

Le carbone et la diversité moléculaire de la vie

4



VOS OUTILS INTERACTIFS

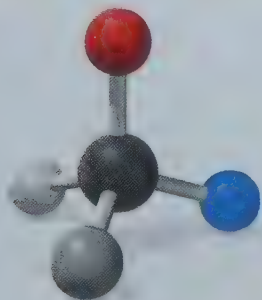


Consultez votre MANUEL NUMÉRIQUE, qui vous donne accès aux animations, aux exercices et à la plateforme d'anatomie interactive.

▲ **Figure 4.1** Quelles propriétés font du carbone l'élément fondamental de tous les êtres vivants ?

CONCEPTS CLÉS

- 4.1 La chimie organique étudie les composés du carbone
- 4.2 Les atomes de carbone peuvent former une grande variété de molécules en se liant à quatre autres atomes
- 4.3 Le comportement chimique des molécules dépend de quelques groupements fonctionnels



▲ Le carbone peut se lier à quatre autres atomes ou groupes d'atomes, ce qui permet la formation de molécules d'une diversité presque infinie.

Le carbone: l'élément fondamental des êtres vivants

Le carbone constitue l'élément fondamental de la plupart des substances chimiques qui composent les êtres vivants, comme les plantes et les singes dorés au nez camus (*Rhinopithecus roxellana*) qui vivent dans les monts de Qinling, en Chine, et que l'on voit à la **figure 4.1**. Le carbone entre dans la biosphère grâce à l'action de producteurs, en l'occurrence les végétaux et autres organismes photosynthétiques, qui captent l'énergie solaire pour convertir les molécules de dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique en molécules carbonées indispensables à la vie. Ces molécules sont ensuite absorbées par les consommateurs, c'est-à-dire les organismes qui se nourrissent d'autres organismes.

De tous les éléments chimiques, le carbone n'a pas son pareil pour former des molécules volumineuses, complexes et variées. Cette diversité moléculaire a rendu possible la diversité des organismes qui ont évolué sur Terre. Les protéines, l'ADN, les glucides et les autres molécules qui caractérisent la matière vivante contiennent tous des atomes de carbone. Ceux-ci sont liés les uns aux autres et à des atomes d'autres éléments. Bien que les molécules complexes renferment d'autres éléments, tels que l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N) et parfois du soufre (S) ou du phosphore (P), c'est aux multiples possibilités de liaisons du carbone (C) que nous devons l'infinie variété des molécules organiques.

Le chapitre 5 portera tout particulièrement sur les molécules biologiques volumineuses, comme les protéines, mais ce sont les molécules plus petites et leurs propriétés que nous étudierons dans le présent chapitre. Nous les utiliserons pour illustrer des concepts d'architecture moléculaire qui aident à comprendre l'importance que le

carbone revêt pour la vie et qui mettent en lumière, une fois de plus, le thème de l'émergence : l'organisation de la matière vivante fait apparaître des propriétés que chacun de ses composants pris isolément ne possède pas.

CONCEPT 4.1

La chimie organique étudie les composés du carbone

Pour des raisons historiques, les substances qui contiennent du carbone s'appellent composés organiques, et la branche de la chimie qui les étudie se nomme **chimie organique**. Au début des années 1800, les chimistes ont appris à fabriquer en laboratoire de nombreux composés simples en combinant des éléments dans les conditions appropriées, mais ils croyaient qu'il était impossible d'effectuer la synthèse artificielle de molécules complexes, comme celles que l'on peut extraire de la matière vivante. À cette époque, on considérait que seuls les êtres vivants, investis d'une force vitale échappant aux lois physiques et chimiques, pouvaient vraisemblablement fabriquer les composés organiques.

Les chimistes commencèrent à s'éloigner de cette conception lorsqu'ils apprirent enfin à synthétiser des composés organiques en laboratoire. En 1828, Friedrich Wöhler, un chimiste allemand qui avait reçu l'enseignement de Berzelius, un des fondateurs de la chimie moderne, essaya de fabriquer un sel « inorganique », le cyanate d'ammonium, en mélangeant des solutions d'ions ammonium (NH_4^+) et d'ions cyanate (CNO^-). Il s'aperçut avec stupéfaction qu'il avait fabriqué de l'urée, un composé organique présent dans le plasma et l'urine des animaux.

Au cours des décennies suivantes, les chimistes réussirent à synthétiser en laboratoire des composés organiques de plus en plus complexes, renforçant ainsi l'idée que les processus de la vie obéissent à des lois physiques et chimiques. La définition de la chimie organique fut alors étendue à l'étude de tous les composés du carbone, quelle que soit leur origine. Les composés organiques varient des molécules simples, telles que le méthane (CH_4), aux molécules gigantesques, comme les protéines, qui possèdent chacune des milliers d'atomes.

Les molécules organiques et l'origine de la vie sur Terre

ÉVOLUTION En 1953, Stanley Miller, qui faisait des études supérieures sous la direction de Harold Urey à la University of Chicago, contribua à situer la synthèse abiotique (qui n'exige pas de recourir aux êtres vivants) des composés organiques dans le contexte de l'évolution. Étudiez la **figure 4.2** pour prendre connaissance de cette expérience marquante. À partir de ses résultats, Miller tira la conclusion qu'il était possible de synthétiser spontanément des molécules organiques complexes dans ce qu'il croyait être les conditions environnementales de la Terre primitive. Dans la rubrique **Habilités scientifiques**, vous aurez l'occasion de travailler avec les données d'une expérience qui, à l'instar de celle de Miller, montre que la synthèse abiotique de composés organiques pourrait constituer une des premières étapes de l'origine de la vie et avoir débuté tout près des volcans (voir la figure 25.2).

D'un être vivant à l'autre, on trouve à peu près les mêmes pourcentages des principaux éléments constitutifs de la vie (C, H, O, N, S et P), ce qui témoigne du fait que tous les organismes ont évolué à partir de la même origine. Cet ensemble d'éléments constitutifs peut paraître limité, mais grâce à la capacité du carbone d'engager quatre liaisons, les agencements possibles sont si nombreux qu'ils permettent la formation d'une variété inépuisable de molécules organiques. Les diverses espèces ainsi que les différents individus d'une même espèce se distinguent par les variations des types de molécules organiques qu'ils peuvent synthétiser. Dans un sens, l'immense diversité des organismes qui vivent sur la planète (et ceux qui se trouvent dans les restes fossiles) ne pourrait exister sans la polyvalence chimique unique du carbone.

RETOUR SUR LE CONCEPT 4.1

1. Pourquoi Wöhler était-il étonné de constater qu'il avait produit de l'urée ?
2. **HABILITÉS VISUELLES** ▶ Révisez la figure 4.2. Lorsque Miller a essayé son expérience sans production d'étincelles, il ne trouva aucun composé organique. Qu'est-ce qui pourrait expliquer ce résultat ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT 4.2

Les atomes de carbone peuvent former une grande variété de molécules en se liant à quatre autres atomes

La clé des propriétés chimiques d'un atome réside dans sa configuration électronique. Celle-ci détermine le type et le nombre de liaisons que l'atome forme avec d'autres atomes. Rappelez-vous que ce sont les électrons de valence, c'est-à-dire ceux présents dans la couche périphérique, qui peuvent participer à l'établissement de liaisons avec d'autres atomes.

La formation de liaisons avec le carbone

Le carbone possède au total six électrons : deux dans sa première couche électronique et quatre dans sa seconde ; il a donc quatre électrons de valence dans une couche qui peut en contenir jusqu'à huit. Afin de combler son dernier niveau énergétique, il partage ses quatre électrons avec d'autres atomes, obtenant ainsi huit électrons dans ce niveau. Chaque paire d'électrons mis en commun constitue une liaison covalente (voir la figure 2.10d). Dans les molécules organiques, le carbone forme généralement des liaisons covalentes simples ou doubles. En fait, chaque atome de carbone se comporte comme un point d'intersection à partir duquel une molécule peut se ramifier dans quatre directions. C'est cette propriété qui permet au carbone de former de grosses molécules complexes.

Si un atome de carbone forme quatre liaisons covalentes simples, celles-ci pointent vers les sommets d'un tétraèdre en raison de la position des quatre orbitales hybridées.

Des molécules organiques peuvent-elles se former dans des conditions censées simuler celles de la Terre primitive ?

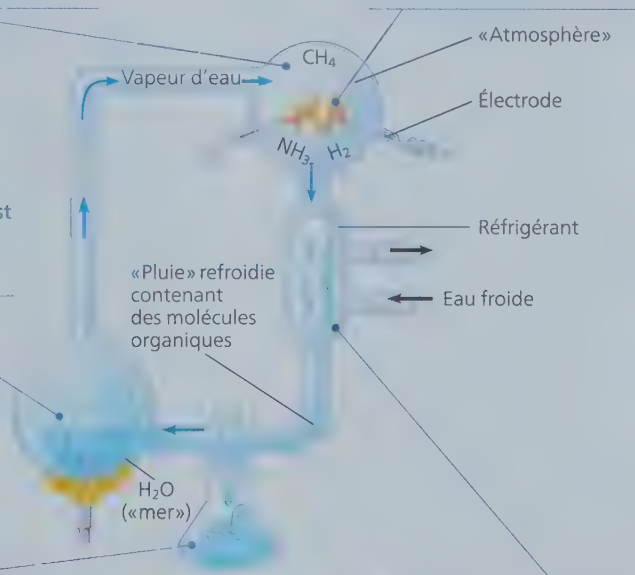
■ **HYPOTHÈSE** ■ Si des molécules organiques ont pu se former spontanément dans les conditions qui existaient sur la Terre aux origines de la vie, alors il serait possible actuellement, en simulant ces conditions d'origine, de retrouver quelques-unes de ces molécules organiques dans le milieu réactionnel.

■ **EXPÉRIENCE** ■ En 1953, Stanley Miller mit au point un système fermé pour imiter en laboratoire ce qu'on croyait être à l'époque les conditions environnementales de la Terre primitive. La mer primitive est simulée par un ballon d'eau que Miller chauffe jusqu'à ébullition. La vapeur d'eau passe alors dans un second ballon situé plus haut contenant un mélange de gaz (l'«atmosphère»). Des décharges électriques dans l'atmosphère synthétique imitent les éclairs.

2 L'«atmosphère» contient un mélange d'hydrogène gazeux (H_2), de méthane (CH_4), d'ammoniac (NH_3) et de vapeur d'eau.

3 Des décharges électriques imitent les éclairs.

1 Le mélange aqueux dans le ballon représentant la mer est chauffé; la vapeur d'eau passe dans le récipient simulant l'«atmosphère».



5 La matière circule en boucle dans l'appareil et Miller collecte périodiquement des échantillons pour l'analyse.

4 Un réfrigérant refroidit l'atmosphère, provoquant une pluie composée d'eau et de molécules qui tombent dans le ballon représentant la mer.

■ **RÉSULTATS** ■ Miller identifia diverses molécules organiques communément présentes chez les êtres vivants. Il isola des composés simples, comme le formaldéhyde (CH_2O) et le cyanure d'hydrogène (HCN), et diverses molécules plus complexes, comme des acides aminés et de longues chaînes de carbone et d'hydrogène nommées hydrocarbures.

■ **CONCLUSION** ■ Il est bien possible que les conditions régnant sur la Terre primitive aient permis la synthèse abiotique de molécules organiques, une première étape dans l'origine de la vie. On sait aujourd'hui que l'atmosphère de la Terre primitive est différente

de l'atmosphère simulée par Miller, mais des expériences récentes réalisées à partir de la liste révisée des substances chimiques présentes à l'origine ont également permis de produire des molécules organiques. (Nous étudierons cette hypothèse plus en détail au concept 25.1.)

Source des données: S. L. Miller, A production of amino acids under possible primitive Earth conditions, *Science* 117: 528-529 (1953).

ET SI ? ► Si Miller avait augmenté la concentration de NH_3 dans son expérience, comment les quantités relatives des produits HCN et CH_2O auraient-elles varié ?

Dans le méthane (CH_4), les angles des liaisons sont de $109,5^\circ$ (figure 4.3a), et ils devraient être sensiblement les mêmes dans toutes les molécules où le carbone établit quatre liaisons simples. Par exemple, l'éthane (C_2H_6) prend la forme de deux tétraèdres réunis par un de leurs sommets (figure 4.3b). Dans les molécules contenant plusieurs atomes de carbone engagés dans

des liaisons simples, chaque groupement constitué d'un atome de carbone lié à quatre autres atomes forme un tétraèdre. Cependant, lorsque deux atomes de carbone sont réunis par une liaison double, comme dans l'éthène (C_2H_4), tous les atomes réunis à ces carbones se trouvent dans un même plan (figure 4.3c). Bien qu'on écrive leur formule développée comme si elles étaient

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

HABILETÉS SCIENTIFIQUES

Calculer des rapports molaires

■ LES PREMIÈRES MOLÉCULES BIOLOGIQUES ONT-ELLES PU SE FORMER PRÈS DES VOLCANS DE LA TERRE PRIMITIVE ? ■

En 2007, Jeffrey Bada, un étudiant qui avait fait ses études supérieures sous la direction de Stanley Miller, a découvert des éprouvettes d'échantillons qui n'avaient jamais été analysés à la suite de l'expérience réalisée par Miller en 1958. Parmi les gaz dont Miller s'était servi dans son expérience pour obtenir son mélange de réactifs se trouvait le sulfure d'hydrogène (H_2S). Le H_2S est libéré par les volcans et permettait à Miller de simuler les conditions autour des volcans sur la Terre primitive. En 2011, Bada et ses collègues ont publié les résultats de l'analyse de ces échantillons « oubliés ». Dans le présent exercice, vous allez calculer les rapports molaires des réactifs et des produits de l'expérience réalisée avec le H_2S .

■ **MÉTHODE** ■ Selon ses notes de laboratoire, Miller utilisait le même appareil de laboratoire que dans son expérience originale (voir la figure 4.2), à la différence que son mélange de réactifs gazeux incluait le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2), le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'ammoniac (NH_3). Après avoir simulé durant trois jours des conditions régnant autour des volcans, Miller a recueilli des échantillons du liquide obtenu, a purifié partiellement les substances chimiques et a conservé ses échantillons dans des flacons stériles hermétiques. En 2011, Bada et son équipe de chercheurs ont utilisé des méthodes modernes pour analyser les produits de ces flacons, plus précisément pour rechercher la présence d'acides aminés, éléments constitutifs des protéines.

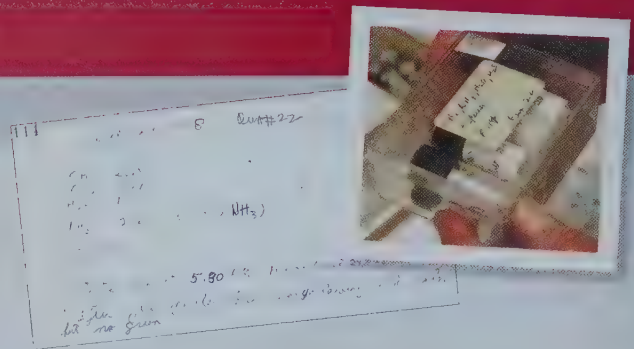
■ **RÉSULTATS** ■ Le tableau ci-dessous montre 4 des 23 acides aminés identifiés par l'analyse de 2011 dans les échantillons provenant de l'expérience que Miller a réalisée en 1958 sur le H_2S .

| Composé obtenu | Formule moléculaire | Rapport molaire (à la glycine) |
|----------------|--|--------------------------------|
| Glycine | $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ | 1,0 |
| Sérine | $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_3$ | $3,0 \times 10^{-2}$ |
| Méthionine | $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2\text{S}$ | $1,8 \times 10^{-3}$ |
| Alanine | $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$ | 1,1 |

Source des données: E. T. Parker et coll., Primordial synthesis of amines and amino acids in 1958 Miller H_2S -rich spark discharge experiment, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 5526-5531 (2011).

INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ▼

1. Une *mole* est le nombre de particules d'une substance dont la masse équivaut à sa masse moléculaire (ou atomique) en daltons. Il y a $6,02 \times 10^{23}$ molécules (ou atomes) dans 1,0 mol (nombre d'Avogadro; voir le concept 3.2). Le tableau de données montre les

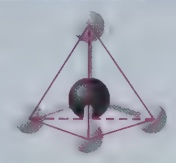

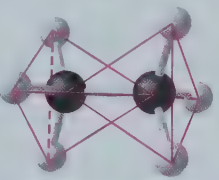

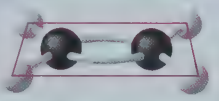
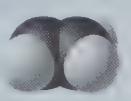


▲ Quelques notes prises par Stanley Miller au cours de son expérience de 1958 à l'aide de sulfure d'hydrogène (H_2S) et ses flacons originaux.

«rapports molaires» de quelques-uns des produits obtenus dans l'expérience de Miller avec le H_2S . Dans un rapport molaire, chaque valeur sans unité est exprimée par rapport à l'étalon établi par le protocole d'une expérience. Ici, l'étalon est le nombre de moles de glycine, un acide aminé, dont la valeur a été établie à 1,0. Ainsi, la sérine a un rapport molaire de $3,0 \times 10^{-2}$, ce qui signifie que pour chaque mole de glycine, il y a $3,0 \times 10^{-2}$ mol de sérine. (a) Trouvez le rapport molaire de la méthionine à la glycine et expliquez ce que cela signifie. (b) Combien de molécules de glycine y a-t-il dans 1,0 mol? (c) Pour chaque mole de glycine présente dans l'échantillon, combien de molécules de méthionine y a-t-il? (Rappelez-vous que pour multiplier deux nombres dotés chacun d'un exposant, vous devez additionner leurs exposants; pour les diviser, vous soustrayez l'exposant du dénominateur de l'exposant du numérateur.)

- (a) Quel acide aminé est présent en quantité supérieure à celle de la glycine? (b) Combien de molécules de cet acide aminé y a-t-il de plus que le nombre de molécules dans 1,0 mol de glycine?
- La synthèse de produits est limitée par la quantité de réactifs. (a) Si on introduit 1 mol de CH_4 , de NH_3 , de H_2S et de CO_2 , respectivement, dans un flacon contenant 1 L d'eau (= 55,5 mol de H_2O), combien de moles d'hydrogène, de carbone, d'oxygène, d'azote et de soufre y a-t-il dans le flacon? (b) En vous basant sur la formule moléculaire indiquée dans le tableau, combien faudrait-il de moles de chaque élément pour obtenir 1,0 mol de glycine? (c) Quel est le nombre maximum de moles de glycine que l'on pourrait synthétiser dans ce flacon, avec les ingrédients mentionnés, si aucune autre molécule n'est synthétisée? Expliquez votre réponse. (d) Si la sérine ou la méthionine était synthétisée une à la fois, quel élément serait utilisé en premier, pour chacune? Quelle quantité de chaque produit pourrait être synthétisée?
- Dans l'expérience qu'il avait antérieurement réalisée et publiée, Miller n'utilisait pas le H_2S comme réactif (voir la figure 4.2). Parmi les composés du tableau, lesquels est-il possible de synthétiser dans l'expérience utilisant le H_2S , mais non dans l'expérience réalisée par Miller lui-même?

▼ **Figure 4.3** La géométrie de trois molécules organiques simples.

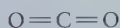
| Molécule et forme moléculaire | Formule moléculaire | Formule développée | Modèle à boules et bâtonnets (géométrie moléculaire en rose) | Modèle compact |
|--|-------------------------------|--|--|---|
| (a) Méthane. Un atome de carbone peut former quatre liaisons simples; la molécule est alors tétraédrique. | CH ₄ | $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$ |  |  |
| (b) Éthane. Une molécule peut posséder plus d'un regroupement tétraédrique d'atomes unis par des liaisons simples. (L'éthane est constitué de deux regroupements de ce type.) | C ₂ H ₆ | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ |  |  |
| (c) Éthène (éthylène). Deux atomes de carbone peuvent s'unir par une liaison double; toutes les liaisons qui se trouvent autour d'eux se situent alors dans un même plan, de sorte que la molécule est plane. | C ₂ H ₄ | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{H} \\ \quad \backslash \quad / \\ \quad \text{C} = \text{C} \\ \quad / \quad \backslash \\ \text{H} \quad \quad \text{H} \end{array}$ |  |  |

planes, la plupart des molécules organiques contiennent au moins quelques groupes d'atomes qui leur donnent une forme tridimensionnelle, et c'est bien souvent la géométrie de ces molécules en trois dimensions qui détermine leur fonction dans une cellule.

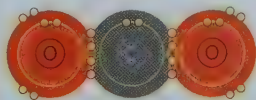
La **valence** d'un atome correspond au nombre d'électrons non appariés de sa dernière couche électronique (couche de valence) et détermine généralement le nombre de liaisons covalentes qu'il peut former. La **figure 4.4** présente la valence du carbone et de ses partenaires les plus fréquents : l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. Ces quatre atomes sont les principaux composants des molécules organiques.

L'atome de carbone a une configuration électronique qui lui permet de former des liaisons covalentes avec d'autres atomes de carbone ou avec les atomes de plusieurs éléments différents. Voyons maintenant comment s'appliquent les règles de formation des liaisons covalentes entre les atomes de carbone et des partenaires autres que l'hydrogène. Nous examinerons deux exemples : les molécules simples de dioxyde de carbone et d'urée.

Dans une molécule de dioxyde de carbone (CO₂), un seul atome de carbone est uni à deux atomes d'oxygène par des liaisons covalentes doubles. La formule développée du CO₂ est donc :



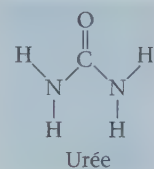
Chaque trait représente une paire d'électrons mis en commun. Par conséquent, les deux liaisons doubles dans CO₂ possèdent le même nombre d'électrons partagés que quatre liaisons simples. Cet agencement permet à tous les atomes de la molécule de combler leur niveau énergétique.



Étant donné que le CO₂ est une molécule très simple qui ne renferme pas d'hydrogène, on le considère généralement comme

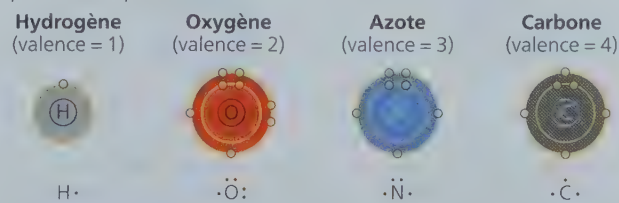
inorganique, même s'il contient du carbone. Qu'on le qualifie d'organique ou d'inorganique, le CO₂ est essentiel pour le monde vivant, car il constitue, par l'intermédiaire des organismes **autotrophes**, la source de carbone de toutes les molécules organiques qui composent les êtres vivants (voir le concept 2.4).

L'urée, CO(NH₂)₂, est le composé organique présent dans le plasma et l'urine que Wöhler a synthétisé au début des années 1800. Encore une fois, chaque atome possède le bon nombre de liaisons covalentes. Ici, l'atome de carbone participe à deux liaisons simples et à une liaison double.



Les molécules d'urée et de dioxyde de carbone ne comportent qu'un seul atome de carbone. Cependant, comme le montre la figure 4.3, un atome de carbone peut également utiliser un ou plusieurs électrons de valence pour former

▼ **Figure 4.4** Schémas des couches électroniques montrant la valence des principaux éléments qui composent les molécules organiques. La valence d'un élément représente sa capacité de liaison. Il correspond au nombre d'électrons que les atomes doivent partager pour conserver des couches électroniques complètes. Tous les électrons sont illustrés dans les schémas de répartition électronique (en haut). Par contre, les diagrammes de Lewis (en bas) ne mettent en évidence que les électrons du dernier niveau énergétique. Notez que le carbone peut former quatre liaisons.



FAITES DES LIENS ► Tracez les diagrammes de Lewis pour le sodium, le phosphore, le soufre et le chlore (reportez-vous à la figure 2.7).

des liaisons covalentes avec d'autres atomes de carbone, chacun pouvant former quatre liaisons. La variété des chaînes que les atomes peuvent former est ainsi presque illimitée.

La diversité des molécules organiques découle des variations dans les squelettes carbonés

Les chaînes carbonées forment le squelette des molécules organiques. Elles varient en longueur et peuvent être linéaires, ramifiées ou cycliques (**figure 4.5**). Certaines portent des liaisons doubles, dont le nombre et la position varient. De telles

▼ **Figure 4.5** Quatre variations possibles dans les chaînes carbonées.

(a) Longueur

$$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ | & | \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ | & | \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$$

Éthane

$$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ | & | & | \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ | & | & | \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$$

Propane

La longueur des chaînes carbonées varie.

(b) Ramification

$$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ | & | & | & | \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ | & | & | & | \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$$

Butane

$$\begin{array}{c} & \text{H} & & & \\ & | & & & \\ & \text{H}-\text{C}-\text{H} & & & \\ & | & & & \\ \text{H} & | & \text{H} & & \\ | & | & | & & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ | & | & | \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$$

2-méthylpropane
(aussi appelé isobutane)

Les squelettes carbonés peuvent être ramifiés ou non.

(c) Position des liaisons doubles

$$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ | & | & | & | \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ | & | & | & | \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$$

But-1-ène

$$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ | & | & | & | \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ | & | & | & | \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$$

But-2-ène

Les squelettes carbonés peuvent porter des liaisons doubles dont la position varie.

(d) Présence de cycles

$$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ | & & | \\ \text{H}-\text{C} & - & \text{C}-\text{H} \\ | & & | \\ \text{H}-\text{C} & - & \text{C}-\text{H} \\ | & & | \\ \text{H}-\text{C} & - & \text{C}-\text{H} \\ | & & | \\ \text{H}-\text{C} & - & \text{C}-\text{H} \\ | & & | \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$$

Cyclohexane

$$\begin{array}{c} & \text{H} & \\ & | & \\ & \text{H}-\text{C}-\text{H} & \\ & | & \\ \text{H} & | & \text{H} \\ | & | & | \\ \text{H}-\text{C} & - & \text{C}-\text{H} \\ | & & | \\ \text{H}-\text{C} & - & \text{C}-\text{H} \\ | & & | \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$$

Benzène

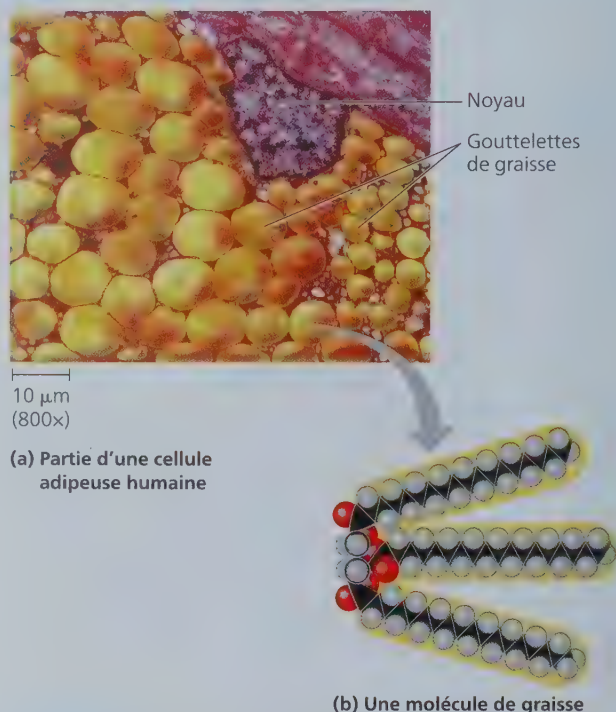
Certaines chaînes carbonées forment un cycle, ou anneau. Dans les formules développées simplifiées (à droite), chaque sommet représente un atome de carbone et les atomes d'hydrogène qui lui sont rattachés.

différences contribuent de façon importante à la complexité et à la diversité moléculaires qui caractérisent la matière vivante. De plus, les atomes d'autres éléments peuvent se lier aux chaînes, isolément ou par groupes d'atomes, là où il y a des sites libres.

Les hydrocarbures

Toutes les molécules illustrées aux figures 4.3 et 4.5 sont des **hydrocarbures**, soit des molécules organiques formées uniquement de carbone et d'hydrogène. Les atomes d'hydrogène se lient aux chaînes carbonées partout où des électrons sont disponibles pour former des liaisons covalentes. Les hydrocarbures sont les principaux composants du pétrole, que l'on appelle combustible fossile parce qu'il provient des restes partiellement décomposés d'organismes ayant vécu il y a des millions d'années.

Bien que les hydrocarbures soient peu abondants dans la plupart des êtres vivants, certaines parties des molécules organiques qui se trouvent dans les cellules comportent principalement du carbone et de l'hydrogène. Par exemple, les graisses sont des molécules qui possèdent de longues chaînes d'hydrocarbures, nommées acides gras, liées à un autre constituant (**figure 4.6**).



▲ **Figure 4.6** Le rôle des hydrocarbures dans les graisses.

(a) Les cellules adipeuses des mammifères accumulent les molécules de graisse pour mettre de l'énergie en réserve. Cette micrographie prise au microscope électronique à transmission (MET) a été colorisée pour mettre en évidence les nombreuses gouttelettes de graisse contenues dans un fragment de cellule adipeuse humaine. Chaque gouttelette accumule une énorme quantité de molécules de graisse. **(b)** Une molécule de graisse est constituée de trois chaînes d'hydrocarbures, responsables du comportement hydrophobe des graisses, rattachées à un autre composant. En se décomposant, les chaînes d'hydrocarbures fournissent de l'énergie. (Noir = carbone; gris = hydrogène; rouge = oxygène.)

FAITES DES LIENS ► Comment les chaînes hydrocarbonées sont-elles à l'origine de la nature hydrophobe des graisses? (Voir le concept 3.2.)

Ni le pétrole ni les graisses ne sont solubles dans l'eau. Ce sont des composés hydrophobes, parce que la grande majorité de leurs liaisons sont des liaisons carbone-hydrogène relativement peu polaires. Les hydrocarbures se caractérisent également par leur capacité à réagir en libérant une quantité d'énergie relativement élevée. Ainsi, l'essence que nous utilisons comme carburant dans les automobiles est composée d'hydrocarbures; chez les animaux, les réserves des molécules de graisse contenant des chaînes d'hydrocarbures leur servent de source d'énergie.

Les isomères

Les **isomères** sont des composés ayant la même formule moléculaire, mais des propriétés différentes, parce qu'ils n'ont pas la même configuration. Ils illustrent bien les variations qui existent dans l'architecture des molécules organiques. Nous examinerons trois types d'isomères : les isomères de structure, les isomères *cis-trans* et les énantiomères.

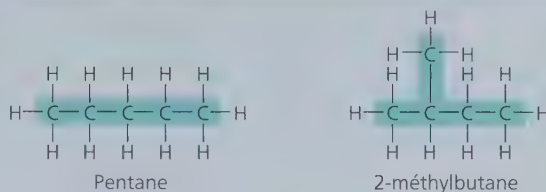
Les **isomères de structure** diffèrent par la disposition de leurs liaisons covalentes. Comparez, par exemple, les deux molécules à cinq atomes de carbone de la **figure 4.7a**. Toutes les deux ont la formule moléculaire C_5H_{12} , mais elles diffèrent dans l'agencement de leur squelette carboné. Un des composés est linéaire, alors que l'autre est ramifié. Le nombre d'isomères possibles augmente considérablement à mesure que les chaînes carbonées s'allongent. Le composé C_5H_{12} a 3 isomères de structure (dont deux sont illustrés à la figure 4.7a), mais C_8H_{18} en a 18 et $C_{20}H_{42}$ en compte 366 319. Les isomères de structure peuvent également différer par la position de leurs liaisons doubles.

Dans les **isomères *cis-trans*** (appelés auparavant *isomères géométriques*), les carbones forment des liaisons covalentes avec les mêmes atomes, mais l'arrangement spatial de ces derniers diffère en raison de la rigidité de la liaison double. Contrairement aux liaisons simples qui permettent aux atomes qu'elles relient d'effectuer des rotations libres autour de l'axe de liaison sans changer le composé, les liaisons doubles ne le permettent pas. Cependant, pour qu'il existe deux isomères *cis-trans* différents, il faut, en plus d'une liaison double, que les carbones de la liaison double portent deux atomes (ou groupes d'atomes) différents. Examinez une molécule simple avec deux carbones liés par des liaisons doubles dont chacun est attaché à un H et à un atome (ou groupe d'atomes) X (**figure 4.7b**). Lorsque ces atomes (ou groupes d'atomes) X se trouvent du même côté de la double liaison, l'isomère prend la forme *cis*. Lorsqu'ils se situent à l'opposé, l'isomère prend la forme *trans*. Cette légère différence de conformation peut avoir un effet important sur l'activité biologique des molécules organiques. Par exemple, le processus complexe de la vision fonctionne grâce à la conversion, sous l'effet de la lumière, de l'isomère *cis* en isomère *trans* du rétinol, un composé synthétisé à partir de la vitamine A (voir la figure 50.17). Les gras *trans*, des gras nocifs qui se forment au cours de la transformation des aliments, dont nous traitons au concept 5.3, en sont un autre exemple.

Les **énantiomères** sont des molécules qui forment une image inversée l'une de l'autre (comme dans un miroir) et dont la structure est différente en raison de la présence d'un *carbone asymétrique* qui porte quatre atomes ou groupes d'atomes différents. (Voir le carbone central dans les modèles à boules et bâtonnets illustrés à la **figure 4.7c**.) Les quatre groupes peuvent

▼ **Figure 4.7 Les trois types d'isomères.** Les isomères sont des composés de formules moléculaires identiques, mais de structures différentes.

(a) Isomères de structure



Les isomères de structure sont des composés qui diffèrent par l'ordre d'enchaînement de leurs atomes, comme ces deux isomères de C_5H_{12} .

(b) Isomères *cis-trans*

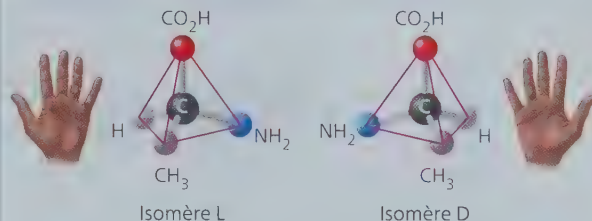


Isomère *cis* : les deux X se situent du même côté.

Isomère *trans* : les deux X se situent à l'opposé.

Les isomères *cis-trans* diffèrent par la disposition dans l'espace des H et des X autour de la liaison double. Dans ces diagrammes, X représente un atome ou un groupe d'atomes liés au carbone porteur de la liaison double.

(c) Énantiomères



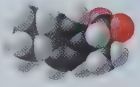
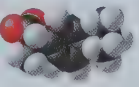
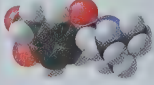
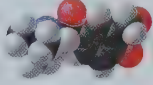
Les énantiomères diffèrent par leur arrangement autour d'un carbone asymétrique. Il en résulte des molécules qui sont l'image inversée l'une de l'autre, comme dans un miroir, telles la main gauche et la main droite. Les deux isomères montrés ici sont appelés isomères L et D (du latin *laevus* et *dexter* pour gauche et droite). Les énantiomères ne peuvent pas se superposer.

FAITES UN DESSIN ► Il existe trois isomères de structure de C_5H_{12} ; dessinez celui qui n'est pas illustré en (a).

s'agencer de deux façons différentes dans l'espace entourant l'atome de carbone asymétrique. Chacune de ces dispositions donne une image inversée de l'autre, comme dans un miroir. Les énantiomères sont un peu comme nos deux mains, l'une gauche et l'autre droite. Tout comme nous ne pouvons faire entrer notre main droite dans le gant de la main gauche, une molécule « droite » ne peut pas être superposée à une molécule « gauche ». Généralement, un seul isomère est biologiquement actif, car seulement cette forme peut se lier à des molécules spécifiques dans un être vivant.

Cette caractéristique revêt une grande importance dans l'industrie pharmaceutique, car les énantiomères d'un médicament peuvent posséder des propriétés différentes, comme c'est le cas pour l'ibuprofène, un médicament contre la douleur et l'inflammation, et pour l'albutérol, un médicament contre l'asthme (figure 4.8). De même, les deux énantiomères de la méthamphétamine exercent des effets très différents. L'un d'eux est la drogue stimulante qui engendre la dépendance, aussi appelée « crystal meth » dans le commerce illicite de la drogue, tandis que l'autre possède un effet beaucoup plus faible; il est même l'ingrédient actif d'une préparation médicamenteuse par inhalation en vente libre pour le traitement de la congestion nasale ! Ces effets très différents des énantiomères sur l'organisme montrent à quel point ce dernier est sensible à de légères variations de l'architecture moléculaire. Une fois encore, nous constatons que les molécules acquièrent leurs propriétés émergentes en fonction de l'arrangement particulier de leurs atomes.

▼ **Figure 4.8** L'importance des énantiomères dans l'industrie pharmaceutique. L'ibuprofène et l'albutérol sont des exemples de médicaments dont les énantiomères exercent des effets différents. (Les lettres *S* et *R* sont utilisées ici pour distinguer ces énantiomères.) L'ibuprofène réduit l'inflammation et la douleur. Il est couramment vendu sous forme de mélange des deux énantiomères, mais l'énantiomère *S* est 100 fois plus efficace que l'énantiomère *R*. L'albutérol est synthétisé et vendu uniquement sous la forme *R* de ce médicament; la forme *S* neutralise la forme active *R*.

| Médicament | Effets | Énantiomère efficace | Énantiomère inefficace |
|------------|---|---|---|
| Ibuprofène | Réduit la douleur et l'inflammation. |  <i>S</i> -ibuprofène |  <i>R</i> -ibuprofène |
| Albutérol | Améliore l'écoulement de l'air dans l'appareil respiratoire des personnes asthmatiques en favorisant le relâchement des muscles des bronches. |  <i>R</i> -albutérol |  <i>S</i> -albutérol |

RETOUR SUR LE CONCEPT 4.2

- FAITES UN DESSIN** ► (a) Écrivez la formule développée de C_2H_4 . (b) Dessinez l'isomère *trans* de $C_2H_2Cl_2$.
- HABILITÉS VISUELLES** ► Dans la figure 4.5, indiquez les deux paires de molécules qui sont des isomères. Pour chaque paire, dites de quel type d'isomères il s'agit.
- Qu'ont en commun l'essence et les graisses ?
- HABILITÉS VISUELLES** ► Examinez les figures 4.5a et 4.7. Le propane (C_3H_8) peut-il former des isomères ? Expliquez votre réponse.

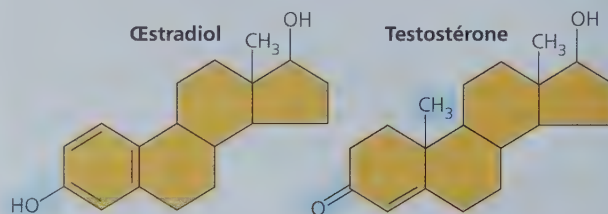
Voir les réponses proposées à l'appendice A.

Le comportement chimique des molécules dépend de quelques groupements fonctionnels

Les propriétés d'une molécule organique reposent non seulement sur l'arrangement de son squelette carboné, mais aussi sur les groupements chimiques qui se rattachent à ce squelette. On peut considérer les hydrocarbures, les molécules organiques les plus simples, comme la structure de base de molécules organiques plus complexes. Un certain nombre de groupements chimiques peuvent venir remplacer un ou plusieurs atomes d'hydrogène de l'hydrocarbure. Ces groupements participent à des réactions chimiques ou exercent une influence indirecte sur la fonction d'une molécule en affectant sa géométrie. En somme, ils contribuent à conférer à chaque molécule ses propriétés uniques.

Les groupements chimiques les plus importants dans les processus de la vie

Examinons la différence entre l'œstradiol (un type d'œstrogène) et la testostérone. Ces composés sont les hormones sexuelles femelle et mâle, respectivement, chez les humains et les autres vertébrés. Il s'agit de stéroïdes, c'est-à-dire de molécules organiques dont le squelette carboné est formé de quatre cycles (anneaux) accolés. Ces hormones diffèrent seulement par les groupements chimiques rattachés aux cycles (représentés ici dans leur forme simplifiée); les distinctions dans l'architecture moléculaire sont en bleu :



Les différentes actions que ces deux molécules exercent sur de nombreuses cellules cibles de l'organisme déterminent le sexe femelle ou mâle chez les vertébrés et provoquent l'apparition de leurs caractères anatomiques et physiologiques distinctifs. Dans ce cas, les groupements chimiques sont importants puisqu'ils ont un effet sur la géométrie moléculaire et, donc, sur la fonction de la molécule.

Dans d'autres cas, les groupements chimiques participent directement à des réactions chimiques; ces groupements chimiques sont appelés **groupements fonctionnels**. Chaque groupement fonctionnel est doté de certaines propriétés, comme la forme et la charge, qui déterminent la façon dont il participera aux réactions chimiques.

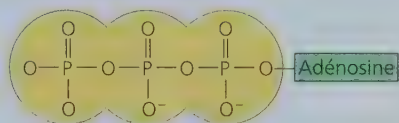
Les sept groupements chimiques les plus importants dans les processus biologiques sont les groupements hydroxyle, carbonyle, carboxyle, amine, thiol (ou sulfhydryle), phosphate et méthyle. Les six premiers peuvent être chimiquement actifs et, à l'exception du cinquième (le thiol), ils sont hydrophiles et augmentent donc la solubilité des composés organiques dans l'eau.

Quant au septième groupement, le groupement méthyle, il n'est pas réactif, mais il se comporte souvent comme un marqueur reconnaissable sur des molécules biologiques. Avant de poursuivre, prenez le temps d'étudier la **figure 4.9** pour vous familiariser avec les groupements chimiques qui sont importants du point de vue biologique.

L'ATP: une importante source d'énergie pour les processus cellulaires

Dans la figure 4.9, la formule du glycérophosphate représente un exemple simple d'une molécule de phosphate organique. Un autre exemple plus complexe, l'**adénosine triphosphate**, ou **ATP**, mérite que l'on s'y attarde, car sa fonction dans la cellule est particulièrement importante. L'ATP est constituée d'une

molécule organique appelée adénosine attachée à une chaîne de trois groupements phosphate.

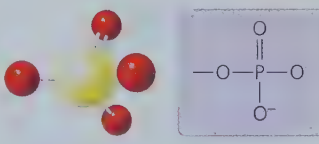
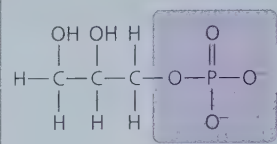

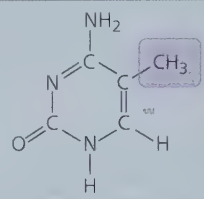


Dans une molécule qui comporte une série de trois groupements phosphate telle que l'ATP, l'un des groupements phosphate peut se séparer des autres à l'issue d'une réaction avec l'eau. Dans le présent livre, nous utilisons le symbole P pour représenter l'ion phosphate inorganique (HOPO_3^{2-}) et le symbole P pour un groupement phosphate appartenant à une molécule organique. En perdant un groupement phosphate, l'ATP devient l'adénosine

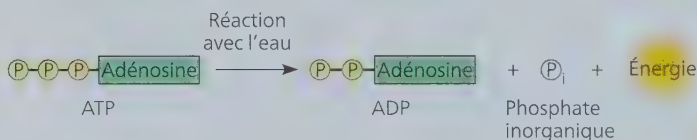
▼ **Figure 4.9** Quelques groupements chimiques importants en biologie.

| Groupement chimique | Propriétés du groupe et nom des composés | Exemples |
|--|--|--|
| Groupement hydroxyle ($-\text{OH}$) <p>(peut s'écrire $\text{HO}-$)</p> | Le groupement hydroxyle est polaire en raison de son oxygène électronégatif. Il forme des liaisons hydrogène avec l'eau, contribuant à dissoudre des composés tels que les glucides. Nom des composés: alcools (leurs noms se terminent habituellement en <i>-ol</i> , comme <i>éthanol</i>) | <p>Éthanol, un alcool présent dans les boissons alcoolisées</p> |
| Groupement carbonyle ($>\text{C}=\text{O}$) | Le groupement carbonyle peut se retrouver à l'intérieur de glucides comportant un groupement cétone (sucres nommés cétoses) ou un groupement aldéhyde (aldoses). Nom des composés: cétones (lorsque le groupement carbonyle est à l'intérieur d'une chaîne carbonée) ou aldéhydes (lorsque le groupement carbonyle est à l'extrémité d'une chaîne carbonée) | <p>Acétone, la cétone la plus simple</p> <p>Propanal, un aldéhyde</p> |
| Groupement carboxyle ($-\text{COOH}$) | Le groupement carboxyle se comporte comme un acide (il peut donner un H^+) parce que la liaison covalente entre l'oxygène et l'hydrogène est fortement polaire. Nom des composés: acides carboxyliques ou acides organiques | <p>Acide acétique, qui donne au vinaigre un goût aigre</p> <p>Forme ionisée de $-\text{COOH}$ (ion carboxylate), présent dans les cellules</p> |
| Groupement amine ($-\text{NH}_2$) | Le groupement amine se comporte comme une base; l'atome d'azote peut accepter un H^+ de la solution dans laquelle la réaction se produit (en milieu aqueux, chez les organismes vivants). Nom des composés: amines | <p>Glycine, un acide aminé (noter son groupement carboxyle)</p> <p>Forme ionisée de $-\text{NH}_2$, présent dans les cellules</p> |
| Groupement thiol ($-\text{SH}$) <p>(peut s'écrire $\text{HS}-$)</p> | Deux groupements thiol peuvent réagir pour former une liaison covalente. Ces liaisons croisées contribuent ensemble à stabiliser la structure des protéines. Les liaisons croisées des cystéines dans les protéines des cheveux maintiennent les cheveux bouclés ou raides. On peut friser les cheveux raides de façon « permanente » en leur donnant une forme autour de rouleaux, puis en rompant et en reformant les liaisons croisées. Nom des composés: thiols | <p>Cystéine, un acide aminé contenant du soufre</p> |

▼ **Figure 4.9** Quelques groupements chimiques importants en biologie. (suite)

| Groupement chimique | Propriétés du groupe et nom des composés | Exemples |
|--|--|--|
| Groupement phosphate ($-\text{OPO}_3^{2-}$)  | Le groupement phosphate contribue à donner une charge négative à la molécule dont il fait partie: (1) quand il est situé à l'intérieur d'une chaîne de phosphates; (2) quand il est à l'extrémité d'une molécule. Les molécules qui comportent des groupements phosphate ont la capacité de réagir avec l'eau en libérant de l'énergie. Nom des composés: phosphates organiques |  Glycérophosphate , qui participe à de nombreuses réactions chimiques importantes dans les cellules |
| Groupement méthyle ($-\text{CH}_3$)  | Ce groupement influe sur l'expression des gènes quand il se trouve sur l'ADN ou sur des protéines liées à l'ADN. Il a également un effet sur la forme et la fonction des hormones sexuelles mâles et femelles. Nom des composés: composés méthylés |  5-méthylcytidine , un composant de l'ADN qui a été modifié par l'addition d'un groupement méthyle |

diphosphate, ou ADP. L'ATP constitue une source d'énergie pour la cellule, en raison de ces liens entre les groupements phosphate qui peuvent aisément réagir avec l'eau pour libérer leur énergie, comme vous le verrez en détail au concept 8.3.



Les éléments chimiques de la vie: une révision

Vous savez maintenant que la matière vivante se compose principalement de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote, et, en plus petites quantités, de soufre et de phosphore. Ces éléments forment tous des liaisons covalentes fortes, une caractéristique essentielle à l'architecture des molécules organiques complexes. Parmi tous ces éléments, le carbone est le maître de la liaison covalente. Son comportement chimique en fait un élément constitutif irremplaçable des molécules organiques. Il est doté de propriétés exceptionnelles: il peut établir quatre liaisons covalentes, s'unir à d'autres atomes de carbone de façon à former des

molécules complexes et se lier à plusieurs éléments différents. Grâce aux innombrables possibilités du carbone, les molécules organiques sont très diversifiées et possèdent des propriétés spéciales associées à l'arrangement unique de leur squelette carboné et de leurs groupements fonctionnels. La riche diversité des organismes de notre planète repose sur cette variation moléculaire.

RETOUR SUR LE CONCEPT 4.3

- HABILETÉS VISUELLES** ► Quels renseignements le terme *acide aminé* donne-t-il sur la structure de cette molécule? Voir la figure 4.9.
- Quel changement chimique se produit dans l'ATP lorsqu'elle réagit avec l'eau et libère de l'énergie?
- FAITES UN DESSIN** ► Considérons une molécule organique comme la cystéine (voir la figure 4.9, l'exemple d'un groupement thiol). Vous décidez d'enlever chimiquement le groupement $-\text{NH}_2$ et de le remplacer par $-\text{COOH}$. Dessinez la structure obtenue. En quoi ce remplacement modifie-t-il les propriétés chimiques de la molécule de cystéine? Le carbone central est-il asymétrique avant le changement? Après le changement?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

RÉVISION DU CHAPITRE 4



Consultez votre MANUEL NUMÉRIQUE, qui vous donne accès aux animations, aux exercices et à la plateforme d'anatomie interactive.

Résumé des concepts clés

CONCEPT 4.1

La chimie organique étudie les composés du carbone (p. 61)

- On a déjà cru que les composés organiques ne pouvaient provenir que des êtres vivants, mais les chimistes ont réussi à synthétiser de tels composés en laboratoire.

- La matière vivante se compose principalement de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote (C, O, H et N, respectivement). À l'échelle moléculaire, la diversité biologique réside dans la capacité du carbone à produire une myriade de molécules aux formes et aux propriétés chimiques particulières.

❓ Comment les expériences de Stanley Miller appuient-elles la théorie selon laquelle les processus de la vie obéissent aux lois physiques et chimiques, et ce, depuis le tout début de l'histoire de la vie?

CONCEPT 4.2

Les atomes de carbone peuvent former une grande variété de molécules en se liant à quatre autres atomes (p. 61 à 68)

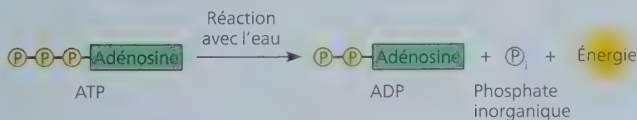
- Grâce à sa capacité d'établir quatre liaisons covalentes, le carbone peut former des molécules très variées. Il peut se lier à différents atomes, dont O, H et N. Les atomes de carbone peuvent également s'unir entre eux et former des chaînes; c'est le cas dans les molécules organiques, dont ils forment le squelette.
- Les squelettes carbonés des molécules organiques varient par leur longueur et par leur structure; leurs atomes de carbone peuvent former des liaisons avec des atomes d'autres éléments.
- Les **hydrocarbures** se composent uniquement de carbone et d'hydrogène (C et H).
- Les **isomères** sont des composés possédant la même formule moléculaire, mais présentant une architecture différente et, donc, des propriétés distinctes. Il existe trois types d'isomères: les **isomères de structure**, les **isomères *cis-trans*** et les **énantiomères**.

HABILETÉS VISUELLES Reportez-vous à la figure 4.9. Quel type d'isomères sont l'acétone (propanone) et le propanal? Combien de carbones asymétriques y a-t-il dans l'acide acétique, la glycine et le glycérophosphate? Ces trois molécules peuvent-elles exister sous forme d'énantiomères?

CONCEPT 4.3

Le comportement chimique des molécules dépend de quelques groupements chimiques (p. 68 à 70)

- Les groupements chimiques attachés aux chaînes de carbone des molécules organiques participent aux réactions chimiques (**groupements fonctionnels**) ou déterminent leurs fonctions en affectant la géométrie moléculaire (voir la figure 4.9).
- L'**adénosine triphosphate (ATP)** est constituée de l'adénosine attachée à trois groupements phosphate. L'ATP peut réagir avec l'eau et former de l'ADP (adénosine diphosphate) et un phosphate inorganique. Cette réaction libère de l'énergie qui peut être utilisée par les cellules.



? En quoi un groupement méthyle diffère-t-il chimiquement des six autres groupements chimiques importants illustrés à la figure 4.9?

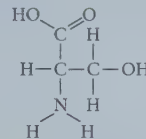
Évaluation

NIVEAU 1: CONNAISSANCES ET COMPRÉHENSION

- Quelle est la définition moderne de la chimie organique?
 - C'est l'étude des composés qui ne peuvent être élaborés que par des cellules.
 - C'est l'étude des composés du carbone.
 - C'est l'étude des composés naturels (par opposition aux composés synthétiques).
 - C'est l'étude des hydrocarbures.

- HABILETÉS VISUELLES** ▶ Quel groupement fonctionnel est absent dans cette molécule?

- Carboxyle.
- Thiol.
- Hydroxyle.
- Amine.



- FAITES DES LIENS** ▶ À quel groupement fonctionnel doit-on principalement le comportement basique d'une molécule organique (voir le concept 3.3)?

- À un hydroxyle.
- À un carbonyle.
- À une amine.
- À un phosphate.

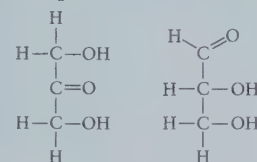
NIVEAU 2: APPLICATION ET ANALYSE

- HABILETÉS VISUELLES** ▶ Visualisez la formule structurale de chacun des hydrocarbures ci-dessous. Lequel porte une liaison double dans sa chaîne carbonée?

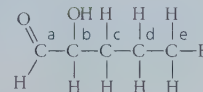
- C₃H₈
- C₂H₆
- C₂H₄
- C₂H₂

- HABILETÉS VISUELLES** ▶ Choisissez l'expression qui décrit correctement ces deux molécules de glucide.

- Isomères de structure.
- Isomères *cis-trans*.
- Énantiomères.
- Isotopes du carbone.



- HABILETÉS VISUELLES** ▶ Repérez l'atome de carbone asymétrique dans cette molécule.



- Pour obtenir un groupement carbonyle, on peut:

- remplacer le —OH par un hydrogène dans un groupement carboxyle.
- ajouter un thiol à un hydroxyle.
- ajouter un hydroxyle à un phosphate.
- remplacer l'azote par l'oxygène dans une amine.

- HABILETÉS VISUELLES** ▶ Laquelle des deux molécules illustrées à la question 5 possède un carbone asymétrique? Lequel de ses atomes de carbone est asymétrique?

NIVEAU 3: SYNTHÈSE ET ÉVALUATION

9. LIEN AVEC L'ÉVOLUTION

FAITES UN DESSIN ▶ Des scientifiques pensent que si la vie extraterrestre existait, elle pourrait être fondée sur le silicium plutôt que sur le carbone comme sur Terre. Examinez le schéma de la répartition électronique pour le silicium à la figure 2.7 et dessinez son diagramme de Lewis. Quelle propriété de cet élément, partagée avec le carbone, rendrait plus vraisemblable la vie basée sur le silicium plutôt que, disons, sur le néon ou l'aluminium?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

