprochement des gamètes en lien avec le milieu de vie	535
2. La reproduction sexuée aboutit à la formation d'un zygote par fécondation	568

3. La reproduction sexuée s'inscrit dans un cycle de développement	582
4. La reproduction asexuée est monoparentale et forme des clones	586

Chapitre 12

Acquisition du plan d'organisation d'un organisme animal au cours du développement embryonnaire : le modèle amphibien	601
1. De l'ovocyte à la cellule œuf : acquisition des axes de polarité et du plan de symétrie de l'embryon	602
2. La segmentation : acquisition de l'état pluricellulaire	611
3. La gastrulation : acquisition de l'état triblastique	616
4. L'organogenèse : acquisition du plan d'organisation primaire	625

Chapitre 13

Contrôles du développement embryonnaire des organismes animaux	645
1. L'induction embryonnaire, un processus de détermination des territoires et des cellules	646
2. L'acquisition de l'identité des territoires embryonnaires	660
3. La différenciation cellulaire, processus clé de l'organogenèse	669

La biodiversité et sa dynamique687

Chapitre 14

Génomique structurale et fonctionnelle	689
1. Le génome est l'ensemble de l'ADN d'une cellule	690
2. Le passage de l'ADN aux ARN est la première étape de l'expression de l'information génétique .	711
3. L'expression de l'information génétique est contrôlée	721

Chapitre 15

Duplication de l'information génétique et transmission par mitose	759
1. La duplication de l'information génétique : mécanismes de la réplication de l'ADN	760
2. La répartition équitable du matériel génétique chez les eucaryotes : la mitose	771

Chapitre 16

La diversification des génomes	799
1. Les mutations sont à l'origine de la diversification des génomes	800
2. La reproduction sexuée diversifie les combinaisons alléliques	806
3. Les transferts horizontaux participent également à la diversification des génomes	823

Fiches techniques841

Index 869

Table des TP et des fiches techniques

TRAVAUX PRATIQUES (intitulé du programme officiel)	FICHES TP ET FICHES TECHNIQUES CORRESPONDANTES DANS L'OUVRAGE	PAGE
--	--	------

Des molécules du vivant à la cellule : organisation fonctionnelle

Organisation fonctionnelle de la cellule	▶ Fiche technique 1. Étude de la cellule par microscopie optique (ou microscopie photonique)	842
	▶ Fiche technique 2. Étude de la cellule par microscopie électronique	844
	▶ Fiche technique 3. Étude de la cellule par immunocytochimie	846
	▶ TP 3.1. Les membranes en microscopie électronique	134
	▶ TP 3.2. Plasmolyse de cellules végétales	140
	▶ TP 3.3. Observation des cytoplastes	154
	▶ TP 3.4. Les MEC à différentes échelles d'observation	158
	▶ TP 3.5. Cytosquelette et jonctions d'une cellule animale	165
	▶ TP 8.1. Panorama de cellules observées au microscope optique et au microscope électronique à transmission	371
	▶ TP 8.2. Les organites des cellules eucaryotes	374
Nature, propriétés et techniques d'études des biomolécules	▶ Fiche technique 4. Chromatographie	848
	▶ Fiche technique 5. Électrophorèse	851
	▶ TP 1.1. Chromatographie de pigments photosynthétiques d'algues : comparaison entre une chlorophyte et une rhodophyte	62
	▶ TP 2.1. Électrophorèse des protéines : analyse et comparaison de profils de migration	115
Cinétique enzymatique et son contrôle	▶ TP 4.1. Bases de la cinétique enzymatique	210
	▶ TP 4.2. Contrôle de l'activité enzymatique	212

L'organisme : un système en interaction avec son environnement

Diversité des organismes pluricellulaires animaux		
– mammifère : souris	▶ TP 9.1. Les micro-organismes du tube digestif des mammifères	390
	▶ TP 10.1. Un animal vertébré mammifère : la souris domestique	446
	▶ TP 10.5. L'appareil digestif d'un vertébré mammifère (la souris)	461
	▶ TP 10.9. L'appareil cardio-respiratoire d'un vertébré mammifère (la souris)	473
	▶ TP 11.1. Structures et cellules impliquées dans la reproduction des mammifères	522

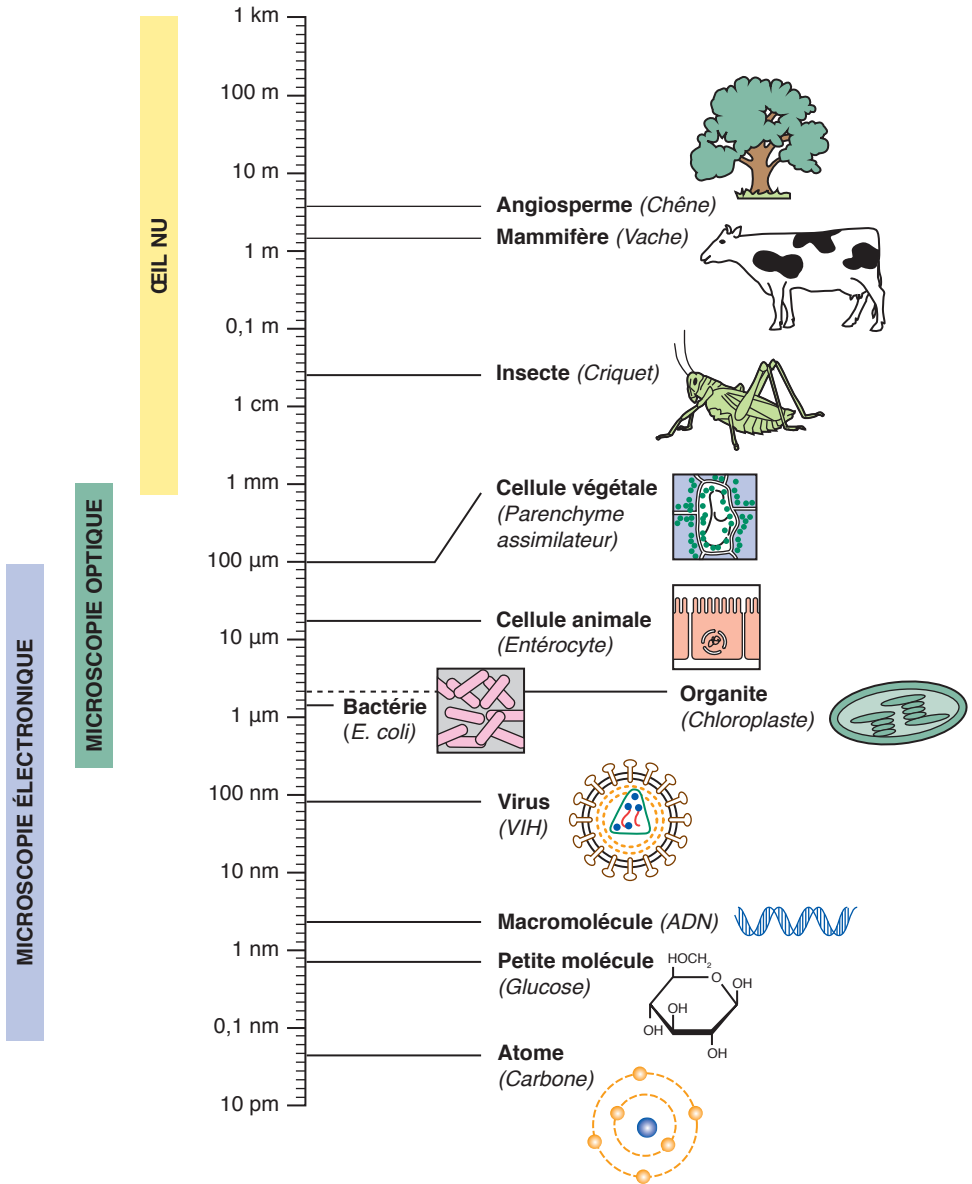
–poisson téléostéen	▶ TP 10.2. Un animal vertébré téléostéen : le maquereau	449
	▶ TP 10.6. L'appareil digestif d'un vertébré téléostéen (le maquereau)	464 475
	▶ TP 10.10. L'appareil cardio-respiratoire d'un vertébré téléostéen (le maquereau)	489
	▶ TP 10.14. L'appareil reproducteur d'un poisson téléostéen (le maquereau)	
– crustacé décapode : langoustine ou écrevisse	▶ TP 10.3. Un animal euarthropode crustacé décapode : l'écrevisse	451 465
	▶ TP 10.7. L'appareil digestif d'un euarthropode crustacé décapode (l'écrevisse)	477
	▶ TP 10.11. L'appareil cardio-respiratoire d'un euarthropode crustacé décapode (l'écrevisse)	489
	▶ TP 10.14. L'appareil reproducteur d'un poisson téléostéen (le maquereau)	501
	▶ TP 10.18. Le système nerveux d'un euarthropode crustacé décapode (l'écrevisse)	
–insecte : criquet	▶ TP 10.3. Un animal euarthropode crustacé décapode : l'écrevisse	451 467
	▶ TP 10.8. Pièces buccales d'un euarthropode hexapode insecte (le criquet)	480
	▶ TP 10.12. L'appareil respiratoire d'un arthropode hexapode insecte (le criquet)	492 504
	▶ TP 10.16. La reproduction d'un euarthropode hexapode insecte (le criquet)	
	▶ TP 10.19. Pièces locomotrices d'un euarthropode hexapode insecte (le criquet)	
Éléments d'histologie	▶ TP 9.2. Histologie de l'intestin des mammifères	396
	▶ TP 10.17. Le tégument, une structure de protection de l'animal	497
	▶ TP 11.1. Structures et cellules impliquées dans la reproduction des mammifères	522
Ontogenèse et reproduction		
Structures et cellules impliquées dans la reproduction	▶ TP 11.1. Structures et cellules impliquées dans la reproduction des mammifères	522 527
	▶ TP 11.2. Structures et cellules impliquées dans la reproduction des angiospermes	539
	▶ TP 11.4. Structures et cellules impliquées dans la reproduction des échinodermes	550
	▶ TP 11.5. Structures et cellules impliquées dans la reproduction du polypode	

Les fleurs des angiospermes	▶ TP 11.5. Structures et cellules impliquées dans la reproduction du polypode	550
	▶ TP 11.3. Diversité florale des angiospermes : constat et présentation	531
	▶ TP 11.6. Diversité florale et modes de pollinisation chez les angiospermes	560
	▶ Fiche technique 8. Détermination florale : utilisation d'une flore	863
Fruits et graines	▶ TP 11.7. Les fruits	574
	▶ TP 11.8. Les graines	577
	▶ TP 11.9. Dissémination des semences et convergences fonctionnelles chez les angiospermes	579
Multiplication végétative des angiospermes	▶ TP 11.10. Multiplication végétative des angiospermes	587
Développement embryonnaire des amphibiens	▶ TP 12.1. Les amphibiens, des animaux modèles en biologie du développement	603
	▶ TP 12.2. La fécondation et la segmentation	606
	▶ TP 12.3. La gastrulation	617
	▶ TP 12.4. La neurulation et l'organogenèse	626

La biodiversité et sa dynamique

Quelques outils pour l'étude des génomes	▶ Fiche technique 6. Les techniques d'hybridation des acides nucléiques	855
	▶ Fiche technique 7. Les techniques de transgénèse	859
	▶ TP 14.2. Étude d'électrophorèse de fragments de restriction dans le cadre d'un clonage	738
	▶ TP 14.3. Étude de la fonction du gène <i>Pea3</i> dans la mise en place des projections neuronales	745
Chromosomes, mitose, méiose	▶ TP 14.1. Étude des chromosomes eucaryotes	694
	▶ TP 15.1. Les phases de la mitose	774
	▶ TP 15.2. Importance du cytosquelette au cours de la division mitotique	778
	▶ TP 15.3. Contrôle du cycle cellulaire : étude de l'entrée en phase M	787
	▶ TP 16.1. Diversification des génomes chez les haploïdes	829
	▶ TP 16.2. Étude de la diversification des génomes chez les diploïdes par croisement test	832

Les échelles du vivant



**Des molécules
du vivant
à la cellule :
organisation
fonctionnelle**

Capacités exigibles

- ▼ Mettre en relation les caractéristiques d'une molécule avec ses propriétés, sa réactivité, sa stabilité et ses fonctions
- ▼ Décrire les transformations chimiques impliquant les fonctions des petites molécules
- ▼ Identifier la nature des réactions chimiques intervenant dans certaines voies métaboliques
- ▼ Représenter schématiquement certaines biomolécules (certains lipides, acides aminés, oses et nucléotides) en liaison avec leurs propriétés
- ▼ Connaître et reconnaître des voies de conversion d'une famille de molécules à une autre

L'eau et les petites molécules organiques

Introduction

- La biochimie est l'étude des constituants chimiques des êtres vivants et du rôle de ces différents constituants dans le fonctionnement des cellules. Bien que très diversifiés, tous les êtres vivants sont constitués de **substances organiques** et de **substances minérales : l'eau et les sels minéraux**. La **matière organique est fabriquée par les êtres vivants**, elle est constituée de molécules contenant du **carbone réduit**. Dans une liaison covalente de type C-H, le carbone est à l'état réduit, il a gagné des électrons, alors que dans une liaison C-O, le carbone est à l'état oxydé (ex : CO₂).
- L'analyse des éléments chimiques des êtres vivants révèle la présence des mêmes atomes dans des proportions comparables d'un être vivant à l'autre. Les **macroéléments** sont des éléments présents en grande proportion. Les quatre éléments les plus abondants des organismes vivants sont **l'hydrogène H, l'oxygène O, le carbone C et l'azote N** (par ordre décroissant d'abondance) qui ensemble représentent environ 99 % de la masse des cellules, dont une **très grande proportion d'eau**. Trois de ces éléments, H, C et N sont particulièrement abondants dans la matière vivante alors qu'ils sont présents en proportion très différentes dans la croûte terrestre, riche en silicium. La matière vivante est **construite sur le carbone**. Les autres macroéléments sont le sodium Na, le magnésium Mg, le potassium K, le calcium Ca, le phosphore P, le soufre S et le chlore Cl : ils sont présents en pourcentage faible. Les **oligoéléments** sont présents en très faible proportion, environ 0,1 % du total mais sont pourtant indispensables au bon fonctionnement des cellules. Cette catégorie comprend des métalloïdes : F (fluor), Br (brome), I (iode), B (bore)... et surtout des métaux : Fe (fer), Mg (magnésium, classé comme macroélément ou oligoélément selon les êtres vivants), Mn, Zn, Si, Al... Ces éléments sont souvent présents sous forme ionique.
- L'agencement des atomes en molécules et des diverses familles de molécules dans les cellules fonde l'unité biochimique de la matière vivante : la matière organique est constituée par des molécules réparties dans **des grandes familles biochimiques : les glucides, les lipides, les protides, les acides nucléiques**, l'ensemble correspondant à 10 à 30 % de la masse fraîche des êtres vivants.
- Une **petite molécule organique** est une substance organique de **faible masse moléculaire**, de 0,1 à 0,8 kDa. **Les petites molécules organiques comprennent les oses, les diosides, les lipides, les acides aminés, les nucléotides**.



Au vu de l'importance quantitative de l'eau chez les êtres vivants, quels sont ses rôles au regard de ses propriétés ? Comment sont organisées les petites molécules biochimiques ? Quels sont les rôles des petites molécules biochimiques dans le monde vivant en relation avec leurs propriétés et leurs particularités ?

1. L'EAU : UNE MOLÉCULE MINÉRALE FONDAMENTALE DU MONDE VIVANT

La Terre, « planète bleue », est recouverte d'océans pour 70 % de sa surface (formant l'hydrosphère), c'est une planète où la vie s'est développée. Notons que cette eau est majoritairement sous état liquide et que les recherches de forme de vie sur d'autres planètes, sur Mars par exemple, sont souvent liées à une recherche d'eau sous forme liquide. Notons également que selon les scénarios les plus vraisemblables, **les premiers organismes vivants sont apparus en milieu aqueux, dans les océans primitifs, il y a 3,8 milliards d'années.**

L'eau est la **substance la plus abondante des êtres vivants**, elle constitue 70 % ou plus de la masse fraîche de la plupart des formes de vie. Cependant, la proportion d'eau peut varier selon le type d'organisme considéré. Chez les végétaux, beaucoup peuvent présenter jusqu'à plus de 90 % d'eau (feuilles de salade, algues, jeunes feuilles...) alors que certains organes végétaux comme les graines ou certaines spores présentent au contraire une proportion d'eau très faible, seulement 20 %. Ce phénomène est à mettre en relation avec la **vie ralentie** de ces organes pendant une période « défavorable ». La reprise de **la vie active** sera associée à une **réhydratation** préalable. Chez les animaux, la proportion d'eau est d'environ 70 % lorsqu'il y a un squelette calcaire (qui a tendance à diminuer cette proportion). Chez certains animaux sans squelette comme les méduses la proportion en eau peut atteindre 98 %.

Chez les êtres vivants, le **maintien permanent de cette quantité d'eau** dans l'organisme est permis par un **équilibre des pertes et des apports d'eau**. Ces échanges sont cruciaux pour le maintien de la vie en milieu aérien, par définition déshydratant.

Dans les organismes uni- et pluricellulaires, l'environnement des substances est principalement **le milieu aqueux** (l'eau est contenue dans les cellules et baigne les cellules), l'eau est donc le milieu dans lequel s'effectuent le transport des substances, les réactions du métabolisme etc. Quelles sont les propriétés physiques et chimiques de l'eau intervenant dans la structure et le fonctionnement cellulaire? Comment expliquer ce lien entre la vie et l'eau?

► *Chapitre 10 : osmorégulation et milieu de vie*

1.1. DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN RELATION AVEC SON CARACTÈRE DIPOLAIRE

1.1.1. La molécule d'eau est un dipôle électrique

L'analyse de données physiques de l'eau et de différentes substances révèle des caractéristiques particulières de l'eau.

Tableau 1.1

Valeurs de température de fusion, température d'ébullition et chaleur de vaporisation de quelques solvants communs à la pression atmosphérique.

	Température de fusion (°C)	Température d'ébullition (°C)	Chaleur de vaporisation (kJ/ kg)
eau	0	100	2257
éthanol	-117	78	855
acétone	-95	56	532
benzène	6	80	394

Le point de fusion ou température de fusion est la température à laquelle une substance passe de l'état solide à l'état liquide.

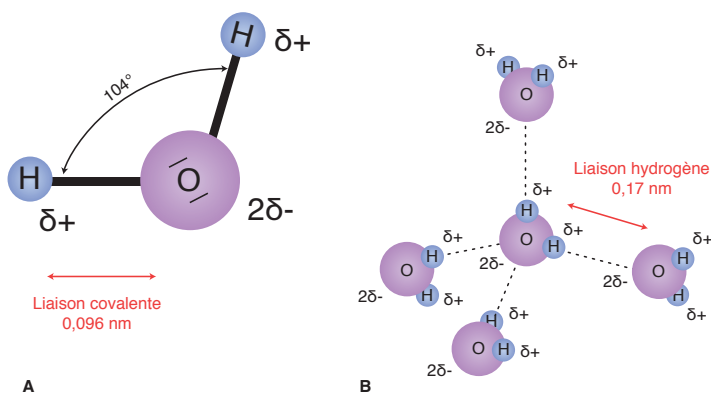
La température d'ébullition ou point d'ébullition est la température la plus élevée que peut atteindre un corps liquide avant de s'évaporer, sous forme gazeuse.

La chaleur (latente) de vaporisation est l'énergie nécessaire à température constante pour modifier l'état du solvant : de liquide à vapeur.

Le tableau 1.1 montre que l'eau possède une température de fusion, une température d'ébullition et une chaleur de vaporisation plus élevées que celles de la plupart des solvants communs, ce qui signifie qu'il faut fournir plus d'énergie pour passer d'un état physique à un autre. Ces données indiquent qu'il existe des forces puissantes d'attraction entre les molécules d'eau adjacentes, bien plus que pour les autres solvants. Ces forces donnent à l'eau, sous forme liquide, une grande cohésion interne. Les molécules d'eau sont liées entre elles et ces liaisons sont rompues lors des changements d'état solide → liquide et liquide → gaz car les molécules d'eau s'écartent dans l'espace, l'énergie apportée est utilisée pour rompre des liaisons chimiques.

La molécule d'eau, de formule H_2O , est formée par un atome d'oxygène lié par deux liaisons covalentes à deux atomes d'hydrogène (figure 1.1). L'atome d'oxygène présente deux doublets d'électrons non liants. La géométrie des paires d'électrons donne à la molécule une forme en V (tétraèdre avec deux liaisons covalentes et deux doublets non liants).

Figure 1.1
Organisation moléculaire de l'eau et réseau de molécules d'eau



A. modèle éclaté de la molécule d'eau B. réseau de molécules d'eau. — : doublet d'électrons non liant.

L'atome d'oxygène étant plus électronégatif que l'atome d'hydrogène, il attire les deux électrons de la liaison covalente et présente une charge partielle négative notée δ^- , ici doublée $2\delta^-$. Les deux atomes d'hydrogène présentent alors une charge partielle positive notée δ^+ chacun. Ainsi, bien que la charge nette d'une molécule d'eau soit nulle, les électrons sont distribués de façon asymétrique, ce qui rend la **molécule polaire** avec un pôle + formé par les atomes d'hydrogène et un pôle - formé par l'atome d'oxygène. La molécule d'eau est donc un **dipôle électrique**.

En raison de cette séparation de charges, les molécules d'eau peuvent s'attirer l'une l'autre grâce aux forces électrostatiques s'exerçant entre les charges négatives partielles sur l'oxygène d'une molécule d'eau et la charge positive partielle sur l'hydrogène d'une autre molécule. Ce type d'**interaction électrostatique** est appelée **liaison hydrogène** (figure 1.1).

Les liaisons hydrogène ont une force 20 fois inférieure à celle d'une liaison covalente, ce sont des **liaisons faibles**. Les molécules d'eau s'assemblent ainsi de manière transitoire en un réseau de liaisons hydrogène (figure 1.1). À 0°C , toutes les molécules d'eau sont liées à quatre autres. Lorsque la température augmente, certaines liaisons sont rompues, mais même à 37°C , 15 % des molécules d'eau sont liées à quatre autres en un assemblage éphémère connu sous le nom de « groupe vacillant ». La structure gazeuse est atteinte lorsque toutes les molécules sont indépendantes ($T \geq 100^\circ\text{C}$).

Encart 1.1 Les liaisons et interactions chimiques

La plupart des liaisons entre atomes qui interviennent dans les biomolécules sont réparties en deux groupes. Les termes « forte » et « faible » se rapportent à la quantité d'énergie nécessaire pour former et rompre ces liaisons, d'où leur stabilité relative.

► Les liaisons covalentes, liaisons fortes (en énergie)

Dans cette liaison, chacun des atomes met **en commun un ou plusieurs électrons** afin de former un ou plusieurs doublet(s) d'électrons liant les deux atomes. La liaison covalente implique généralement le partage équitable d'une seule paire d'électrons, le(s) doublet(s) liant(s). Chaque atome fournissant un électron, la paire d'électrons est délocalisée entre les deux atomes. Le partage de deux ou trois paires d'électrons s'appelle respectivement liaison double et liaison triple. La rupture d'une liaison covalente est un processus consommant de l'énergie tandis que la formation d'une liaison covalente est un processus libérant de l'énergie. Ces énergies sont élevées, de l'ordre de **quelques centaines de kJ.mol⁻¹** et dans les conditions cellulaires ces **liaisons sont stables**. Plus le nombre de liaisons augmente, plus leur rupture requiert de l'énergie. Notons que lors d'une réaction chimique, plusieurs liaisons covalentes peuvent être rompues ou formées.

Lorsque la liaison covalente s'établit entre des atomes d'**électronégativité différente**, la répartition des électrons dans la liaison ne sera pas exactement symétrique, **la liaison covalente est alors polarisée**. La direction de la polarisation est donnée par des charges partielles (δ^+ pour l'atome le moins électronégatif et δ^- pour le plus électronégatif). Plus la différence d'électronégativité est grande entre les atomes, plus les charges partielles sont élevées : la liaison est polarisée et a un caractère « ionique ».

Dans le métabolisme cellulaire, les réactions de **synthèse de biomolécules et de macromolécules** dans l'**anabolisme** font intervenir la **formation de liaisons covalentes** et à l'inverse, les réactions de dégradation dans le **catabolisme** consistent à **rompre ces liaisons covalentes**. Ces réactions impliquent des enzymes.

► Les liaisons non covalentes, liaisons faibles (en énergie)

Ces liaisons d'**origine électrostatique** sont en général nettement moins fortes que les précédentes, leur énergie est de l'ordre de **quelques dizaines de kJ.mol⁻¹** à quelques centaines de kJ.mol⁻¹ (pour les liaisons ioniques). La présence d'eau abaisse généralement l'énergie de ces liaisons (**tableau encart 1.1**).

Liaison hydrogène (ou liaison H)

C'est une liaison qui se forme **entre un atome d'hydrogène** engagé dans une liaison covalente polarisée, donc porteur d'une charge électrique partielle δ^+ , et un atome lui aussi engagé dans une liaison covalente polarisée et porteur d'une charge électrique partielle δ^- , généralement **O, N ou S** dans la matière vivante.

Liaison ionique

C'est une liaison qui s'établit entre atomes présentant une forte différence d'électronégativité. Il y a alors transfert d'un ou de plusieurs électrons de l'atome le moins électronégatif vers celui qui est le plus électronégatif pour former respectivement un ion chargé positivement, un **cation** et un ion chargé négativement, un **anion**. C'est le phénomène d'ionisation (ex : Na⁺ et Cl⁻). Les liaisons ioniques ont une énergie qui les rapproche des liaisons covalentes (**tableau encart 1.1**).

Liaison ou interaction de van der Waals

Ce sont des liaisons de type électrostatique provoquées par la distribution asymétrique des électrons autour du noyau atomique. Ces forces jouent un rôle essentiel en limitant le nombre de conformations possibles d'une molécule ou d'une macromolécule.

Liaison ou interaction hydrophobe

Une substance hydrophobe est une substance qui repousse l'eau ou est repoussée par l'eau. L'eau contraint les **groupements hydrophobes** à se regrouper. Ces groupements sont ainsi maintenus ensemble par des interactions dites « hydrophobes », même si l'attraction est en fait provoquée par une répulsion de l'eau.

Type de liaison	Longueur de la liaison en moyenne (en nm)	Energie de la liaison (en kJ.mol ⁻¹) dans le vide et dans l'eau	
covalente	0,15	Quelques centaines	
hydrogène	0,3	40	10
ionique	0,25	100	40
Van der Waals	0,3 à 0,5	10	10
hydrophobe	0,35	20	30

Tableau encart 1.1

Caractéristiques des principales liaisons chimiques

Plus une liaison est forte, plus sa longueur est courte. En milieu aqueux, les liaisons faibles sont de **faible énergie et instables**, elles sont facilement formées et rompues, elles permettent donc des **interactions réversibles**. Elles interviennent dans la structuration, la **conformation des biomolécules** et des macromolécules par des **liaisons intramolécules**. Leur caractère réversible est responsable de la souplesse des modifications de conformation au cours des phénomènes d'allostérie et de coopérativité. La rupture de ces liaisons faibles peut expliquer la perte de fonction par dénaturation des macromolécules et notamment des protéines. Ces liaisons faibles interviennent dans les interactions de molécules et de macromolécules entre elles, ce sont alors des **liaisons intermolécules**, intervenant dans des phénomènes d'association formant des **édifices macromoléculaires ou supramoléculaires** très volumineux, de reconnaissance entre macromolécules, de catalyse enzymatique.

➤ Chapitre 2 (3.3, 3.4) : organisation tridimensionnelle flexible des protéines

1.1.2. Propriétés physiques et de solvant

1.1.2.1. Propriétés physiques

L'eau présente une **tension superficielle**. En effet, à la surface eau / air, l'eau se trouve dans un état local dont l'énergie légèrement supérieure est responsable d'une **certaine rigidité**. L'origine de cette énergie est la force de cohésion entre les molécules d'eau. Cet effet permet à un objet léger de se maintenir à la surface d'un liquide. Cela permet par exemple à certains insectes de se déplacer sur l'eau.

➤ BCPST 2^e année : mécanisme de circulation de la sève brute

L'eau est capable de remonter contre la gravité dans un tube très fin, dit tube capillaire, c'est le **phénomène de capillarité**. Plus les molécules du liquide ont une cohésion forte, plus le liquide est susceptible d'être transporté par capillarité. Ce phénomène est lié à la forte tension superficielle de l'eau : les molécules d'eau adhèrent aux surfaces du tube, puis ses molécules sont attirées sur la partie de la surface du tube immédiatement au-delà, etc. La capillarité intervient pour l'**ascension spontanée de la sève brute** dans les vaisseaux très fins du xylème.

➤ BCPST 2^e année : modalités de la ventilation pulmonaire chez les mammifères

Cette capillarité a tendance à **refermer les alvéoles pulmonaires** qui peuvent se collapser. Les alvéoles sont recouvertes d'un **surfactant** de nature lipidique, ce qui empêche le collapsus. L'eau peut être caractérisée par un potentiel thermodynamique, noté Ψ_h et **appelé potentiel hydrique** dont une des composantes est le **potentiel osmotique** $\Psi\pi = -R.T.C_{osm}$ (C_{osm} = concentration en solutés osmotiquement actifs).

➤ Chapitre 3 (2.1.1.1) : membranes et échanges d'eau



La pression osmotique $\pi = -\Psi\pi = R.T.C_{osm}$ varie en sens inverse du potentiel osmotique $\Psi\pi$.

1.1.2.2. Propriétés de solvant

Cette propriété, fondamentale pour le vivant, est en relation avec le **caractère polaire des molécules d'eau** et donc de leur capacité à établir des **liaisons hydrogène** avec les différentes molécules. En conséquence, l'eau affaiblit les interactions électrostatiques entre les autres molécules (**tableau encart 1.1**).

Par définition, les **molécules hydrophiles** peuvent former des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau et sont relativement **solubles dans l'eau**. À l'opposé, les molécules qui n'ont pas cette capacité sont des **molécules hydrophobes**.

L'eau est un excellent **solvant pour les substances présentant des groupements chargés ou polarisés** (**encart 1.2**). L'eau peut ainsi dissoudre facilement les sels cristallins comme le chlorure de sodium NaCl constitué d'ions Na^+ et Cl^- . Ces derniers se détachent du réseau cristallin pour former des ions hydratés Na^+ et Cl^- en solution. C'est aussi un solvant pour de **nombreux composés organiques neutres avec des groupes fonctionnels polaires** : -OH, -CHO, -CO, -COOH, $-\text{NH}_2$ (**encart 1.2**). C'est le cas par exemple des glucides avec leurs fonctions aldéhyde, cétone, alcool, qui forment des liaisons hydrogène avec l'eau (**figure 1.2**). Enfin, certaines **molécules amphiphiles ou amphipathiques** possédant à la fois des groupes hydrophobes ou « queues hydrophobes » et des groupes hydrophiles ou « têtes hydrophiles ».

► **Même chapitre (3.1, 3.3 et 3.4) :**
acides gras, lipides amphiphiles
constituant les membranes

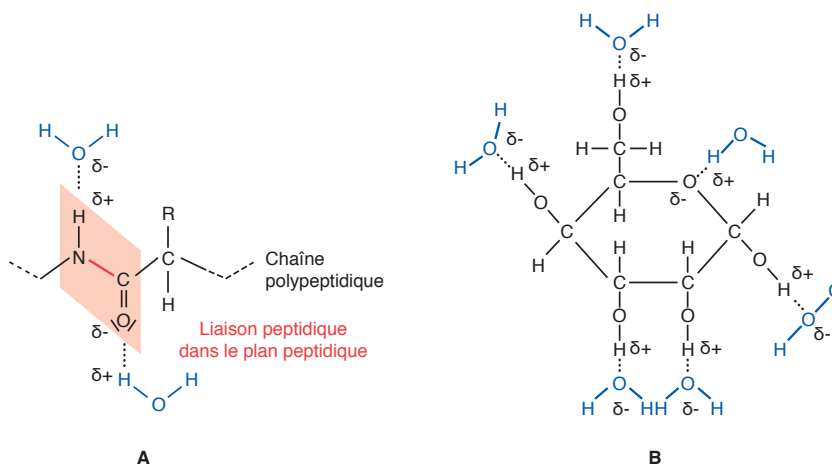
! Ne pas confondre polaire avec hydrophile et apolaire avec hydrophobe ; les deux termes ne sont pas équivalents. L'un concerne la polarité de la liaison covalente (différence d'électronégativité entre les deux atomes) et l'autre les possibilités d'interaction avec l'eau. Un groupement polaire en milieu aqueux est alors hydrophile puisque des interactions sont possibles.

Les interactions hydrophobes constituent une force essentielle dans l'acquisition de la **conformation des macromolécules** : les parties hydrophobes seront orientées de façon à être isolées du milieu aqueux alors que les parties hydrophiles seront orientées de façon à se retrouver au contact des molécules d'eau et à interagir avec elles. Ces forces interviennent aussi dans les interactions telles que les **liaisons enzyme-substrat** ou les **liaisons hormone-récepteur** par exemple.

► **Chapitre 2 (3.3.4.1) :**
complexes protéine-ligand

Figure 1.2

Les molécules d'eau forment des liaisons hydrogène avec différentes substances organiques



A. Liaisons hydrogène entre l'eau et une chaîne polypeptidique B. une molécule de glucose
... : liaison hydrogène

Encart 1.2 Principaux groupes fonctionnels des biomolécules

Dans le tableau, les charges partielles des liaisons covalentes polaires sont indiquées en bleu. Les groupes fonctionnels ayant la capacité de s'ioniser sont indiqués.

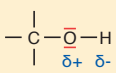
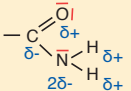




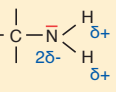
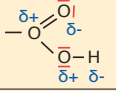
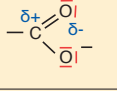
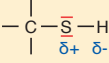
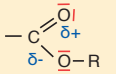
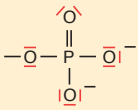
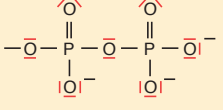
Nom	Groupe fonctionnel	Nom	Groupe fonctionnel
Hydroxyle		Amide	
Carbonyle	  Aldéhyde  Cétone	Amine	 
Acide carboxylique / Carboxylate	 	Thiol	
Ester		Phosphate	
	$\delta+$: charge partielle positive $\delta-$: charge partielle négative — : doublet d'électrons non liant	Pyrophosphate	

Figure encart 1.2
 Les différents groupes fonctionnels des biomolécules

1.2. DES PROPRIÉTÉS IONIQUES

1.2.1. L'ionisation de l'eau pure

L'eau présente une tendance à s'ioniser selon l'équation $2 \text{H}_2\text{O} = \text{OH}^- + \text{H}_3\text{O}^+$. Pour l'eau pure dans les conditions standards (25°C), le pH est de 7.

Dans les cellules eucaryotes, le pH des solutions aqueuses est de **7,2 en moyenne**, en particulier **dans le cytosol**. Cependant, le pH de certains compartiments peut être plus acide que le cytosol (lumière du thylakoïde des chloroplastes, espace intermembranaire des mitochondries, lumière des lysosomes). Les cellules sont capables de **produire des solutions acides** en transférant des protons dans un compartiment.

1.2.2. L'ionisation de l'eau en présence d'acide et de base

Dans les milieux aqueux biologiques, de nombreuses substances influencent le pH. Un donneur de protons et son accepteur de protons correspondant constituent une paire conjuguée acide / base. Chaque acide est caractérisé par sa tendance à perdre ses protons en solution aqueuse. Plus un acide (HA) est fort plus, il a tendance à perdre ses protons et à former sa base conjuguée (A^-). $\text{HA} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{A}^-$, l'équilibre dépend d'une constante

$$\text{d'équilibre } K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{A}^-]}{[\text{HA}]}, \text{ donnée par le pKa.}$$

Ⓢ L'échelle de pH désigne la concentration de H_3O^+ , $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$.

Ⓢ $\text{pKa} = -\log K_a$.

En présence d'un acide, le pH de la solution est inférieur à 7. En présence d'une base, le pH de la solution est supérieur à 7. Les milieux aqueux des êtres vivants comportent en général des **systèmes tampons** (mélanges de couples acide/base faibles) **limitant les variations de pH**.

1.3. ÉTATS ET RÔLES MULTIPLES DE L'EAU DANS LA MATIÈRE VIVANTE

1.3.1. États de l'eau dans les organismes vivants

Il existe plusieurs catégories d'eau distinguées suivant la difficulté d'extraction de l'eau :

- **l'eau libre**. Cette eau peut être **circulante** comme l'eau du plasma du sang, de la sève brute, de la sève élaborée. Elle peut aussi être capillaire lorsqu'elle occupe des interstices entre les cellules : c'est le **liquide extracellulaire**. Cette eau libre correspond également au **liquide intracellulaire**.
- **l'eau d'imbibition**. C'est l'eau **fortement liée aux molécules**, principalement aux macromolécules hydrophiles, elle forme des **gels**. C'est par exemple le **mucus** des animaux, les **mucilages** chez les végétaux, l'eau des **matrices extracellulaires animales et végétales**.
- **l'eau liée ou eau de constitution** qui entre dans la **composition des molécules**. Son départ entraîne la dénaturation des molécules.

Chez les végétaux, la cellule comporte un vaste compartiment rempli d'une solution aqueuse : la **vacuole**. La cellule est **turgescence** lorsque sa vacuole est gonflée d'eau et exerce une pression sur la paroi résistante. La turgescence confère en grande partie la **forme des cellules végétales**. En l'absence de paroi, la cellule éclaterait. Chez certains animaux comme les méduses par exemple, certains tissus gorgés d'eau forment un hydrosquelette.

1.3.2. L'eau intervient directement ou indirectement dans de nombreuses réactions biochimiques

1.3.2.1. L'eau intervient indirectement dans les réactions biochimiques grâce à son rôle de solvant

La plus grande partie des réactions biochimiques se réalise en **milieu aqueux**, l'eau est ainsi le **milieu réactionnel fondamental chez les êtres vivants**. Ce milieu aqueux où les molécules coexistent et où elles sont libres de **diffuser** et de se rencontrer facilite les réactions biochimiques et toutes sortes d'interactions. Cependant, l'eau **affaiblit les interactions entre molécules polaires**, elle peut empêcher les molécules de se rencontrer. Certains systèmes biologiques ont mis en place des **microenvironnements où l'eau est exclue** et où les molécules polaires peuvent interagir facilement dans des « **poches hydrophobes** ». C'est le cas dans certains sites actifs d'enzymes.

1.3.2.2. L'eau intervient directement dans certaines réactions où elle joue le rôle de substrat ou de produit

De nombreuses réactions biochimiques consistent en une dégradation par addition de molécules d'eau : ce sont les **réactions d'hydrolyse**. Par exemple, la dégradation du saccharose en glucose et fructose est une hydrolyse. Inversement, des synthèses biochimiques se font par départ de molécules d'eau : ce sont les **réactions de condensation**. Par exemple, la synthèse d'amidon se fait par condensation de glucoses, avec élimination d'une molécule d'eau pour chaque glucose incorporé dans la molécule d'amidon. La synthèse peptidique à partir des acides aminés se fait également par condensation.

► *Chapitre 2 (1.2.1.3) :
pectines*
► *Chapitre 3 (4.1) :
matrices
extracellulaires
animales et végétales*

► *Chapitre 3 (TP 3.2) :
turgescence-
plasmolyse
des cellules végétales*

► *Chapitre 2 (3.3.4.3) :
site actif d'une enzyme
et catalyse
enzymatique*

► *Chapitre 2 (1.1.1
et 1.1.2) : amidon
et glycogène, glucides
de réserves*
► *Chapitre 5 (2.2.3.2) :
élongation
d'une chaîne
polypeptidique
au sein du ribosome*

⊕ E^0 est le potentiel d'oxydo-réduction ou potentiel redox standard dans les conditions biologiques, exprimé en Volts. Plus cette valeur est élevée pour un couple oxydant / réducteur, plus l'oxydant est fort.

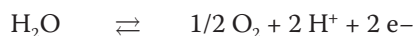
➤ *Chapitre 6 (2) : chaînes de transferts d'électrons respiratoire et photosynthétique*

⊕ La **capacité thermique massique de l'eau** est la quantité d'énergie nécessaire pour élever un gramme d'eau d'un degré à la pression atmosphérique normale : $4,186 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

⊕ Une **solution** est un liquide contenant des espèces sous forme solvatée. Le liquide est le solvant, les espèces dissoutes sont les solutés. Une **suspension** est la dispersion d'un solide insoluble et finement divisé, c'est-à-dire de particules, dans un milieu liquide, c'est un mélange hétérogène. Une **émulsion** est un mélange de deux substances liquides non miscibles, comme l'eau et l'huile, **ce dernier étant dispersé sous forme de fines gouttelettes.**

La molécule d'eau intervient également dans des **réactions d'oxydoréduction**, puisque la molécule d'eau peut être donneuse ou accepteuse d'électrons. L'eau intervient en effet dans le couple redox : $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$ ($E^0 = + 0,81 \text{ V}$) :

Oxydation (réaction cédant des électrons)



Réduction (réaction captant des électrons)

De nombreuses réactions d'oxydoréduction font intervenir la molécule d'eau. En biologie, une **réduction** est bien souvent une **hydrogénation**. Au cours de la photosynthèse, l'eau est le **donneur d'électrons initial** de la **chaîne d'oxydoréduction photosynthétique**. Au cours de la respiration, il y a formation d'eau à partir du dioxygène : ce dernier est en effet **l'accepteur final d'électrons** de la **chaîne d'oxydoréduction respiratoire**.

1.3.3. L'eau intervient dans la régulation thermique des êtres vivants

L'eau présente une **capacité thermique massique c (ou chaleur spécifique) élevée**, cette propriété permet d'amortir les variations de température extérieure de l'environnement et stabilise la température chez les êtres vivants, constitués majoritairement d'eau. L'eau joue ainsi un rôle de **tampon thermique**.

De plus, l'**enthalpie de vaporisation** de l'eau étant élevée ([tableau 1.1](#)), l'évaporation de l'eau permet un **refroidissement**. Ces propriétés permettent aux organismes animaux et végétaux d'**évacuer de la chaleur par évaporation** au niveau des surfaces épidermiques (peau, feuilles).

1.3.4. L'eau est un milieu de transport

La combinaison de la **capacité à contenir des substances hydrophiles** et de la **cohésion de l'eau** permet un **transport de molécules** en solution ou en suspension dans l'eau.

Cela permet chez les végétaux l'ascension de l'eau et des solutés constituant la **sève brute** depuis les racines jusqu'aux feuilles. Elle permet également la circulation de la sève élaborée. Chez certains animaux, le sang riche en eau permet de transporter nutriments et déchets du métabolisme. Une rupture de la cohésion des molécules d'eau dans les systèmes de circulation, par apparition d'une bulle d'air dans le sang ou la sève brute, entraîne un blocage de la circulation : c'est **l'embolie gazeuse**.



L'eau est un constituant quantitativement important du cytoplasme des cellules, des milieux extracellulaires et des organismes dans leur ensemble. Son abondance dans les vacuoles des cellules végétales permet la turgescence cellulaire et intervient dans la forme.

L'eau est le milieu réactionnel des êtres vivants. Bien que substance minérale, elle intervient dans de nombreux phénomènes biologiques : réactions biochimiques d'oxydoréduction, d'hydrolyse, de condensation ([figure 1.3](#)), transport de substances, régulation thermique.