

1 – INTRODUCTION À LA CHIMIE ORGANIQUE ET À LA BIOCHIMIE

LA BIOCHIMIE est un domaine à la frontière entre la chimie et la biologie, qui s'intéresse aux processus chimiques à l'œuvre dans les systèmes biologiques. Son étendue est vaste et recouvre :

- la description des molécules qui composent les êtres vivants (lipides, glucides, acides aminés, etc),
- la description de structures moléculaires complexes (parois cellulaires, protéines, polysaccharides, etc),
- l'étude des réactions chimiques au sein des êtres vivants (métabolisme et catabolisme),
- la description des interactions entre les structures moléculaires au sein des êtres vivants.

Ce dernier point est à la frontière d'une autre discipline fondamentale, la biophysique, qui s'intéresse aux processus physiques qui interviennent dans le fonctionnement des êtres vivants, dont la liste est trop longue pour être entièrement donnée ici (elle n'est de toute façon pas connue dans son intégralité). On peut citer de façon non limitative :

- des processus mécaniques (résistance des parois, circulation des fluides tel le sang, mouvements internes telles la contraction d'un muscle ou la rotation d'un flagelle, mouvement global, etc),
- des processus électriques (polarisation des fibres nerveuses, poissons électriques, etc),
- des processus thermodynamiques (transferts énergétiques, stockage d'énergie chimique, etc),
- des processus optiques (vision) ou acoustiques (audition).

Il n'est pas exagéré de dire qu'un être vivant n'est rien d'autre qu'une structure moléculaire complexe régie par des lois physiques tout à fait ordinaires. Ce point de vue, dorénavant évident pour tous les biologistes, est relativement nouveau. Le premier à l'avoir énoncé est le physicien Erwin SCHRÖDINGER, un spécialiste de physique quantique et lauréat du prix Nobel en 1933 pour ses contributions majeures à cette discipline, dans un livre visionnaire : *What Is Life ?*, paru en 1944 (*Qu'est-ce que la vie ?* disponible dans la collection Point Sciences). Néanmoins, la complexité est telle qu'il n'est actuellement pas envisageable de réduire l'étude d'un organisme vivant à un ensemble d'équations qu'on pourrait résoudre pour comprendre et prédire son fonctionnement. Il est cependant fructueux de modéliser des processus biologiques d'échelle plus modeste (un nerf, un neurone, une articulation, le phénomène de la vision, etc) à l'aide des outils de la physique et de la chimie. Notons qu'à l'inverse, l'étude des systèmes biologiques a été à l'origine de développements inattendus et originaux tant en chimie qu'en physique. Par exemple, l'un des domaines actifs de la chimie est la chimie supramoléculaire, dont l'un des pionniers est le chimiste français Jean-Marie LEHN, prix Nobel en 1987. Cette discipline vise à concevoir et réaliser des systèmes chimiques complexes permettant la réalisation d'une fonction : accélération d'une réaction (enzyme artificielle), conversion d'énergie (imitant par exemple le mécanisme de la vision), etc, en s'inspirant de systèmes biologiques. Autre exemple : l'élucidation de la formation des taches du léopard ou des rayures du tigre a donné lieu à des études physiques originales.

Le but de ce chapitre introductif est de présenter les outils de base de la chimie, qui seront utiles dans le cours de biochimie. Dans un premier temps, on fera des rappels de chimie organique : structure des molécules organiques, groupes fonctionnels, nomenclature, et convention de représentation. Dans un deuxième temps, on décrira les principaux groupes de molécules intervenant dans les processus biochimiques.



Erwin SCHRÖDINGER (1887 - 1961)
physicien autrichien



photo : Martina Steiner
Jean-Marie LEHN (né en 1937)
chimiste français

Plan du chapitre

1 Introduction	3
1.1 Qu'est-ce que la chimie organique ?	3
1.2 Origine des molécules organiques	3
1.3 Enjeux de la chimie organique actuelle	4
1.4 Intérêt de la chimie organique pour la biochimie	4
2 Présentation des molécules organiques	5
2.1 Valence des atomes et multiplicité des liaisons	5
2.2 Hydrocarbures et squelette carboné des molécules organiques	6
2.3 Groupes fonctionnels	10
3 Principales familles de molécules en biochimie	14
3.1 Glucides : oses et osides	15
3.2 Acides aminés, peptides et protéines	17
3.3 Lipides	18
3.4 Nucléosides, nucléotides et acides nucléiques	19
4 Annexes	22
4.1 Les acides α -aminés courants	22
4.2 Les nucléosides courants	23

Programme officiel – Premier semestre – **Thème C – constitution et transformations de la matière**

C.1.3 Constitution et caractérisation spectroscopique d'entités chimiques organiques et intervenant dans la chimie du vivant.

NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
Familles d'entités chimiques organiques Familles fonctionnelles en chimie organique : amine, amide, cétone, aldéhyde, alcool, thiol, ester, acide carboxylique, hémiacétal et acétal, anhydride phosphorique. Familles d'entités chimiques intervenant dans la chimie du vivant : • sucres (ou oses) et autres glucides ; • acides gras, triglycérides, phosphoglycérides et autres lipides ; • acides aminés, peptides et protéines ; • nucléosides, nucléotides, acides nucléiques.	Reconnaître et nommer les familles fonctionnelles présentes dans la représentation d'une entité chimique. Reconnaître et nommer la famille à laquelle appartient une entité chimique intervenant dans la chimie du vivant.

Vidéo introductive à la chimie organique : <https://go.screenpal.com/watch/crjwbwVQqAq>

Vidéo d'entraînement à la représentation plane des molécules organiques :

<https://go.screenpal.com/watch/c3QeDHVTL34>

L'auteur du présent document vous autorise à le partager, reproduire, distribuer et communiquer selon les conditions suivantes :



- BY** Vous devez le citer en l'attribuant de la manière indiquée par l'auteur (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'il approuve votre utilisation de l'œuvre).
- NC** Vous n'avez pas le droit d'utiliser ce document à des fins commerciales.
- SA** Vous avez le droit de le modifier, de le transformer ou de l'adapter, sous les mêmes conditions de partage et d'utilisation que le présent document.

Consulter la licence creative commons complète en français :

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr>

1 Introduction

1.1 Qu'est-ce que la chimie organique ?

La chimie organique est, à l'origine, la chimie des molécules du monde vivant. Elle était initialement considérée comme un domaine séparé de la chimie inorganique. En 1835, la synthèse de l'urée (composé isolé d'organismes vivants) a été réalisée par Wöhler à partir de composés inorganiques, montrant par là qu'il n'existe pas de distinction fondamentale entre les deux domaines. On appelle aujourd'hui chimie organique la chimie des composés hydrocarbonés, c'est-à-dire comportant du carbone et de l'hydrogène lié au carbone. Il existe des composés carbonés non organiques : CO_2 , CO , CS_2 , les ions carbonate CO_3^{2-} et hydrogencarbonate HCO_3^- (dans lequel H est lié à O, et non à C).

Les molécules organiques comportent toujours C et H, extrêmement souvent O et N, parfois S et P. Des molécules aujourd'hui indispensables, mais rares dans la nature, comprennent des halogènes : Cl (des insecticides), Br, I. Enfin, des atomes non métalliques tels B, Si, ou métalliques comme Na, Mg, Hg, Zn, Cd, Pb, peuvent conférer à des molécules organiques des réactivités et/ou des propriétés originales. On peut à ce propos évoquer un autre domaine de la chimie, appelée chimie organométallique, qui étudie des molécules organiques dans lesquelles se trouvent des atomes de métaux de transition. Du fait de leurs nombreux degrés d'oxydation et de leur aptitude à se lier à certaines fonctions organiques, ces atomes sont présents dans de nombreuses enzymes.

Il est intéressant de dresser la classification périodique des éléments ayant un rôle biologique¹ :

- éléments indispensables à tous les êtres vivants connus : C, H, N, O, Mg, P (dans les molécules d'ADN et d'ARN), S (dans plusieurs acides aminés essentiels), K (influx nerveux), Ca (os et carapaces), Mn, Fe (hémoglobine chez l'humain), Cu, Zn, Mo.
- éléments indispensables à au moins une espèce connue (ceux qui sont soulignés sont indispensables à l'être humain) : F, Na (influx nerveux), Si, Cl, V, Co, Ni, As, Se, I, Pb.
- éléments dont on pense qu'ils ont un rôle biologique : Br, Sn.

1.2 Origine des molécules organiques

Les molécules organiques peuvent être naturelles c'est-à-dire qu'elles existent dans le monde vivant (le glucose, l'acide lactique, la garance, la vitamine C, la morphine, l'estradiol, la chlorophylle, l'ADN, etc), ou être artificielles, c'est-à-dire issues de l'imagination des scientifiques (héliantine, LSD, RU486, PNA, etc).

Les molécules artificielles sont évidemment toujours synthétisées au laboratoire. En revanche, les molécules naturelles peuvent être biosourcées, c'est-à-dire extraites de plantes, d'animaux ou de micro-organismes, ou synthétiques. L'un des enjeux actuels de la chimie organique est l'isolation, la détermination et la synthèse de molécules naturelles ayant des propriétés thérapeutiques réelles ou supposées, puis d'en réaliser la synthèse pour les obtenir en quantité notable et avec une pureté contrôlée.

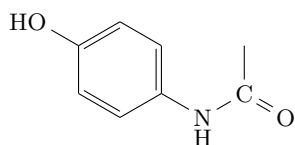
Il convient d'insister sur le fait que deux molécules, l'une biosourcée et l'autre synthétique (par exemple de l'acide salicylique extrait de l'écorce de saule ou synthétisé dans un laboratoire pharmaceutique), sont strictement identiques et ont exactement les mêmes propriétés. Pour être tout à fait rigoureux, la seconde sera vraisemblablement obtenue avec une bien meilleure pureté que la première. Il est donc totalement absurde de préférer une molécule « naturelle » à la même molécule obtenue par voie synthétique. En outre, s'il fallait faire l'aspirine à partir de l'acide salicylique extrait de l'écorce de saule, il n'y aurait plus un seul saule depuis longtemps ! Rappelons également que naturel ne signifie pas sans danger. Le plomb (très toxique), le radon (une des principales sources radioactives à laquelle nous sommes soumis)², le cyanure³ ou la strychnine⁴, représentée ci-dessous, sont des composés naturels.

1. Source : Vollhardt, *Organic Chemistry*, Freeman, New-York, 1987

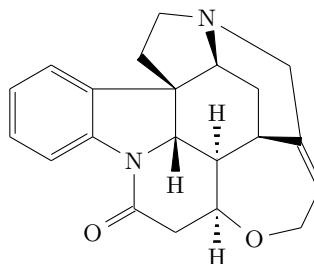
2. Le radon est un gaz émis en particulier dans les régions granitiques, comme la Bretagne ou la Scandinavie.

3. Le cyanure est présent dans les amandes qu'on trouve à l'intérieur des noyaux d'abricot ou de pêche et bien sûr dans les amandes proprement dites ; c'est ce composé qui est responsable du goût d'amande.

4. C'est un alcaloïde extrait de la *nux vomica* (« noix vomique ») qui pousse en Asie du sud-est. La dose létale par ingestion est de $0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.



paracétamol (artificiel)



strychnine (naturelle)

La chimie organique permet également de modifier certaines substances naturelles pour augmenter leur activité biologique ; c'est le cas de l'aspirine (acide acétylsalicylique, substance artificielle), qui est un dérivé de l'acide salicylique (substance naturelle), obtenu par estérification de celui-ci par l'acide éthanoïque. Il existe également des centaines de molécules à visée thérapeutique qui ne sont pas issues d'organismes vivants ; le paracétamol en est un exemple. D'une façon générale, des centaines de milliers de molécules organiques ont été synthétisées, pour des applications de toutes sortes, sans compter le pur défi que constitue leur synthèse.

1.3 Enjeux de la chimie organique actuelle

Une famille très importante de produits organiques est composée des plus simples d'entre eux : les hydrocarbures, composants principaux du pétrole. Toute l'industrie pétrolière est incluse dans la chimie organique. Néanmoins les différences avec les produits pharmaceutiques sont considérables, car les méthodes diffèrent du tout au tout. L'industrie pétrolière fabrique des produits par millions de tonnes, dans d'énormes réacteurs, et peut se permettre une pureté de 90 à 99% (c'est la chimie parfois qualifiée de « lourde »). En revanche, l'industrie pharmaceutique fabrique des quantités plus petites de produits, mais se doit d'arriver à une pureté bien meilleure (chimie « fine »). La première est avant tout aujourd'hui une question de réacteurs performants et de catalyseurs ; la seconde est encore une science très expérimentale, et de nombreux laboratoires de recherche sont spécialisés dans l'analyse ou la synthèse de substances naturelles et/ou pharmacologiques.

Actuellement, il existe trois grands axes de recherche en chimie organique :

- la mise au point de stratégies de synthèse de molécules naturelles bioactives (médicament),
- la conception et la synthèse de molécules ayant une forme ou une fonction particulière (électronique moléculaire, magnétisme moléculaire, photonique moléculaire, etc),
- la mise au point de méthodes compatibles avec la « chimie verte » : économie d'atomes, catalyseurs, réactions dans l'eau, etc

Le principe de base de la synthèse organique est en définitive de partir de molécules de petites tailles facilement disponibles (alcènes et alcools à courtes chaînes carbonées issus de l'industrie pétrolière, glucides en C6 issus de l'industrie agroalimentaire, etc) et de les faire réagir les unes sur les autres par des voies et des réactions bien choisies, afin de construire une molécule plus grande. La chimie organique a donc pour but ultime de créer des liaisons chimiques, en particulier entre atomes de carbone.

1.4 Intérêt de la chimie organique pour la biochimie

La recherche en chimie organique est aujourd'hui étroitement liée à la biochimie, à plusieurs titres. Un des domaines les plus importants en biochimie aujourd'hui est l'élucidation de structures moléculaires complexes et de leur fonctionnement ; ceci se fait à l'aide des outils spectroscopiques développés pour la chimie organique, en particulier la résonance magnétique nucléaire et la spectrométrie de masse. Ces recherches ont donné lieu à plusieurs attributions du prix Nobel de chimie ces dernières années ⁵.

Le second domaine majeur de recherche est évidemment la recherche pharmaceutique, dont le premier but est de trouver de nouvelles molécules biologiquement actives. Cependant, la recherche tend également à

5. Ont été primés : des méthodes liées à la synthèse d'ADN (1992), l'élucidation de structures de protéines (1997), des méthodes spectroscopiques appliquées aux molécules biologiques (2002), le fonctionnement de canaux à travers des membranes biologiques (2003), la découverte des mécanismes de dégradation de protéines (2004), l'élucidation des mécanismes de transcription d'information génétique (2006), la découverte et l'utilisation d'une protéine fluorescente (2008), l'étude de la structure et du fonctionnement du ribosome (2009), l'étude de récepteurs de protéines (2012). Le jury Nobel considère manifestement que la biochimie est dorénavant la branche majeure de la chimie.

déterminer les modes d'action de ces substances au niveau moléculaire : détermination des récepteurs impliqués, détermination des caractéristiques importantes de la molécule active (forme, groupes fonctionnels présents, propriétés physiques, etc).

Enfin, un dernier domaine concerne la fabrication de molécules artificielles mimant le vivant. Des recherches sur des cellules artificielles sont maintenant bien avancées. Une molécule totalement artificielle ayant les mêmes propriétés que l'ADN a été créée : l'ANP (*Acide nucléique peptidique*, PNA en Anglais). Il a l'avantage d'être plus simple à synthétiser que l'ADN, d'avoir les mêmes dimensions et la propriété de s'organiser spontanément en double hélice, mais de n'être pas utilisé par le monde vivant, ce qui permet de l'utiliser pour des études génétiques sans risque de dissémination de gènes potentiellement dangereux.

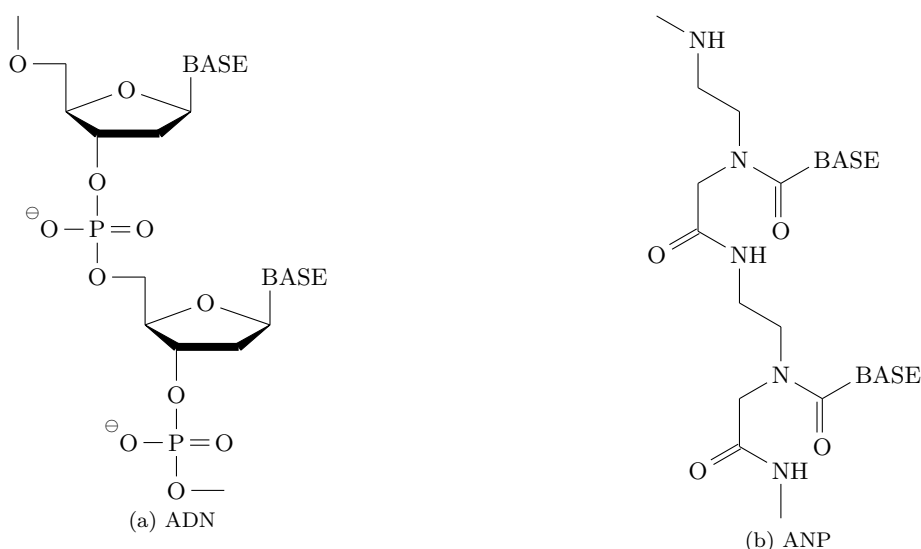


FIGURE 1 – L'ADN et son homologue synthétique l'ANP.

2 Présentation des molécules organiques

2.1 Valence des atomes et multiplicité des liaisons

On appelle **valence** d'un élément le nombre de liaisons que cet élément engage avec ses voisins. Elle dépend de la configuration électronique de valence de l'élément⁶. Un atome peut également porter un ou plusieurs doublets d'électrons non engagés dans une liaison, appelés **doublets non liant**.

Les liaisons covalentes peuvent être **simples** (1 liaison de type σ), **double** (1 liaison de type σ et 1 liaison de type π) ou **triples** (1 liaison de type σ et 2 liaisons de type π)⁷. Les éléments C, N et O peuvent engager des liaisons doubles, N et C peuvent engager des liaisons triples.

Le carbone engage 4 liaisons; il est tétravalent .	$\begin{array}{c} \\ -\text{C}- \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} \diagup \\ =\text{C} \\ \diagdown \end{array}$ $\equiv \text{C}-$
L' hydrogène ne peut engager qu'une seule liaison, il est monovalent .	$-\text{H}$
L' oxygène et le soufre sont divalents , et portent deux doublets non liants.	$-\bar{\text{O}}-$ $=\bar{\text{O}}$

6. Voir le chapitre sur la structure électronique des atomes

7. La définition des liaisons σ (lettre grecque se prononçant « sigma ») et π sera vue dans le chapitre sur les liaisons covalentes.

L' azote et le phosphore sont trivalents , et portent un doublet non liant.	$\begin{array}{c} \\ -\text{N} \\ \end{array}$ $\quad \quad \quad =\bar{\text{N}}-$ $\quad \quad \quad \equiv \bar{\text{N}}$
Les halogènes (chlore, brome, iode) sont monovalents et portent trois doublets non liants.	$- \bar{\text{Cl}}$

TABLE 1 – Valence des éléments.

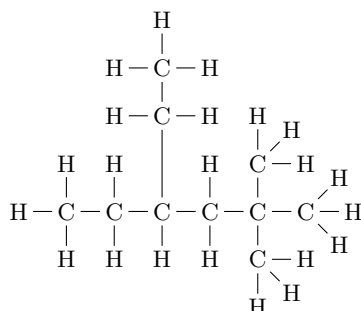
2.2 Hydrocarbures et squelette carboné des molécules organiques

Les hydrocarbures sont composés exclusivement de carbone et d'hydrogène. Ils constituent la base des composés organiques : une molécule organique quelconque peut être vue comme un hydrocarbure sur lequel on a remplacé certains atomes par d'autres groupes d'atomes.

Les hydrocarbures peuvent se ranger en deux catégories : les hydrocarbures ne comportant que des liaisons simples sont dits **saturés** et sont nommés les **alcanes** ; ceux comportant des liaisons doubles ou triples sont dits **insaturés**. D'autre part, on distingue les hydrocarbures **acycliques** et les hydrocarbures **cycliques** ; dans ces derniers, il existe une succession de liaisons covalentes qui ramènent au même atome (c'est le cycle). Les plus simples des hydrocarbures sont les alcanes acycliques, dont la formule brute est : $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$.

2.2.1 Représentation des alcanes acycliques

La **représentation développée** d'une molécule consiste à représenter tous les atomes de la molécule et toutes les liaisons présentes dans la molécule. C'est le cas de l'hydrocarbure à 10 atomes de carbone suivant :



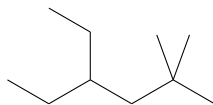
La représentation développée est rapidement illisible lorsque le nombre d'atomes augmente. On peut la simplifier en groupant certains atomes, autrement dit en masquant certaines liaisons. Par exemple, on peut omettre les liaisons entre les atomes de carbone et les atomes d'hydrogène, car il est évident que les atomes d'hydrogène sont liés aux atomes de carbone. On obtient alors une **représentation semi-développée** :



Cette représentation est encore trop détaillée lorsque les molécules sont vraiment grandes. La **représentation topologique** permet d'épurer au maximum l'écriture. Cette représentation est fortement symbolique, et permet de ne représenter que les éléments importants de la molécule. Elle obéit aux règles suivantes :

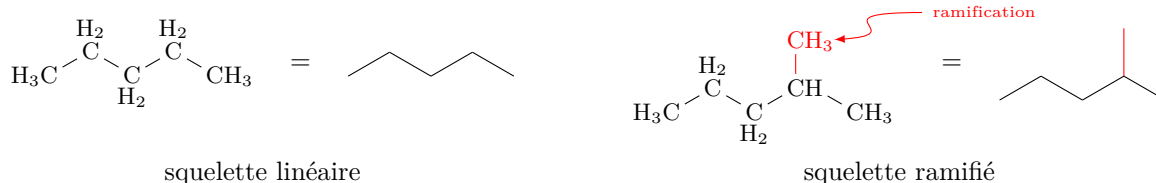
- l'enchaînement des liaisons entre atomes de carbone est représenté par une ligne brisée ; chaque segment représente donc une liaison, dont on précise la multiplicité (simple, double ou triple) ;
- chaque sommet de la ligne représente un atome de carbone ;
- les atomes d'hydrogène liés aux atomes de carbone sont omis, ainsi que les liaisons correspondantes ;

- les groupes fonctionnels⁸, s'il y en a, sont explicitement représentées.



2.2.2 Squelette et ramification, classe des atomes de carbone

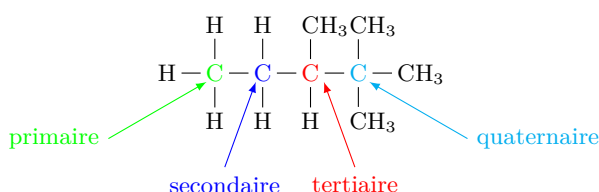
L'enchainement des atomes de carbone de la molécule en constitue le **squelette**. Celui-ci peut être **linéaire** si chaque atome de carbone n'est lié qu'à un ou deux atomes de carbone voisins, ou **ramifié** si au moins un atome de carbone est lié à 3 atomes de carbone voisins.



Dans le cas d'un squelette ramifié, on nomme ramifications les parties qui sont branchées sur la chaîne carbonée la plus longue qu'on puisse parcourir, qui est la **chaîne principale**.

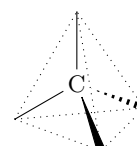
Les atomes de carbone liés par des liaisons simples sont divisés en quatre **classes**, en fonction du nombre d'autres atomes de carbone auxquels ils sont liés :

- un carbone **primaire** est lié à un seul autre atome de carbone,
- un carbone **secondaire** est lié à deux autres atomes de carbone,
- un carbone **tertiaire** est lié à trois autres atomes de carbone,
- un carbone **quaternaire** est lié à quatre autres atomes de carbone.



2.2.3 Géométrie des alcanes acycliques

La géométrie des molécules organiques est basée sur celle de l'atome de carbone. Un atome de carbone lié à 4 voisins a une **géométrie tétraédrique**, ce qui correspond à une structure pyramidale dont le centre est occupé par l'atome de carbone et chaque sommet par un de ses voisins.



Dans cette représentation, les liaisons en trait fin (—) sont dans le plan de la feuille, la liaison en tirets (····) se dirige vers l'arrière, et la liaison en triangle plein (▴) se dirige vers l'avant. Notons qu'il est souvent impossible de faire la représentation spatiale d'une molécule entière, dès que celle-ci possède une chaîne carbonée avec des ramifications; en conséquence, on se contente souvent de ne représenter dans l'espace que les parties intéressantes de la molécule.

8. Ils seront définis ultérieurement.

Une géométrie identique se retrouve autour de chaque atome de carbone. En outre, la molécule tourne en permanence autour de chacune des liaisons simples, ce qui mène à une infinité de structures spatiales appelées les différentes **conformations** de la molécule⁹.

2.2.4 Nomenclature des alcanes acycliques

La nomenclature des hydrocarbures acycliques repose sur le principe suivant. Il porte le nom de la chaîne carbonée la plus longue contenue dans la molécule. Les ramifications sont considérées comme une substitution (remplacement) d'un atome d'hydrogène de la chaîne principale par un groupe hydrocarboné nommé substituant. On précise alors le nom, le nombre et la place des différents substituants avant celui de la chaîne principale. Jusqu'à 4 atomes de carbone, les hydrocarbures ont des noms historiques ; au-delà, le nom est directement issu de la racine grecque correspondant au nombre d'atomes de carbone¹⁰.

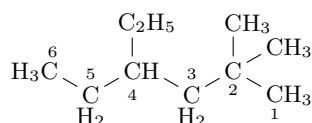
n	formule de l'alcane	nom de l'alcane	formule du substituant	nom du substituant
1	CH ₄	méthane	CH ₃	méthyle
2	C ₂ H ₆	éthane	C ₂ H ₅	éthyle
3	C ₃ H ₈	propane	C ₃ H ₇	propyle
4	C ₄ H ₁₀	butane	C ₄ H ₉	butyle
5	C ₅ H ₁₂	pentane	C ₅ H ₁₁	pentyle
6	C ₆ H ₁₄	hexane	C ₆ H ₁₃	hexyle
7	C ₇ H ₁₆	heptane		
8	C ₈ H ₁₈	octane		
9	C ₉ H ₂₀	nonane		
10	C ₁₀ H ₂₂	décane		

TABLE 2 – Nomenclature des alcanes C_nH_{2n+2} et des groupes alkyle C_nH_{2n+1}.

La méthode pour trouver le nom d'un hydrocarbure est la suivante.

- Trouver la chaîne carbonée la plus longue et le nom de l'hydrocarbure correspondant.
- Identifier les substituants liés à la chaîne principale et donner un nom à chacun d'eux ; placer ces noms dans l'ordre alphabétique, avant le nom de l'hydrocarbure.
- Numérotiser les atomes de carbone de la chaîne principale en partant du bout de la chaîne le plus proche d'un substituant ; préciser la position de chaque substituant en le faisant précéder du numéro du carbone de la chaîne principale auquel il est rattaché et d'un tiret.
- Quand il y a plusieurs substituants identiques, on les nomme ensemble, en faisant précéder le nom du substituant par les préfixes *di*, *tri*, *tétra*, etc ; on précise ensemble les numéros de chaque substituant, en les séparant par une virgule.
- Si les substituants sont eux-mêmes ramifiés, ils sont numérotés à partir du carbone lié à la chaîne principale, et sont nommés selon les mêmes règles que le squelette carboné.

Par exemple, le composé suivant est le 4-éthyl-2,2-diméthylhexane.



9. On reviendra sur les conformations des molécules dans le chapitre sur la stéréochimie.

10. Certains substituants eux-mêmes ramifiés ont des noms triviaux, qui sont dorénavant proscrits. À titre culturel, on peut citer l'*isopropyle* (CH₃)₂C– ou le *tertbutyle* (CH₃)₃C–.

2.2.5 Hydrocarbures cycliques saturés ou cyclanes

Lorsque le squelette de la molécule est refermé sur lui-même, la molécule est cyclique. Un alcane cyclique, ou cyclane, a une formule brute C_nH_{2n} . Il peut comporter une ou plusieurs ramifications.



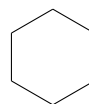
cyclopropane



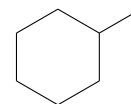
cyclobutane



cyclopentane

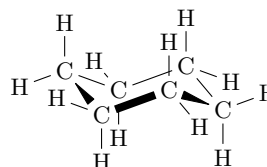
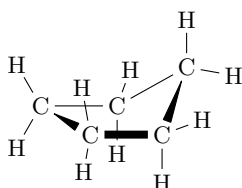


cyclohexane

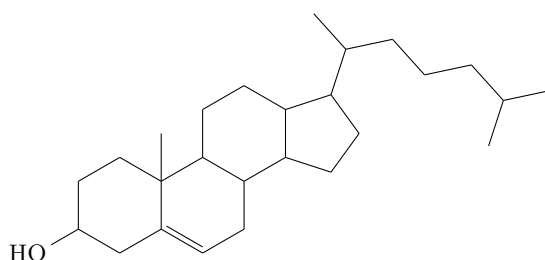


méthylcyclohexane

Mis à part le cyclopropane, tous les alcanes cycliques ont un squelette carboné non plan du fait de la géométrie tétraédrique autour de l'atome de carbone. Les cycles à 5 et à 6 atomes de carbone possèdent une infinité de conformations, dont les plus importantes sont données ci-dessous.



Il existe des composés polycycliques, qui peuvent être accolés (avoir deux atomes voisins en commun) ou ponté (avoir deux atomes non voisins communs). Beaucoup d'entre eux sont des composés naturels.



cholestérol

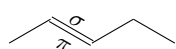


camphre

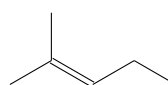
2.2.6 Hydrocarbures insaturés

Les hydrocarbures insaturés comportent une ou plusieurs liaisons multiples (double ou triple). Ils peuvent éventuellement être cycliques.

Un hydrocarbure comportant une double liaison entre deux atomes de carbone est nommé un **alcène**. S'il est acyclique, sa formule brute est C_nH_{2n} . Il est nommé de la même façon qu'un alcane, en remplaçant la terminaison *-ane* par la terminaison *-ène*, précédée du numéro du carbone où se situe la double liaison. Par convention, on numérote la molécule de sorte que le numéro attribué au carbone qui porte la double liaison soit le plus petit possible.

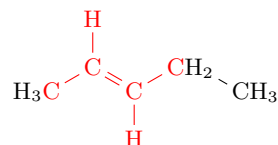


pent-2-ène



2-méthylpent-2-ène

Les deux liaisons de la double liaison ne sont pas équivalentes. La liaison σ « sigma » est assurée par une paire d'électrons localisée entre les deux noyaux. La liaison π , plus faible que la liaison σ est assurée par une paire d'électrons localisée latéralement¹¹. D'un point de vue géométrique, les liaisons dans lesquelles les deux atomes de carbone de la double liaison sont engagés sont **coplanaires**. Au niveau d'une double liaison, il y a donc 5 liaisons et 6 atomes dans un même plan, en rouge dans la représentation suivante.



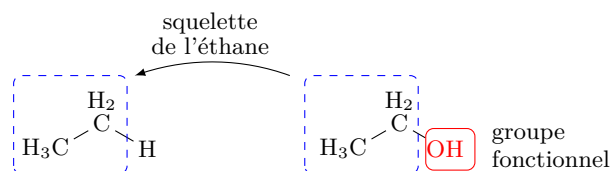
Un hydrocarbure comportant une triple liaison entre deux atomes de carbone est un **alcyne**, de formule brute C_nH_{2n-2} s'il est acyclique. Il se nomme de la même façon qu'un alcène, la désinence finale étant *-yne*. Par exemple, le pent-2-yne a la structure suivante :



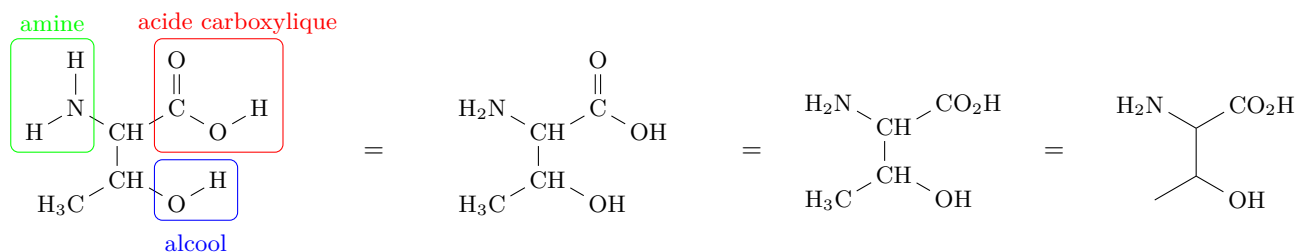
2.3 Groupes fonctionnels

2.3.1 Définition

On peut substituer à un ou plusieurs atomes d'hydrogène de la chaîne carbonée d'un alcane, des groupes chimiques comportant des hétéroatomes (atomes autres que C et H). Ces groupes sont appelés des **groupes fonctionnels**. Par exemple, l'éthanol comporte un squelette éthane (c'est-à-dire qu'il comporte deux atomes de carbone comme l'éthane), et un groupe fonctionnel -OH (autrement dit, c'est comme si on avait remplacé un H de l'éthane par un OH).



Une molécule peut bien entendu comporter différents groupes fonctionnels, comme dans le cas de la thréonine, un acide aminé, représenté ci-dessous. En écriture topologique, on précise intégralement les atomes des groupes fonctionnels, y compris les atomes d'hydrogène ; il est tout à fait possible de représenter de façon développée ou condensée les différents groupes fonctionnels, selon ce qu'on souhaite mettre en évidence.



La formule brute de la molécule est alors écrite selon la convention suivante : on indique d'abord le nombre d'atomes de carbone, puis d'atome d'hydrogène, puis de tous les autres atomes en les plaçant dans l'ordre alphabétique. Ainsi, la formule brute de la thréonine s'écrit-elle : $C_4H_9NO_3$.

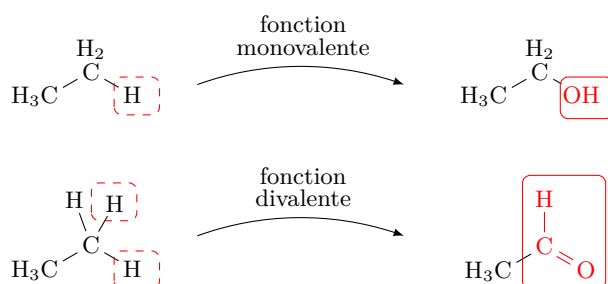
11. On reviendra sur ce point dans le chapitre sur les liaisons covalentes.

2.3.2 Groupes fonctionnels usuels

Il existe de nombreuses fonctions chimiques différentes, dont quelques exemples particulièrement important en biochimie sont données ci-après.

Notons pour commencer que le terme « fonction alkyle » (méthyle, éthyle, etc) utilisé en biologie est impropre. Il faut plutôt parler d'un substituant alkyle ou d'une ramification. Il existe cependant des molécules capables d'échanger un groupe alkyle (en particulier méthyle), ce qui justifie cette dénomination.

Les fonctions chimiques sont classées par leur **valence**, c'est-à-dire par le nombre d'atomes d'hydrogène qu'elles remplacent formellement dans l'alcane correspondant. Ainsi, pour passer d'un alcane à un alcool, il faut formellement enlever un atome d'hydrogène et le remplacer par un groupe alcool ; c'est une fonction monovalente. En revanche, pour passer d'un alcane à un aldéhyde, il faut formellement enlever deux atomes d'hydrogène sur un même carbone et les remplacer par un atome d'oxygène.



Le tableau ci-dessous réunit les principales fonctions chimiques rencontrées en chimie organique, sans que cette liste soit exhaustive (X est un halogène : chlore, brome ou iode). Il est commode de ranger le motif alcène dans la catégorie des fonctions monovalentes et le motif alcyne dans celle des fonctions divalentes.

fonctions monovalentes				
	alcool	étheroxyde	phénol	phosphate
	thiol	thioéter	halogénoalcane	organomagnésien
fonctions divalentes				
	amine primaire	amine secondaire	amine tertiaire	alcène
	aldéhyde	cétone	hémiacétal	acétal
fonctions divalentes				
	imine	alcyne		

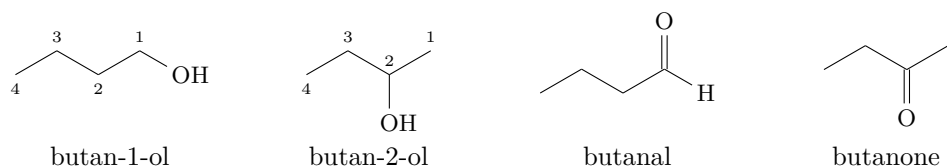
fonctions trivalentes	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \\ \text{OH} \end{array}$ acide carboxylique	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \\ \text{O}-\text{R} \end{array}$ ester	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \\ \text{N}-\text{R} \\ \\ \text{H} \end{array}$ amide	$-\text{C}\equiv\text{N}$ nitrile
fonctions tétravalentes	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O}-\text{C}-\text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$ carbonate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{N}-\text{C}-\text{N} \\ \quad \end{array}$ urée		

TABLE 3 – Valence des fonctions chimiques.

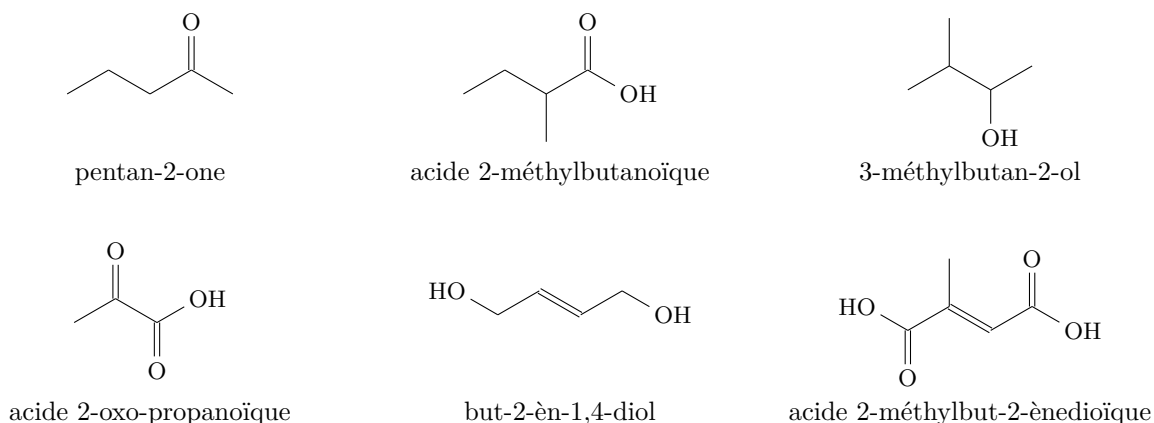
2.3.3 Nomenclature

Le nom des molécules portant des groupes fonctionnels se fait en utilisant les mêmes conventions que les alcanes, en remplaçant la désinence *-ane* par celle caractérisant la fonction chimique présente. Dans le cas où plusieurs groupes fonctionnels différents sont présents, celui correspondant à la fonction de plus grande valence donne son nom à la molécule, les autres étant traités comme des substituants. Le tableau 4 donne la liste des noms des fonctions en tant que fonction principale et en tant que substituant¹².

Dans le cas où il existe des ambiguïtés, on précise le numéro du carbone qui porte le groupe fonctionnel, en le plaçant avant la désinence correspondante ; c'est le cas du butanol, dont un isomère porte le groupe fonctionnel en bout de chaîne, et l'autre en milieu de chaîne. On **numérote les atomes** de carbone de la chaîne en partant du carbone portant la fonction prioritaire, si celle-ci est en fin de chaîne (aldéhyde, acide...), ou de sorte à attribuer le plus petit numéro possible à la fonction principale. Pour le butanal, aucune précision n'est nécessaire car la fonction aldéhyde est toujours en bout de chaîne ; pour la butanone, la fonction est nécessairement en position 2, donc il n'y aucune ambiguïté possible.



Dans tous les cas, on place les substituants, qu'ils correspondent à des ramifications ou à des groupes fonctionnels, avant le nom du squelette de la molécule et dans l'ordre alphabétique sans tenir compte des préfixes multiplicatifs. On remarque également l'élision de certains -e.



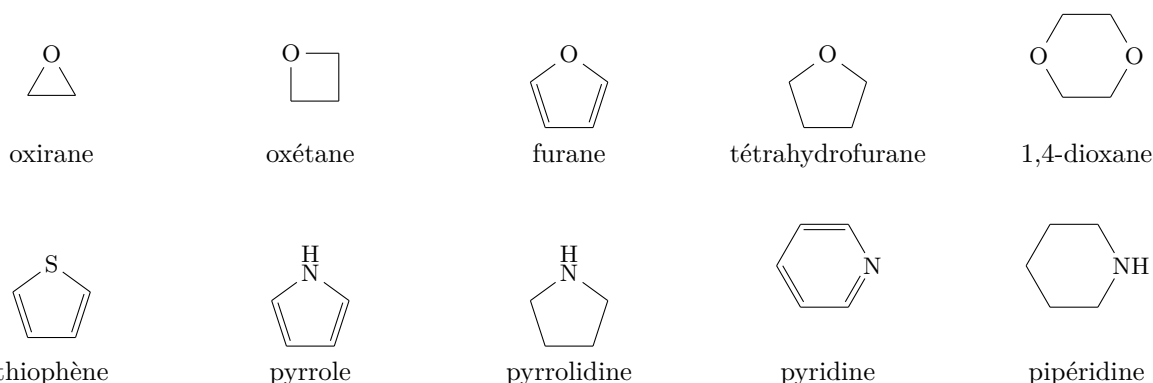
12. Dès que les molécules deviennent compliquées, le nom systématique est si complexe qu'il est quasiment inutilisable, sauf à des fins de classification dans des bases de données de molécules. Un bon schéma est alors nettement plus évocateur.

fonction	nom en tant que fonction principale	nom en tant que substituant
halogénoalcane	halogénoalcane	halogéno-
alcool	alcanol	hydroxy-
étheroxyde	alcoxyalcane	-alcoxy-
amine	alcanamine	amino-
alcène	alcène	-èn-
aldéhyde	alcanal	-oxo-
cétone	alcanone	-oxo-
alcyne	alcyne	-yn-
acide carboxylique	acide alcanoïque	
ester	alcanoate d'alkyle	

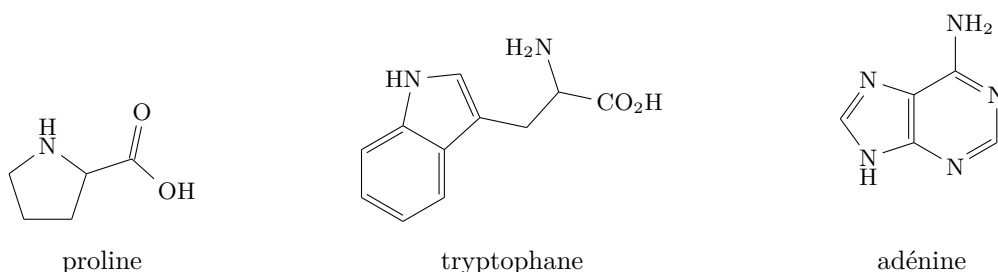
TABLE 4 – Nomenclature des fonctions chimiques.

2.3.4 Hétérocycles

Les hétérocycles sont des composés cycliques dont l'un des atomes du cycle n'est pas un carbone. Il existe des hétérocycles azotés, oxygénés, soufrés, phosphorés. Les hétérocycles de base sont les suivants.



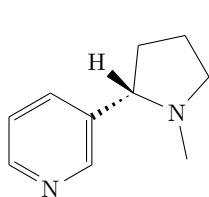
Leur importance est considérable puisqu'ils apparaissent dans énormément de composés naturels : certains acides aminés essentiels sont des hétérocycles aminés (proline, histidine, tryptophane), ainsi que les bases azotées des acides nucléiques (adénine, thymine, uracile, guanine et cytosine). Notons que le squelette des bases azotées, comme l'adénine ci-dessous, sont plans du fait de la conjugaison.



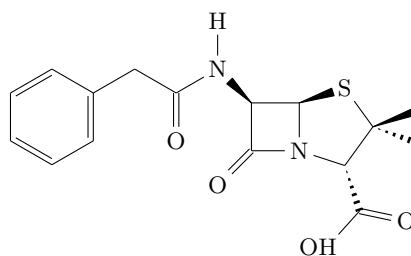
Ils sont aussi présents dans des alcaloïdes¹³, dans des antibiotiques¹⁴, etc.

13. On regroupe sous le nom d'*alcaloïde* un ensemble de composés synthétisés par les plantes, qui présentent toujours une fonction amine souvent dans un hétérocycle, et qui ont une action psychotrope : caféine, nicotine, cocaïne, théophylline, etc.

14. Un antibiotique est un composé naturel ou synthétique qui a une action antibactérienne.

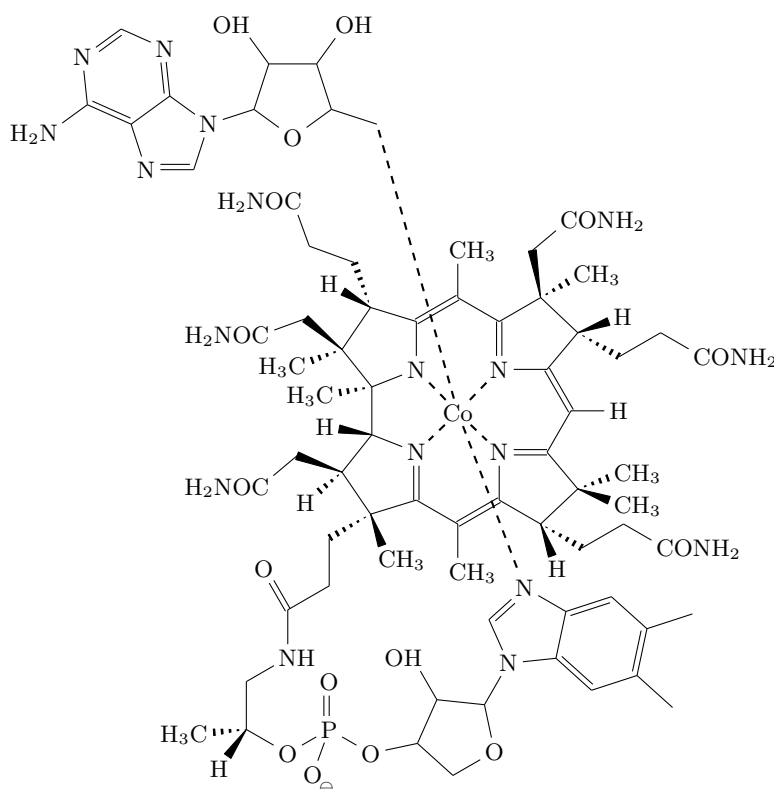


nicotine



pénicilline G

On trouve enfin des molécules hétérocycliques comportant un atome métallique au centre de la cavité formée par le cycle. C'est un atome de cobalt dans le cas de la cobalamine (vitamine B12)¹⁵. La voilà, histoire de se donner le frisson du chimiste ...



Pour la petite histoire, elle a été synthétisée pour la première fois au début des années 70 conjointement par l'équipe du professeur Woodward¹⁶ et celle du professeur Eschenmoser, après une dizaine d'années de travail.

3 Principales familles de molécules en biochimie

On trouve un très grand nombre de molécules dans les organismes vivants qu'on classe usuellement en 5 catégories plus ou moins homogènes.

15. On peut aussi citer l'hémoglobine qui comporte un atome de fer, l'hémocyanine avec un atome de cuivre, ou la chlorophylle avec un atome de magnésium.

16. Woodward est un grand chimiste organicien contemporain ; son équipe a réalisé nombre de synthèses qui ont fait date dans l'histoire de la chimie organique, en particulier celle-ci. Woodward est également connu dans d'autres domaines ; il a été l'un des premiers à appliquer à la chimie les principes de la physique quantique (théorie des orbitales moléculaires). Des règles concernant la photochimie (réactions chimiques réalisées à l'aide d'irradiation lumineuse) portent son nom (règles de Woodward et Hoffmann, un autre grand nom de la chimie). Il a été récompensé par le prix Nobel de chimie en 1965 pour ses travaux de synthèse (Hoffmann a empoché en 1981 le Nobel pour les règles de Woodward et Hoffmann, mais Woodward ne l'a pas eu une deuxième fois car il était mort entre temps). Bref, un exemple à suivre pour tous ceux qui rêvent de gloire en chimie...

- Les glucides servent de réserve d'énergie (sucre, amidon) mais ont aussi un rôle dans la structure des organismes (cellulose).
- Les protéines catalysent les réactions du métabolisme mais ont de nombreux autres rôles (transport, structure, etc).
- Les lipides forment les membranes des cellules, mais servent aussi de transmetteurs chimiques d'information et constituent un mode de stockage d'énergie.
- Les acides nucléiques servent au stockage de l'information génétique.
- Le reste : vitamines, coenzymes, pigments, etc. Ce groupe n'en est pas un et relève du « fourre-tout ».

3.1 Glucides : oses et osides

3.1.1 Les oses

Les oses constituent un groupe de molécules homogène et bien défini. Il comprend les molécules ayant une chaîne carbonée d'**au moins 3 atomes de carbone** qui porte **un groupe carbonyle** (autrement dit soit une fonction aldéhyde soit une fonction cétone) et **au moins 2 groupes hydroxyle** (OH). Il comprend également les molécules qui dérivent des précédentes par oxydation de l'aldéhyde (en acide carboxylique) ou par réduction du groupe carbonyle en alcool.

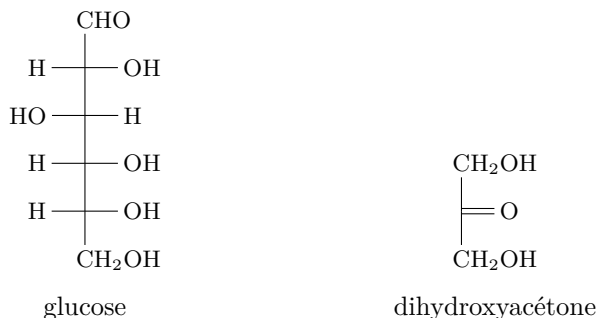
Dans la nature, il existe de nombreux oses caractérisés par la nature de la fonction carbonyle et la longueur de la chaîne carbonée. Concernant la fonction carbonyle, on distingue :

- les aldoses qui ont une fonction aldéhyde),
- les cétooses qui ont une fonction cétone.

Du point de vue de la longueur de la chaîne, il existe :

- les trioses (3 atomes de carbone),
- les tétroses (4 atomes de carbone),
- les pentoses (5 atomes de carbone),
- les hexoses (6 atomes de carbone),
- les heptoses (7 atomes de carbone),
- les oses à 8 ou davantage atomes de carbone sont nettement plus rares.

Chaque ose est qualifié par un nom qui informe et sur la nature de la fonction carbonyle, et sur la longueur de la chaîne carbonée. Ainsi, la dihydroxyacétone est un céto triose, et le glucose est un aldohexose.



3.1.2 Pyranoses et furanoses

Dans l'eau, les pentoses et les hexoses existent quasi-exclusivement sous forme cyclique, par réaction spontanée entre leur groupe carbonyle et un de leurs groupes hydroxyle pour former un groupe fonctionnel hémiacétal, dont un oxygène est inclus dans le cycle. Dans les aldoses, le carbone de la fonction hémiacétal est le carbone n°1 ; dans les cétooses, c'est le carbone n°2. Les sucres cyclisés se rangent en deux catégories :

- les **furanoses** ont un cycle à 5 dont un oxygène,
- les **pyranoses** ont un cycle à 6 dont un oxygène.

Par exemple, la formation du β -D-fructofuranose à partir du D-fructose correspond à la transformation suivante¹⁷.

17. Pour voir la forme spatiale du β -D-fructofuranose : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fructose#/media/Fichier:%CE%92-D-Fructofuranose.gif>

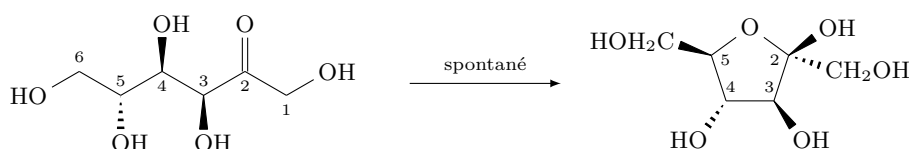


FIGURE 2 – Formation du fructofuranose par cyclisation du fructose.

La formation du β -D-glucopyranose à partir du D-glucose est explicitée ci-dessous ¹⁸ :

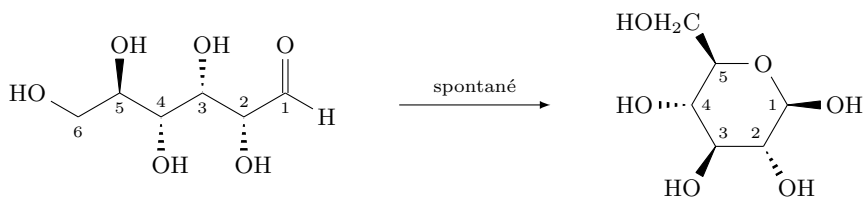


FIGURE 3 – Formation du glucopyranose par cyclisation du glucose.

3.1.3 Osides

La fonction hémiacétal d'un ose cyclisé peut réagir avec un groupe hydroxyle OH d'un autre ose pour former une fonction acétal (« liaison osidique »). On obtient ainsi un **dioside** (ou diholoside ou dissaccharide), molécule constituée de l'association par une liaison covalent de deux oses.

La nomenclature des dioside indique le numéro des atomes de carbone au niveau desquels la réaction a lieu, autrement dit le numéro de l'atome de carbone de la fonction hémiacétal du premier ose et le numéro de l'atome de carbone portant le groupe hydroxyle du second. Ainsi, le saccharose est l'association par une liaison osidique d'un glucopyranose qui réagit par sa fonction hémiacétal sur son carbone n°1 et d'un fructofuranose qui réagit par la fonction hydroxyle portée par son carbone n°2 (figure 4). Son nom est le glucopyranosyl (1 $\leftrightarrow$ 2) fructofuranoside ¹⁹. Dans le nom systématique, l'ose qui réagit par sa fonction hémiacétal est désigné avec la terminaison -yl et celui qui réagit par sa fonction hydroxyle avec la terminaison -ide.

Le processus peut se répéter par réaction de la fonction hémiacétal du dioside avec une fonction hydroxyle d'un troisième ose pour former un trioside, et ainsi de suite. Les polyholosides sont des chaînes d'un grand nombre (10^2 à 10^5) d'oses : amylose et amylopectine (constituant de l'amidon), cellulose, etc.

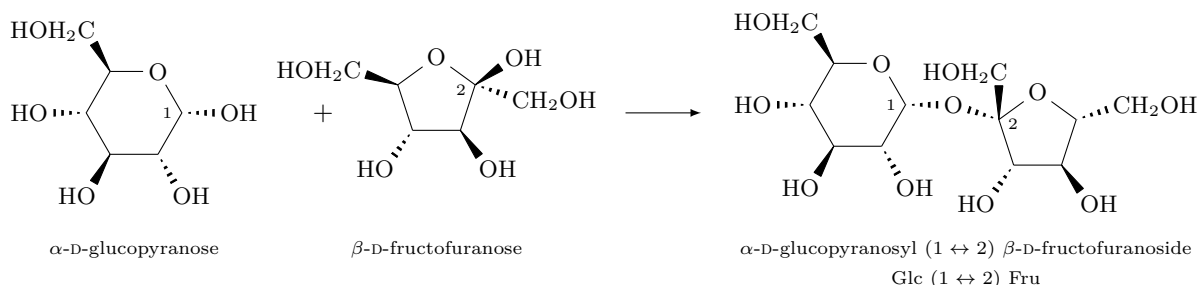


FIGURE 4 – Formation du saccharose.

18. Les dénominations β et D donnent des informations concernant la forme tridimensionnelle de la molécule, et ne sont pas importantes pour l'instant. Pour voir la forme du β -D-glucopyranose : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Glucose#/media/Fichier:Beta-D-glucose-3D-vdW.png>

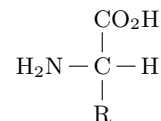
19. Pour voir la forme du saccharose : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Saccharose#/media/Fichier:Sucrose-3D-balls.png>

3.2 Acides aminés, peptides et protéines

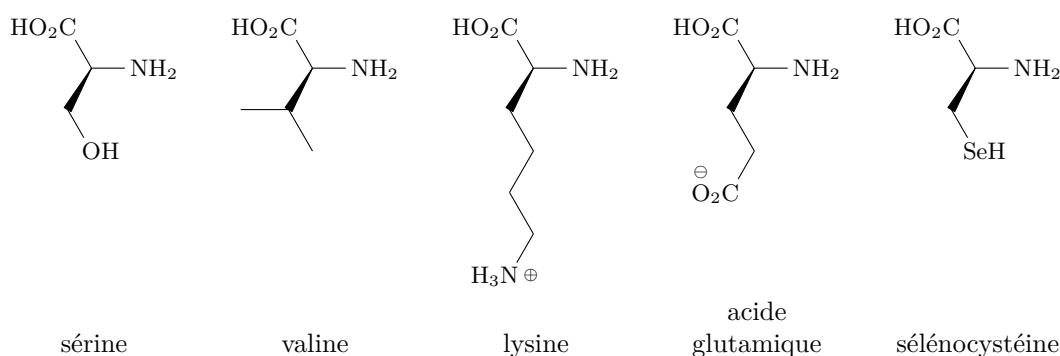
3.2.1 Les acides aminés

Les acides α -aminés sont des molécules portant sur le même atome de carbone (appelé le carbone α , celui qui est voisin du groupe fonctionnel acide carboxylique) :

- un groupe fonctionnel acide carboxylique,
- un groupe fonctionnel amine,
- un groupe carboné R variable.



Dans le vivant, il existe 22 acides aminés (dont 2 très rares), soit 22 groupes R possibles. La nature de R conditionne les propriétés de l'acide aminé (hydrophile ou hydrophobe, neutre ou chargé, acide ou basique). La liste complète est en annexe 4.1. Dans les exemples ci-dessous, le groupe R est CH_2OH dans la sérine, $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$ dans la valine, $(\text{CH}_2)_4\text{NH}_3^+$ dans la lysine, $(\text{CH}_2)_2\text{CO}_2^-$ dans l'acide glutamique (sous sa forme glutamate) et CH_2SeH dans la sélénocystéine (Se est l'élément sélénium).



3.2.2 Peptides et protéines

Le groupe acide carboxylique d'un acide aminé peut réagir avec le groupe amine d'un autre acide aminé pour former un **groupe fonctionnel amide**, appelé une **liaison peptidique** par les biologistes. Les molécules formées sont des **peptides** : dipeptides, tripeptides, polypeptides (jusqu'à quelques centaines d'acides aminés). Les **protéines** sont des assemblages de polypeptides et de structures moléculaires variées (métaux, hème...).

La réaction de formation du groupe amide se fait par liaison entre le carbone du groupe acide carboxylique du premier acide aminé et l'azote du groupe amine du second acide aminé, selon le schéma réactionnel donné ci-dessous.

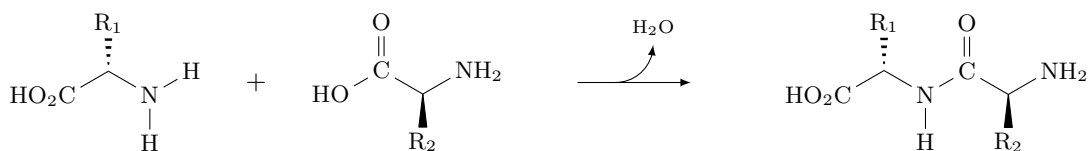


FIGURE 5 – Association de deux acides aminés par une liaison peptidique.

Le dipeptide ainsi formé peut réagir sur un nouvel acide aminé par ses deux extrémités, qui sont respectivement un groupe fonctionnel acide carboxylique et un groupe fonctionnel amide.

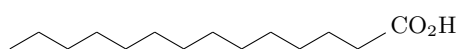
3.3 Lipides

Les lipides constituent un groupe hétérogène de molécules ayant en commun d'avoir **une longue chaîne hydrocarbonée** les rendant très insolubles dans l'eau. Contrairement aux glucides, aux peptides et aux acides nucléiques, les lipides n'ont pas une structure aisément reconnaissable. On les classe généralement (et un peu artificiellement) en 8 groupes, dont :

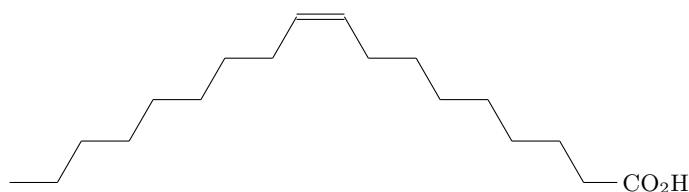
- les acides gras saturés ou insaturés,
- les glycérides et phosphoglycérides,
- les stérols,
- les prérols,
- liste non limitative.

Aucune de ces familles n'est à connaître, mais il faut être capable de déterminer si une molécule donnée est un lipide, et identifier la longue chaîne carbonée qui permet de le justifier.

Les acides gras sont constitués d'une longue chaîne carbonée se terminant par un groupe fonctionnel acide carboxylique. Si la chaîne carbonée ne comporte que des liaisons simples C – C, l'acide gras est dit **saturé**, tel l'acide myristique $\text{H}_3\text{C}(\text{CH}_2)_{12}\text{CO}_2\text{H}$, qui a donc une chaîne carbonée à 14 atomes.

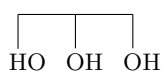


Si au contraire, la chaîne carbonée comporte au moins une liaison double C = C, l'acide gras est dit **insaturé**, comme l'acide oléique $\text{H}_3\text{C}(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CO}_2\text{H}$, avec une chaîne carbonée à 18 atomes.

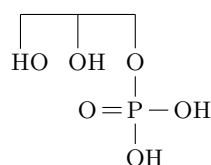


Le caractère saturé ou insaturé de la chaîne carbonée induit une forte différence dans la structure spatiale de la molécule²⁰.

Les triglycérides sont obtenus par estérification du glycérol par un, deux ou trois acides gras (monoglycérides, diglycérides, triglycérides), ou du glycérol-3-phosphate.



glycérol



glycérol-3-phosphate

La réaction de formation du groupe ester se fait par liaison entre le carbone du groupe acide carboxylique de l'acide gras et l'oxygène du groupe alcool du glycérol, selon le schéma réactionnel donné ci-dessous pour un acide en C_{16} .

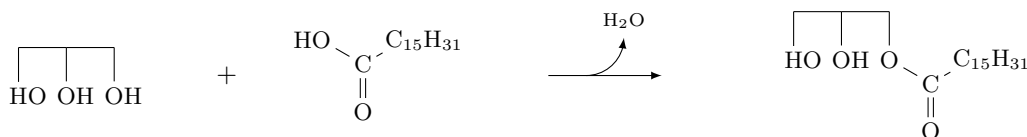
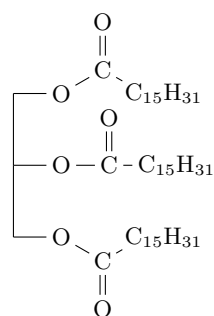


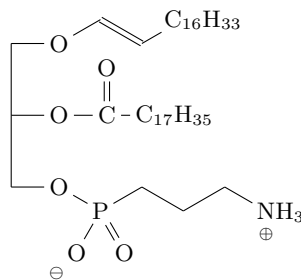
FIGURE 6 – Réaction d'estérification.

À titre d'exemple, on a représenté ci-dessous un triglycéride et un phosphoglycéride.

20. La forme spatiale de l'acide myristique est visible ici : https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_gras#/media/Fichier:Myristic-acid-3D-vdW.png, et celle de l'acide oléique là : https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_gras#/media/Fichier:Oleic-acid-3D-vdW.png

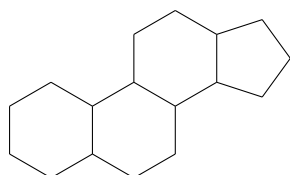


tripalmitylglycérol

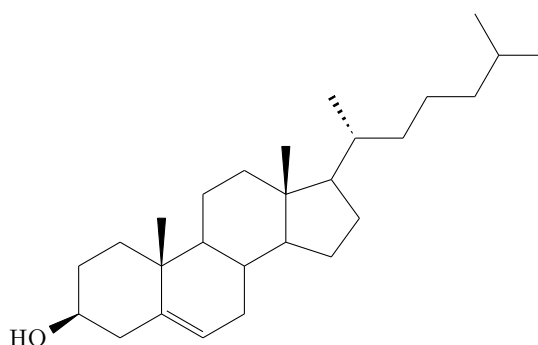


un plasmalogène

Les stérols sont des dérivés du stérane, une molécule constituée de 4 cycles carbonés accolés. Le plus connu est le cholestérol.

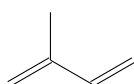


stérane

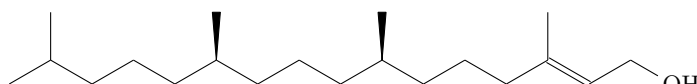


cholestérol

Les prényls sont des alcools à longues chaînes carbonées constituée d'unités isoprène (2-méthylbut-1,3-diène). L'isoprène ayant 5 atomes de carbone, les prényls sont des molécules à 10, 15, 20 etc atomes de carbone, selon que la chaîne soit l'association de 2, 3, 4, etc molécules d'isoprène. Le phytol ci-dessous est un prényl en C₂₀.



isoprène



phytol

3.4 Nucléosides, nucléotides et acides nucléiques

3.4.1 Nucléosides

Les **nucléosides** sont constitués de l'association du ribofuranose ou du désoxyribofuranose (deux sucres sous forme cyclisée) avec une **base nucléique** (ou **base azotée**). Les bases nucléiques sont des molécules dérivées de la purine ou de la pyrimidine ; il y en a 5 principales (liste en annexe 4.2), et une dizaine avec plus rares.

Chaque ribonucléoside a un nom spécifique, auquel on rajoute le préfixe désoxy si le sucre est le désoxyribose :

- (désoxy)adénosine et (désoxy)guanosine,
- (désoxy)thymidine, (désoxy)cytidine et (désoxy)uridine.

Les **ribonucléosides** sont notés A, G, T, C et U ; les **désoxyribonucléosides** sont logiquement notés dA, dG, dT, dC et dU. Il est utile de savoir déterminer si on a affaire à un ribonucléoside ou à un désoxyribonucléoside, et identifier lequel à l'aide d'une table des bases azotées.

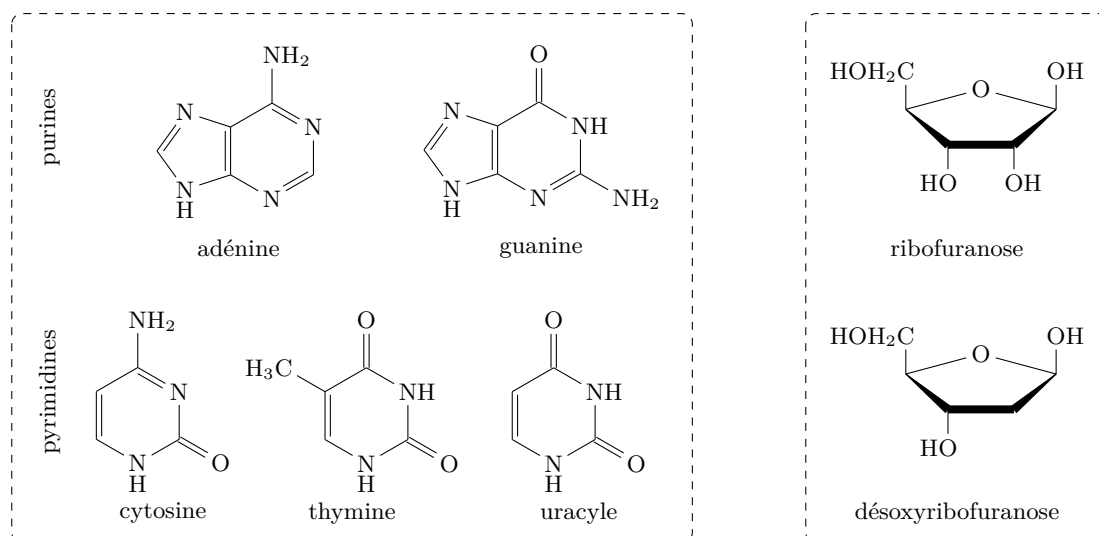
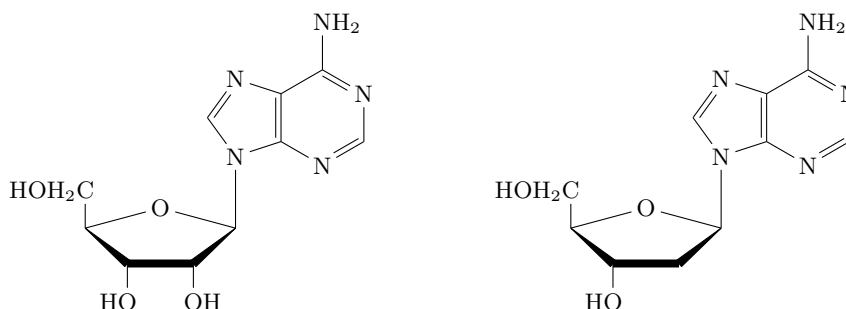


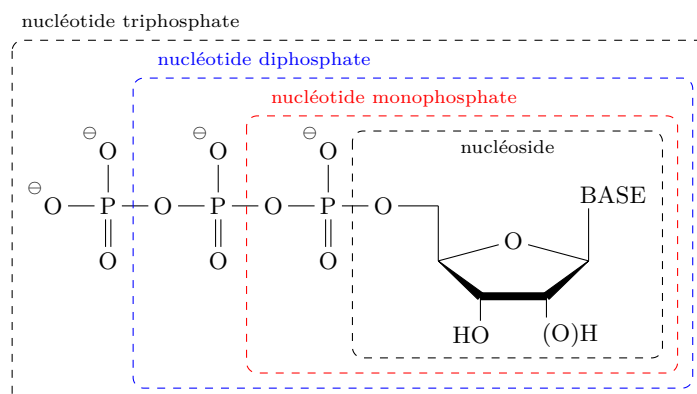
FIGURE 7 – Bases nucléiques usuelles et (désoxy)nucéosides.

L'adénosine (un ribonucéoside) et la désoxyadénosine (un désoxyribonucéoside) sont représentés ci-dessous à titre d'exemple.



3.4.2 Nucléotides

Un **nucléotide** est un nucléoside lié à un groupe phosphate, diphosphate ou triphosphate, pour donner des **nucléotides monophosphate**, **nucléotides diphosphate** et **nucléotides triphosphate**. Dans l'eau, chaque groupe phosphate porte une charge négative et une supplémentaire pour celui à l'extrémité de la chaîne.



L'énergie nécessaire aux réactions du métabolisme est fournie par l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate (ATP) en adénosine diphosphate (ADP), selon la transformation schématisée ci-dessous.

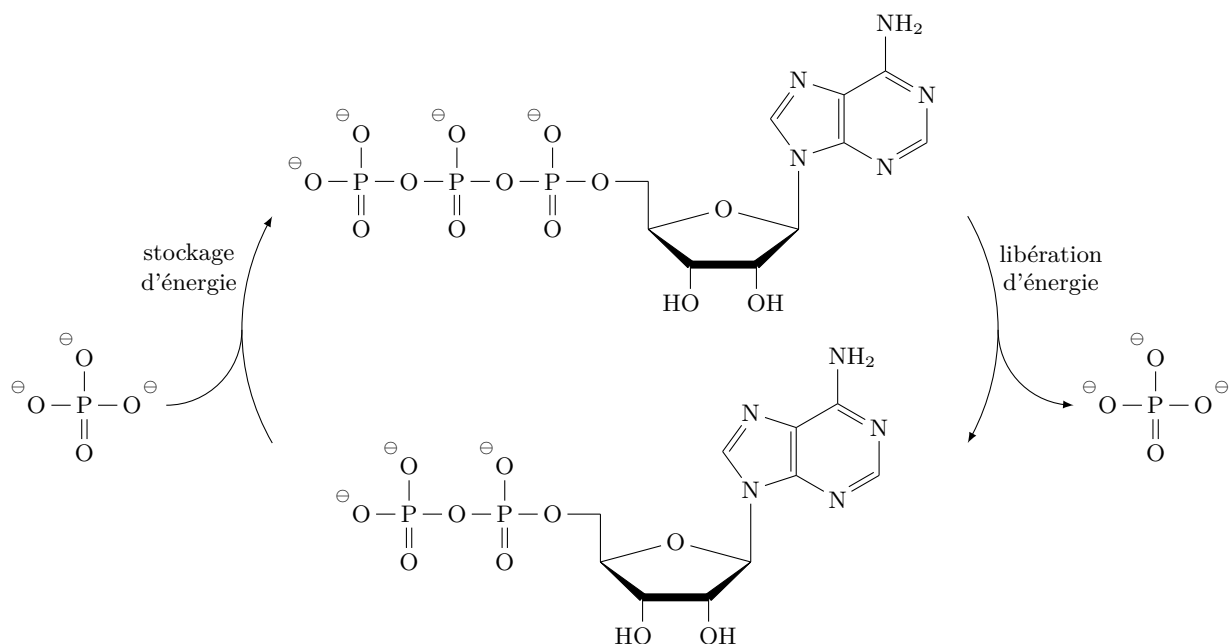


FIGURE 8 – Interconversion de l'ADP en ATP.

3.4.3 Acides nucléiques

Les **acides nucléiques** sont issus de l'association d'un très nombre de nucléotides monophosphate.

- L'**acide ribonucléique** ADN est constitué d'un enchainement de ribonucléotides monophosphate, chacun portant une base nucléique parmi A, G, C et U²¹.
- L'**acide désoxyribonucléique** ARN est assemblage de deux brins, constitué chacun d'un enchainement de déoxyribonucléotides monophosphate, chacun portant une base nucléique parmi A, G, C et T. Les deux brins sont associés l'un à l'autre selon une forme en double hélice, qui constitue le support de l'information génétique.

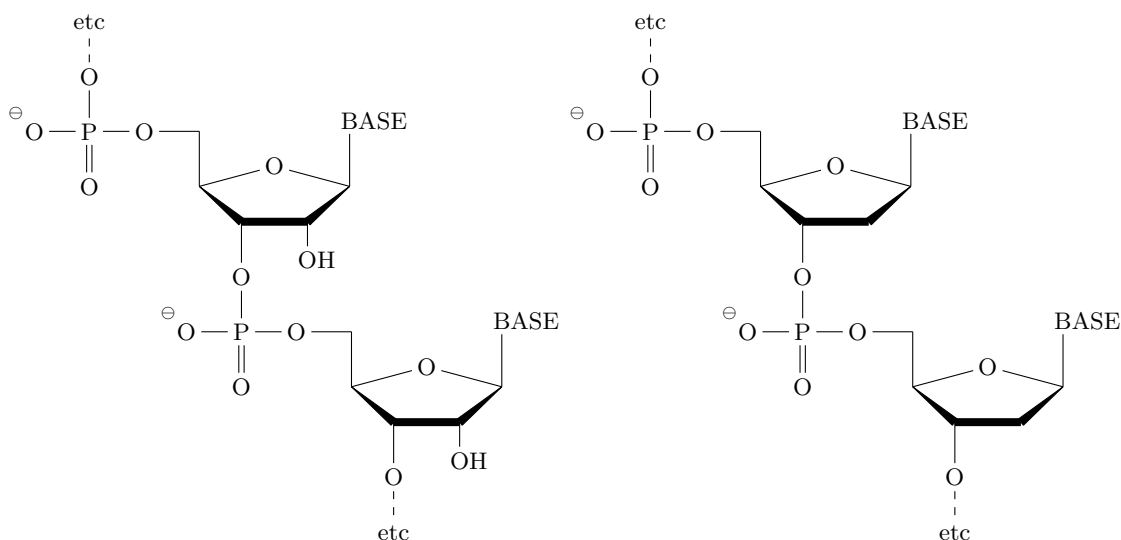


FIGURE 9 – Structure d'un brin d'ARN et d'un brin d'ADN.

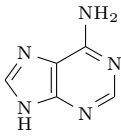
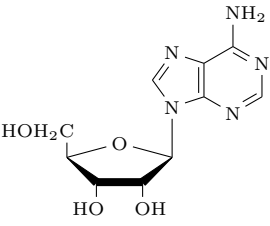
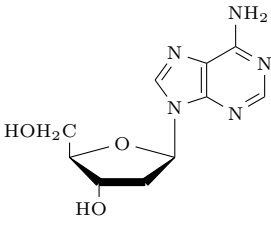
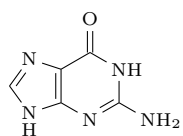
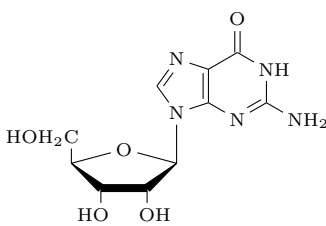
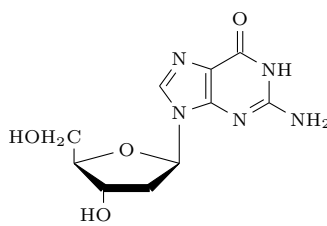
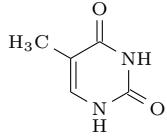
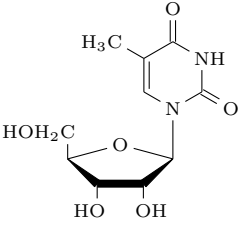
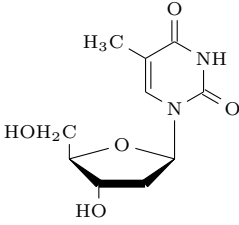
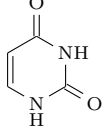
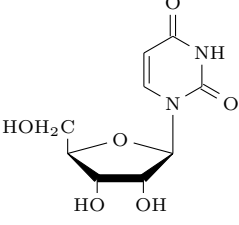
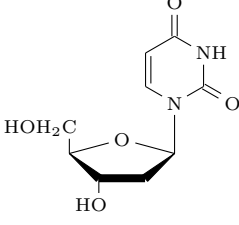
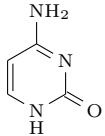
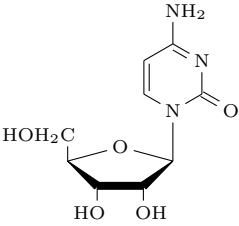
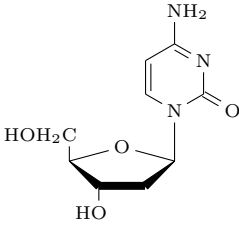
21. Pour visualiser la double hélice de l'ADN : https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_d%C3%A9soxyribonucl%C3%A9ique#/media/Fichier:DNA_structure_and_bases_FR.svg
 et : https://en.wikipedia.org/wiki/DNA#/media/File:DNA_Structure+Key+Labelled.pn_NoBB.png

4 Annexes

4.1 Les acides α -aminés courants

chaîne latérale chargée				
arginine Arg	histidine His	lysine Lys	acide aspartique Asp	acide glutamique Glu
chaîne latérale non chargée polaire				
sérine Ser	thréonine Thr	asparagine Asn	glutamine Gln	
chaîne latérale apolaire				
alanine Ala	valine Val	leucine Leu	isoleucine Ile	méthionine Met
	phénylalanine Phe	tyrosine Tyr	tryptophane Trp	
autres cas				
cystéine Cys	sélénocystéine Sec	glycine Gly	proline Pro	

4.2 Les nucléosides courants

 adénine	 adénosine A	 désoxyadénosine dA
 guanine	 guanosine G	 désoxyguanosine dG
 thymine	 ribothymidine m⁵U	 thymidine T
 uracile	 uridine U	 désoxyuridine dU
 cytosine	 cytidine C	 désoxycytidine dC