



Frédéric Elie on  
ResearchGate

# Les hydrocarbures

Frédéric Elie

CopyrightFrance.com

**La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.**

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »  
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

**Abstract :** Cet article donne un bref aperçu du domaine des hydrocarbures en chimie organique. C'est un domaine vaste, puisque par définition les hydrocarbures sont des composés formés uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Leurs différentes caractéristiques, associées à leur classement, proviennent de leurs structures, qui peuvent être linéaires (y compris ramifiées) ou bien cycliques (avec un ou plusieurs cycles), ainsi que du caractère saturé ou bien insaturé des liaisons carbone-carbone. Le domaine s'élargit aux composés cycliques dont certains cycles contiennent des atomes autres que carbone et hydrogène (hydrocarbures hétérocycliques). Beaucoup d'hydrocarbures interviennent alors dans la structure de nombreux composés organiques ; par exemple, certains alcènes, comme l'isoprène, interviennent dans la structure des terpènes, que l'on trouve souvent dans les constituants des huiles essentielles. Les hydrocarbures sont plus étendus que ce que l'on désigne couramment comme hydrocarbures, en faisant référence aux composés volatils, combustibles ou inflammables (comme le butane, l'heptane, etc.) ; ceux-ci forment une partie seulement des hydrocarbures : ils sont dans la classe des hydrocarbures aliphatiques. Une autre grande classe est celle des hydrocarbures aromatiques.

## SOMMAIRE

1 – Définition, classement des hydrocarbures

2 – Hydrocarbures aliphatiques

3 – Hydrocarbures aromatiques

4 – Composés aromatiques hétérocycliques

Annexe 1 : Polyène

Annexe 2 : Linalol, monoterpènes et huiles essentielles

[Références](#)

## 1 – Définition, classement des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés constitués uniquement d'atomes de carbone C et d'hydrogène H. Les atomes de carbone ont la possibilité de former des liaisons en chaîne ou en cycles. La formule brute générale des hydrocarbures est  $C_nH_m$ . Une exception toutefois concerne certains hydrocarbures cycliques comportant dans leurs cycles des atomes autres que C et H, et appelés hydrocarbures hétérocycliques.

Le classement des hydrocarbures applique différents critères de structures (réf. [1]) :

- présence d'un ou plusieurs cycles (hydrocarbures cycliques), ou bien absence de cycle (hydrocarbures acycliques, c'est-à-dire des chaînes ouvertes) ;
- liaisons carbone saturées (liaisons carbone simples -C-C-), ce sont les hydrocarbures saturés, ou bien liaisons carbone insaturées (liaisons carbone doubles -C=C- ou triples -C≡C-), ce sont les hydrocarbures insaturés.

Des critères de structures supplémentaires concernant la nature de la chaîne ou du cycle complètent la nomenclature. Par exemple, pour les acycliques les chaînes peuvent être linéaires ou bien ramifiées (présence de chaînes latérales) ; pour les cycliques, il y a un seul cycle (monocycliques) ou bien plusieurs (polycycliques), ces cycles pouvant être par ailleurs aromatiques (cycles de structure benzénique) ou non (alicycliques), etc.

La formule brute des hydrocarbures s'exprime selon leur classement général en faisant apparaître éventuellement le nombre de cycles ou leur nombre d'insaturation (tableau 1).

structure		saturés		insaturés
<b>aliphatiques</b>	<b>acycliques</b> (à chaînes ouvertes)	<b>linéaires</b>	$C_nH_{2n+2}$ ( $n \geq 1$ )	<b>alcanes</b> (ou n-alcanes)  $C_nH_{2(n-i)+2}$ (i : nombre d'insaturation)  i = nombre de liaisons -C=C- : <b>alcènes</b> si 1 seule, formule $C_nH_{2n}$  i = 2 x (nombre de liaisons -C≡C-) : <b>alcynes</b> si 1 seule, formule $C_nH_{2n-2}$
		<b>ramifiés</b> (à chaînes latérales)	$C_nH_{2n+2}$ ( $n > 3$ )	
<b>aromatiques</b> (ou arènes)	<b>cycliques</b>	<b>alicycliques</b> (cycles non aromatiques)	$C_nH_{2(n-c)+2}$ (c : nombre de cycles) car dans chaque cycle il y a 1 paire d'atomes H en moins	$C_nH_{2(n-i-c)+2}$ (i : nombre d'insaturation, c : nombre de cycles)  si c > 1 (polycycliques), cycles avec au moins 2 atomes C en commun : <b>polycycliques condensés</b>
		cycles benzéniques	néant (les aromatiques sont tous insaturés)	
<b>hétérocycliques</b> : présence d'atomes non H et C, tels que O, S, N, P, As				

tableau 1 : vue d'ensemble simplifiée des hydrocarbures

• **Remarque sur l'insaturation** : Un composé organique est dit insaturé lorsque le nombre total des atomes de sa molécule est plus petit que celui que l'on pourrait obtenir à partir de la valence de ces atomes, par des liaisons simples. La valence d'un atome est le nombre de liaisons électroniques qu'il peut avoir avec d'autres atomes. L'insaturation informe alors sur le nombre de liaisons doubles ou triples dans la molécule. La saturation, quant à elle, correspond à l'existence uniquement de liaisons simple. Le nombre d'insaturation d'une molécule définit combien d'insaturations existent dans une molécule à partir de la seule donnée de sa formule brute. Ce nombre dépend de la quantité d'atomes de différentes valences, dans la molécule, les atomes étant soit monovalents (valence = 1), soit trivalents (valence = 3), soit tétravalents (valence = 4). Soient  $n_1$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  le nombre d'atomes respectivement de valence 1, 3, 4 présents dans la molécule, on montre que le nombre d'insaturation est égal à :

$$i = (2n_4 + n_3 - n_1 + 2)/2$$

La valence du carbone est 4, celle de l'hydrogène est 1, on a donc pour les hydrocarbures insaturés :

$$i = (2n_4 - n_1 + 2)/2$$

avec  $n_4 = n$  nombre de carbone C et  $n_1 = n_H$  nombre d'hydrogène H, de cette relation on obtient :

$$n_H = 2(n - i) + 2$$

qui correspond à la formule brute  $C_nH_{2(n-i)+2}$ .

En saturation,  $i = 0$ , ce qui donne  $n_H = 2n+2$ , comme indiqué pour les alcanes au tableau 1.

En insaturation, dans le cas  $i = m$  ( $= 1, 2, 3, \dots$ ) nombre de doubles liaisons (-C=C-), on a  $n_H = 2(n-m)+2$  pour les alcènes ; en particulier si  $m = 1$  (1 seule double liaison) c'est un **monoalcène**  $n_H = 2n$  ( $C_nH_{2n}$ ) ; si  $m = 2$  (2 doubles liaisons) c'est un **diène**  $n_H = 2n-2$  ( $C_nH_{2n-2}$ ) ; et si  $m = 3$  (3 doubles liaisons) c'est un **triène** avec  $n_H = 2n-4$  ( $C_nH_{2n-4}$ ).

En insaturation, dans le cas  $i = 2m$  ( $m = 1, 2, 3$ ) où  $m$  nombre de triples liaisons ( $-C\equiv C-$ ), les composés sont des alcynes :  $n_H = 2n - 4m + 2$  ; en particulier si  $m = 1$  (1 seule triple liaison) c'est un **monoalcyne**  $n_H = 2n - 2$  ( $C_nH_{2n-2}$ ), si  $m = 2$  (2 triples liaisons) c'est un **diyne**  $n_H = 2n - 6$  ( $C_nH_{2n-6}$ ), si  $m = 3$  (3 triples liaisons) c'est un **triyne**  $n_H = 2n - 10$  ( $C_nH_{2n-10}$ ). On remarquera que des composés de structure différente peuvent avoir la même formule brute, comme les diènes et les monoalcynes.

## 2 – Hydrocarbures aliphatiques

Les hydrocarbures aliphatiques regroupent les hydrocarbures acycliques et les hydrocarbures alicycliques, c'est-à-dire composés d'un ou de plusieurs cycles non aromatiques. On désigne par  $C_n$  une molécule hydrocarbure aliphatique qui contient  $n$  atomes de carbone C ; exemple, le méthane  $CH_4$  est un  $C_1$ , le butane  $C_4H_{10}$  est un  $C_4$ .

Les propriétés physiques varient avec  $C_n$  :

- aliphatiques à l'état gazeux à température ambiante :  $C_1$  à  $C_4$  ;
- aliphatiques à l'état liquide et volatils :  $C_5$  à  $C_8$  ;
- aliphatiques à l'état liquide et faiblement volatils :  $C_9$  à  $C_{16}$  ;
- aliphatiques à l'état solide : au-delà de  $C_{16}$ .

Les hydrocarbures aliphatiques acycliques saturés sont les **alcane**s (ou n-alcane), et les insaturés sont les **alcène**s et les **alcyne**s (selon leur nombre d'insaturation  $i$ ). Les aliphatiques acycliques sont constituées soit de chaînes linéaires, soit de chaînes ramifiées (présence de chaînes latérales).

Les hydrocarbures aliphatiques cycliques sont les **alicycliques**. Ils sont monocycliques lorsqu'il y a un seul cycle (nombre de cycles  $c = 1$ ), et polycycliques lorsque  $c > 1$ . Les alicycliques saturés formés d'un seul cycle ( $c = 1$ ), avec au moins 2 atomes C ( $n > 1$ ), sont des **cycloalcane**s. Les alicycliques insaturés à plusieurs cycles ( $c > 1$ ) sont dits **condensés** lorsque les cycles ont au moins 2 atomes C en commun.

Les aliphatiques saturés sont moins réactifs que les insaturés, du fait que les liaisons des atomes C sont toutes occupées par des atomes différents, ce qui n'est pas le cas en insaturation où les doubles ou triples liaisons carbone peuvent se rompre facilement au profit de liaisons simples avec des atomes différents. Ainsi, les alcane sont moins réactifs que les alcène et les alcynes, et donc moins toxiques que ceux-ci. Les insaturés identiques peuvent même réagir entre eux, comme monomères, en donnant des polymères.

### ► Hydrocarbures aliphatiques acycliques :

● **Hydrocarbures aliphatiques acycliques saturés**, ou **alcane**s : Ils regroupent les hydrocarbures **linéaires**, de formule brute générale  $C_nH_{2n+2}$  (avec  $n \geq 1$ ), et les hydrocarbures **ramifiés**, de formule brute générale  $C_nH_{2n+2}$  (avec  $n > 3$ ). Exemples :

■ **linéaires** (ou à chaînes droites) : méthane  $CH_4$  ( $n = 1$ ), éthane  $H_3C-CH_3$  (ou  $C_2H_6$ ,  $n = 2$ ), propane  $H_3C-CH_2-CH_3$  (ou  $C_3H_8$ ,  $n = 3$ ), butane  $H_3C-CH_2-CH_2-CH_3$  (ou  $C_4H_{10}$ ,  $n = 4$ ), pentane  $H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$  (ou  $C_5H_{12}$ ,  $n = 5$ ), hexane  $H_3C-(CH_2)_4-CH_3$  (ou  $C_6H_{14}$ ,  $n = 6$ ), heptane  $H_3C-(CH_2)_5-CH_3$  (ou  $C_7H_{16}$  ( $n = 7$ ), octane  $H_3C-(CH_2)_6-CH_3$  (ou  $C_8H_{18}$  ( $n = 8$ ), nonane  $C_9H_{20}$  ( $n = 9$ )...

Les aliphatiques linéaires correspondent à un radical alkyle auquel un atome d'hydrogène est lié (réf. [16]), le radical alkyle seul étant très instable. Par exemple : le méthane  $CH_4$  a pour radical alkyle le méthyle  $-CH_3$ , l'éthane  $C_2H_6$  a pour radical alkyle l'éthyle  $-C_2H_5$  (ou  $-H_2C-CH_3$ ), etc.

■ **ramifiés** (ou à chaînes latérales) : au niveau d'un ou plusieurs atomes de carbone C, les atomes d'hydrogène H auxquels ils sont liés dans la structure linéaire de base sont substitués par un groupement formant une chaîne latérale. La désignation de la molécule qui dérive ainsi d'un aliphatique linéaire prend en compte le nom de celui-ci, ou bien de sa chaîne modifiée, et mentionne le ou les carbone C qui portent ces substitutions, ainsi que le nom des groupements substituants, selon des règles de la nomenclature internationale IUPAC. On a donc affaire à des noms souvent complexes.

Dans le cas des aliphatiques linéaires saturés, on a par exemple le tableau 2 :

chaîne linéaire de base (numéro des C en rouge)		chaîne ramifiée		substituants (surlignés)
butane $C_4H_{10}$	$1\ 2\ 3\ 4$ $H_3C-CH_2-CH_2-CH_3$ noté aussi : $H_3C-(CH_2)_2-CH_3$	iso butane	$1\ 2$ $H_3C-CH-CH_3$   $CH_3$	groupe méthyl au carbone C $n^{\circ}2$
pen tane $C_5H_{12}$	$1\ 2\ 3\ 4\ 5$ $H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$ noté aussi : $H_3C-(CH_2)_3-CH_3$	iso pentane	$1\ 2$ $H_3C-CH-CH_2-CH_3$   $CH_3$	groupe méthyl au C $n^{\circ}2$



nomenclature IUPAC ils sont généralement désignés à partir de l'alcane qui leur correspond, avec une terminaison en « -ène ». Leur désignation exprime la position du ou des carbone C où ont lieu la ou les doubles liaisons. Selon le nombre de doubles liaisons, on distingue : les monoalcènes (1 seule double liaison), les diènes (2 doubles liaisons), les triènes (3 doubles liaisons).

Exemples :

- **monoalcènes** ( $C_nH_{2n}$ ) :

- éthylène (ou éthène)  $C_2H_4$  :  $H_2C=CH_2$
- propène  $C_3H_6$  :  $H_2C=CH-CH_3$
- but-1-ène  $C_4H_8$  :  $H_2C^1=C^2H-C^3H_2-C^4H_3$  (numéros des C indiqués en rouge, double liaison située au C1)
- pent-1-ène  $C_5H_{10}$  :  $H_2C^1=C^2H-C^3H_2-C^4H_2-C^5H_3$  (double liaison située en C1)
- 3-méthylbut-1-ène  $C_5H_{10}$  :  $H_2C^1=C^2H-C^3H-C^4H_3$  (double liaison située en C1, groupe méthyle en C3)

- 2-méthylbut-2-ène  $C_5H_{10}$  :  $H_3C^1-C^2=CH-CH_3$  (double liaison située en C2, groupe méthyle en C2)

- **diènes** ( $C_nH_{2n-2}$ ) :

- allène  $C_3H_4$  :  $H_2C=C=CH_2$
- 1,2-butadiène  $C_4H_6$  :  $H_2C^1=C^2=C^3H-C^4H_3$  (double liaison située en C1 et en C2)
- 1,3-butadiène  $C_4H_6$  :  $H_2C^1=C^2H-C^3H=C^4H_2$  (double liaison située en C1 et en C3)
- 1,4-pentadiène  $C_5H_8$  :  $H_2C^1=C^2H-C^3H_2-C^4H=CH_2$  (double liaison située en C1 et en C4)
- 2-méthyl-1,3-butadiène  $C_5H_8$  (1) :  $H_2C^1=C^2-C^3H=C^4H_2$  (double liaison en C1 et C3, groupe méthyle en C2)

- **triènes** ( $C_nH_{2n-4}$ ) :

- butatriène  $C_4H_4$  :  $H_2C=C=C=CH_2$
- 1,2,4-pentatriène  $C_5H_6$  :  $H_2C^1=C^2H=C^3H-C^4=C^5H_2$  (double liaison en C1, C2, C4)

Les propriétés physiques des alcènes sont proches de celles des alcanes. Les températures d'ébullition et de fusion d'un alcène sont peu inférieures à celles de l'alcane correspondant. Leur masse volumique, sous forme liquide, est de l'ordre de 0,6 à 0,8 g/cm<sup>3</sup> (par exemple, 0,570 pour l'éthène, 0,610 pour le propène, 0,681 pour l'isoprène). Les alcènes sont aisément solubles dans l'alcool et l'éther, et quasi insolubles dans l'eau. Le caractère insaturé des alcènes leur confère une plus grande réactivité chimique que les alcanes, les liaisons doubles et triples étant rompues lors des réactions d'addition, telles que :

- Hydratation de l'éthylène, en milieu acide, donne l'éthanol (alcool) :  
 $H_2C=CH_2 + H_2O \rightarrow H_3C-CH_2OH$
- Hydrogénation du propène, avec catalyseurs, donne le propane (alcane) :  
 $H_2C=CH-CH_3 + H_2 \rightarrow H_3C-CH_2-CH_3$
- Polymérisation de l'éthylène, avec catalyseurs, donne le polyéthylène (polymère), suivant différents procédés, comme la polymérisation radicalaire contrôlée (réf. [15]), nécessitant des conditions de température et de pression spécifiques. De manière très simplifiée (PE<sub>n</sub> représente une chaîne polyéthylène de n monomères CH<sub>2</sub>) :  
 $PE_n + H_2C=CH_2 + H_2C=CH_2 + \dots \rightarrow PE_n-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-\dots$

Toxicité : l'éthylène et le propène, lorsqu'ils sont inhalés, ont des effets narcotiques. Les alcènes de n plus élevé ont des effets irritants sur les muqueuses et ont des effets narcotiques par ces voies.

Des exemples d'alcènes (polyènes, monoterpènes) sont présentés en annexes 1 et 2.

■ **Alcyne** : ils comprennent une ou plusieurs triples liaisons carbone. Selon la nomenclature IUPAC, l'alcyne est désigné à partir du nom de l'alcane correspondant, et un suffixe « -yne ». Selon le nombre de triples liaisons, on distingue : les monoalcynes (1 seule triple liaison), les diyne (2 triples liaisons), les triynes (3 triples liaisons).

Exemples :

- **monoalcynes** ( $C_nH_{2n-2}$ ) :

- éthyne (ou acétylène)  $C_2H_2$  :  $HC\equiv CH$
- propyne  $C_3H_4$  :  $HC\equiv C-CH_3$
- but-1-yne  $C_4H_6$  :  $HC^1\equiv C^2-C^3H_2-C^4H_3$  (triple liaison en C1)
- but-2-yne  $C_4H_6$  :  $H_3C^1-C^2\equiv C^3-C^4H_3$  (triple liaison en C2)
- pent-1-yne  $C_5H_8$  :  $HC^1\equiv C^2-C^3H_2-C^4H_2-C^5H_3$  (triple liaison en C1)
- pent-2-yne  $C_5H_8$  :  $H_3C^1-C^2\equiv C^3-C^4H_2-C^5H_3$  (triple liaison en C2)

1 Encore appelé isoprène.

- 3-méthylbut-1-yne  $C_5H_8$  :  $HC^1\equiv C^2-C^3H-C^4H_3$  (triple liaison en C1, groupe méthyle en C3)



- hex-1-yne  $C_6H_{10}$  :  $HC^1\equiv C^2-C^3H_2-C^4H_2-C^5H_2-C^6H_3$  (triple liaison en C1)

- **diynes** ( $C_nH_{2n-6}$ ) :

- 1,3-butadiyne  $C_4H_2$  :  $HC\equiv C-C\equiv CH$
- 1,3-pentadiyne  $C_5H_4$  :  $HC^1\equiv C^2-C^3\equiv C^4-C^5H_3$  (triple liaison en C1 et C3)
- 1,3-hexadiyne  $C_6H_6$  :  $HC^1\equiv C^2-C^3\equiv C^4-C^5H_2-C^6H_3$  (triple liaison en C1 et C3)

- **triyne** ( $C_nH_{2n-10}$ ) :

- hexatriyne  $C_6H_2$  :  $HC\equiv C-(CC)-C\equiv CH$

Les propriétés physiques des alcynes sont proches de celles des alcènes et des alcanes. Leur spectre infrarouge est caractéristique dans le domaine des longueurs d'onde 2100 à 2300 nm. L'acétylène (ou éthyne) et le propyne sont à l'état gazeux à température ambiante, le butyne (but-1-yne et but-2-yne) est à l'état liquide. Pour  $n > 14$  les alcynes sont à l'état solide. Ils sont solubles dans l'alcool, l'éther, les solvants organiques apolaires, et peu solubles dans l'eau. Par suite des triples liaisons qu'ils contiennent, les alcynes sont très réactifs, notamment dans les réactions d'addition et de polymérisation, par exemple :

- hydratation de l'acétylène, en présence de sulfate de mercure ( $HgSO_4$ ), donne l'acétaldéhyde :  $HC\equiv CH + H_2O \rightarrow H_3C-CHO$
- hydrogénation du propyne, en présence de catalyseurs (platine, nickel), donne le propane :  $HC\equiv C-CH_3 + 2H_2 \rightarrow H_3C-CH_2-CH_3$
- formation d'un dimère de l'acétylène, le vinylacétylène, avec des catalyseurs ; l'addition du chlorure d'hydrogène au vinylacétylène donne le chloroprène, qui est le monomère du polymère polychloroprène (commercialisé sous le nom néoprène) :  $2 HC\equiv CH \rightarrow HC\equiv C-CH=CH_2$  (vinylacétylène)  
 $HC\equiv C-CH=CH_2 + HCl \rightarrow H_2C=CCl-CH=CH_2$  (chloroprène)

Le polychloroprène a de multiples applications, notamment pour ses propriétés très proches du caoutchouc naturel. Par exemple, sa grande durabilité en fait un matériau intéressant en application marine (réf. [2]).

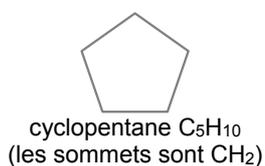
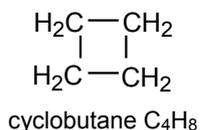
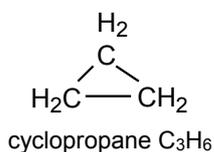
Toxicité : aux concentrations élevées, les alcynes ont des effets narcotiques, ils ont en outre une forte odeur caractéristique et entraînent des effets secondaires graves.

► **Hydrocarbures aliphatiques cycliques** (voir par ex. réf. [3]) :

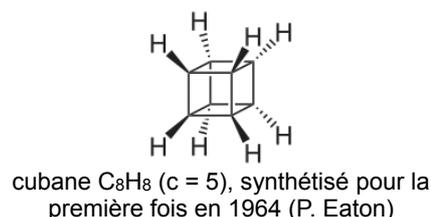
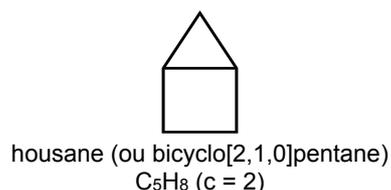
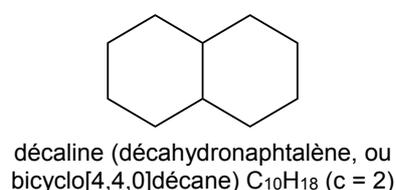
- **Hydrocarbures alicycliques saturés** : par définition, ce sont des hydrocarbures cycliques non aromatiques (voir plus loin). S'ils sont constitués d'un seul cycle ( $c = 1$ ), ce sont des cycloalcanes ; si  $c > 1$ , ils sont polycycliques.

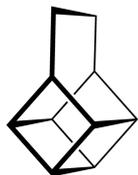
- **Cycloalcanes** (formule brute générale  $C_nH_{2n}$ ) : les liaisons carbone sont simples -C-C- ; le cycle n'est pas plan. Leur désignation reprend celle de l'alcane correspondant avec le préfixe « cyclo- ». Les températures de fusion et d'ébullition des cycloalcanes sont plus élevées que celles des alcanes.

Exemples :

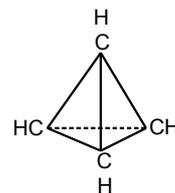


- **Aliphatiques polycycliques** (formule brute générale  $C_nH_{2(n-c)+2}$ ) : Exemples :





basketane  $C_{10}H_{12}$  ( $c = 5$ ) synthétisé pour la première fois en 1966 par Masamune, ainsi que Dauben et Whalen

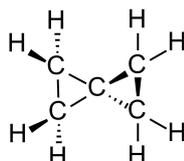


tétrahédrane  $C_4H_4$  ( $c = 3$ ) hypothétique

Lorsque le composé polycyclique est formé de deux cycles ou plus qui ont un seul carbone C en commun, c'est un **spirane**. Le carbone en commun est dit carbone spiro. Le nom d'un spirane commence par le préfixe « spiro- » (éventuellement précédé de « di- » ou « tri- » en présence de 2 ou 3 carbone spiro) et emploie le nom de l'alcane linéaire correspondant. Les cycles peuvent être de structures et compositions différentes. Exemples :



spiro[4.5]décane, c'est un spirane



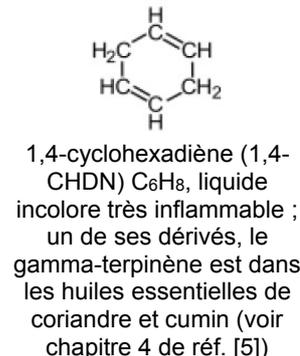
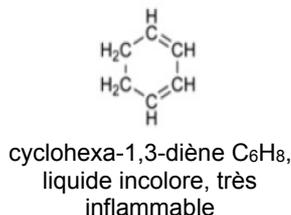
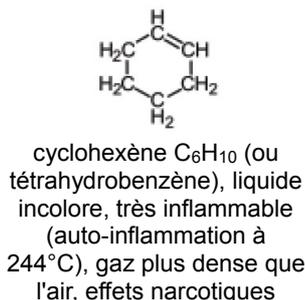
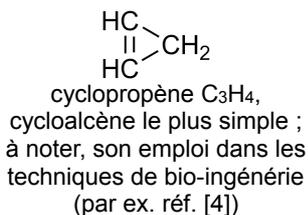
spiropentane  $C_5H_8$  (spiro[2.2]pentane), le plus simple spirane



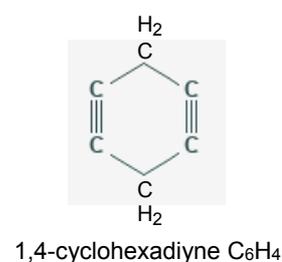
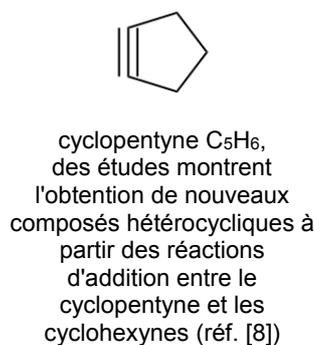
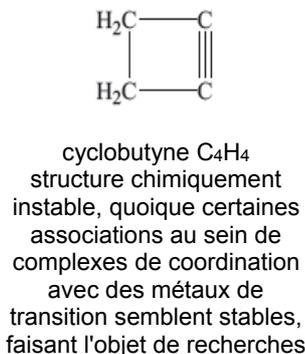
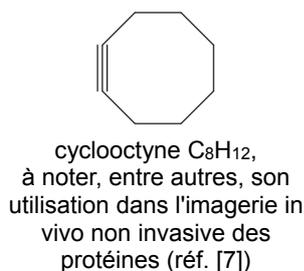
dispiro[4.2.5.2]pentadécane, c'est un dispirane

### • Hydrocarbures alicycliques insaturés :

■ **Cycloalcènes** (monocycliques  $c = 1$ ), formule brute générale  $C_nH_{2(n-i)}$ . Le cycle contient au moins une double liaison  $-C=C-$ . La désignation des cycloalcènes utilise celle des alcènes correspondants, avec le préfixe « cyclo- ». Exemples :



■ **Cycloalcynes** (monocycliques  $c = 1$ ), formule brute générale  $C_nH_{2(n-i)+2}$ . Le cycle contient au moins une triple liaison  $-C\equiv C-$ . La désignation d'un cycloalcyne dérive de celle de l'alcyne correspondante précédée du préfixe « cyclo- ». Les cycloalcynes sont chimiquement instables pour des  $C_n$  faibles : le premier cycloalcyne stable est le cyclooctyne  $C_8H_{12}$  ( $n = 8$ ) (réf. [6]). Exemples :



### 3 – Hydrocarbures aromatiques

► **Règle d'aromaticité de Hückel** (Erich Hückel, 1931) :

Une molécule monocyclique ou polycyclique est aromatique si elle contient  $(4q+2)$  électrons délocalisés dans un système conjugué (orbitales  $\pi$ ), formant une structure cyclique et plane (hybridation  $sp^2$ , parfois  $sp$ ) ;  $q$  est un nombre entier naturel.

L'hydrocarbure cyclique est un **annulène** s'il est complètement conjugué.

Une molécule est un système conjugué si les liaisons entre ses atomes sont covalentes et s'il y a au moins une liaison  $\pi$  délocalisée (figure 1).

Un annulène a pour formule brute générale  $C_mH_m$  si  $m$  est pair,  $C_mH_{m+1}$  si  $m$  est impair.

La règle d'aromaticité se ré-exprime alors, pour les monocycliques : un hydrocarbure monocyclique est un aromatique si c'est un annulène plan, avec  $(4n+2)$  électrons délocalisés.

Pour des hydrocarbures polycycliques la règle des  $(4n+2)$  n'est pas systématiquement vérifiée.

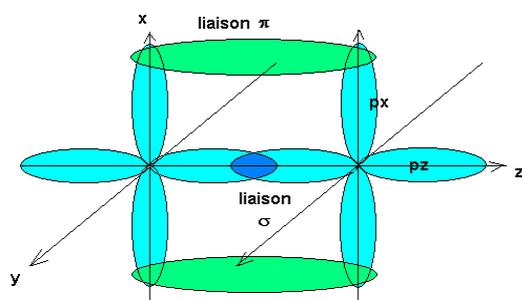
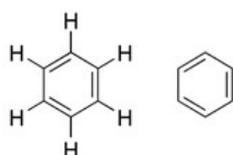


figure 1 : deux types de recouvrements des orbitales électroniques :  $\pi$  et  $\sigma$

L'orbitale moléculaire  $\sigma$  a une symétrie de révolution autour de l'axe de liaison, elle peut faire intervenir tous types d'orbitales atomiques s, p, d, f.. Par contre l'orbitale atomique s ne participe jamais à une orbitale moléculaire  $\pi$  : seules interviennent p, d, f... Les orbitales  $\pi$  ne sont pas localisables par des orbitales hybridées.

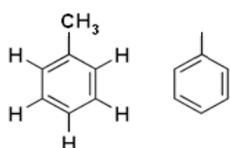
Si l'orbitale hybride est construite au moyen de l'orbitale s, de A orbitales p et de B orbitales d atomiques, on l'appelle hybridation ( $sp^A d^B$ ). Exemple, si un atome A peut se lier à 2 autres ces liaisons peuvent être des orbitales  $sp$  ou  $dp$ ; ce sont des liaisons linéaires (type  $\sigma$ ), c'est le cas du dioxyde de carbone  $CO_2$ , etc... (pour plus de détails, voir réf. [9])

### ► Hydrocarbures aromatiques monocycliques ( $c = 1$ ), exemples :

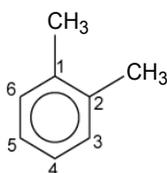


▪ Benzène  $C_6H_6$  ( $n = 6, i = 3$ ) : Liquide toxique, incolore, volatil, d'odeur caractéristique. Masse volumique  $0,879 \text{ g/cm}^3$ . Température de fusion  $5,5^\circ\text{C}$ , température d'ébullition  $80,1^\circ\text{C}$ . La combustion du benzène s'accompagne d'une flamme qui dégage beaucoup de suie. Le benzène est peu soluble dans l'eau, et soluble dans les solvants organiques, l'alcool, l'éther. Il est moins réactif que les autres hydrocarbures insaturés, sa réactivité étant comparable à celle des alcanes. Principales réactions du benzène : substitution, et dans une moindre mesure addition.

Toxique, lésions de la moelle osseuse. Nombreuses utilisations : comme solvant pour extraction des graisses et cires, comme matière première pour la synthèse des phénols, styrène, nitrobenzène, cyclohexane, comme additif aux carburants pour augmenter l'indice d'octane, etc.

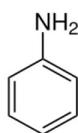


▪ Toluène  $C_7H_8$  ou méthylbenzène ou phénylméthane ( $n = 7, i = 3$ ) : Liquide incolore, très volatil, odeur similaire à celle du benzène, très inflammable, combustion avec une flamme fuligineuse. Provoque des irritations de la peau. Masse volumique  $0,867 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-95^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $110,6^\circ\text{C}$  ; insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'acétone, soluble dans l'éthanol, l'éther, le benzène. Principales utilisations : additif dans les carburants pour agir sur leur pouvoir antidétonant ; fabrication d'explosifs (trinitrotoluène TNT) ; solvant ; matière première pour la synthèse du benzène, benzaldéhyde, polyuréthanes, chlorotoluène, acide benzoïque, etc.



▪ Xylène  $C_8H_{10}$  ( $n = 8, i = 3$ ) : Liquide clair, très inflammable. Il possède 3 isomères : ortho-xylène, méta-xylène, para-xylène, qui ont des propriétés assez différentes telles que, respectivement : masse volumique  $0,880 \text{ g/cm}^3, 0,864 \text{ g/cm}^3, 0,861 \text{ g/cm}^3$  ; température de fusion  $-25,18^\circ\text{C}, -47,87^\circ\text{C}, 13,26^\circ\text{C}$  ; température d'ébullition :  $114,4^\circ\text{C}, 139,1^\circ\text{C}, 138,35^\circ\text{C}$  ; tous insolubles dans l'eau, solubles dans l'éthanol, l'éther, l'acétone, le benzène. L'isomère p-xylène provoque des irritations.

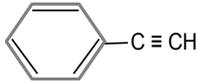
Utilisations : la fabrication des fibres et films de polyester utilise la transformation du para-xylène en acide téréphtalique  $HOOC-C_6H_4-COOH$  ; additif dans les carburants, cires, résines synthétiques, colorants, caoutchouc ; etc.



▪ Aniline ou aminobenzène  $C_6H_5-NH_2$  ( $n = 6, i = 3$ ) : Liquide incolore, huileux, absorbe l'humidité de l'air ; faiblement basique, l'aniline réagit avec un acide fort en donnant des sels (anilinium). Masse volumique  $1,022 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-6,02^\circ\text{C}$ , température d'ébullition  $184,4^\circ\text{C}$ , peu soluble dans l'eau, soluble dans l'éthanol, l'éther, l'acétone, le benzène. La présence du groupement amine  $-NH_2$  de l'aniline entraîne que la réaction d'oxydation donne, entre autres, du nitrobenzène  $C_6H_5NO_2$ , un composé aromatique hétérocyclique. Celui-ci peut être réduit avec du fer.

Toxicité : l'aniline est toxique par inhalation ou par contact cutané.

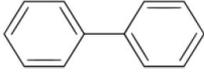
Utilisations : fabrication de colorants, mousses de polyuréthane, etc.



▪ Phénylacétylène ou phényléthyne ou éthynylbenzène  $C_8H_6$  ( $n = 8$ ,  $i = 5$ ) : Liquide incolore, visqueux. Masse volumique  $0,928 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-44,8^\circ\text{C}$ , température d'ébullition  $143^\circ\text{C}$ , soluble dans l'éthanol et les éthers. Son hydrogénation donne le styrène (ou phényléthène ou vinylbenzène)  $C_6H_5-CH=CH_2$  qui est un hydrocarbure aromatique, d'où l'on obtient le polystyrène par polymérisation.

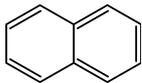
► **Hydrocarbures aromatiques polycycliques** ( $c > 1$ ), exemples :

**Non condensés :**

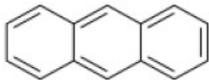


▪ Biphényle ou phénylbenzène  $C_{12}H_{10}$  ( $n = 12$ ,  $i = 6$ ,  $c = 2$ ) : solide cristallin incolore ou jaunâtre, brillant, avec une odeur caractéristique. Masse volumique  $1,04 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $70^\circ\text{C}$ , température d'ébullition  $255^\circ\text{C}$ . Insoluble dans l'eau, faiblement soluble dans les éthers, le toluène. Toxicité : toxique pour les voies respiratoires, la peau les yeux. Effets écotoxicologiques. Utilisations : comme conservateur, anti-moisissure, biocide, employé en pharmacologie, premier produit de base des cristaux liquides.

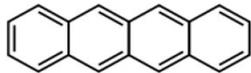
**Condensés :**



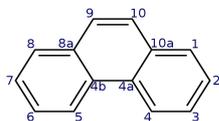
▪ Naphtalène ou naphtaline  $C_{10}H_8$  ( $n = 10$ ,  $i = 5$ ,  $c = 2$ ) : solide cristallin, il se sublime facilement ; odeur caractéristique facilement perceptible par l'être humain. Masse volumique  $1,162 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $80,2^\circ\text{C}$ , température d'ébullition  $217,96^\circ\text{C}$ , température d'auto-inflammation  $567^\circ\text{C}$ , soluble dans l'eau, l'éthanol, les éthers, le benzène, l'acide acétique, les huiles. Toxicité : toxique par inhalation, ingestion et contact cutané, cancérigène. Utilisations : répulsif anti-mites, fabrication de plastiques, colorants, résines, insecticides, agents mouillants des peintures, placoplâtres ; utilisé pour l'élaboration du napalm, employé lors de la guerre du Vietnam.



▪ Anthracène ou anthracine ou paranaphtalène  $C_{14}H_{10}$  ( $n = 14$ ,  $i = 7$ ,  $c = 3$ ) : solide cristallin prismatique incolore, se sublimant facilement. À l'état pur, émet une lumière fluorescente violette. Masse volumique  $1,24 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $217,5^\circ\text{C}$ , température d'ébullition  $340^\circ\text{C}$ , température d'auto-inflammation  $538^\circ\text{C}$ , faiblement soluble dans l'eau. L'oxydation de l'anthracène par l'acide nitrique fumant donne l'antraquinone, utilisé comme produit de base de colorants synthétiques. En présence des UV, l'anthracène se transforme en 9,10-dihydroanthracène (solide incolore, utilisé comme transporteur d'hydrogène  $H_2$  aux substances qui en sont pauvres). Toxicité : non toxique ; il provoque cependant une photosensibilisation de la peau.



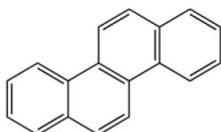
▪ Naphtacène ou tétracène  $C_{18}H_{12}$  ( $n = 18$ ,  $i = 9$ ,  $c = 4$ ) : solide cristallin de couleur orange ; en solution diluée, il présente une fluorescence verte. Masse volumique  $1,35 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $357^\circ\text{C}$ , température d'ébullition  $440^\circ\text{C}$ , insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'éthanol, les éthers, les solutions acides, le benzène. En présence de lumière, le naphtacène capture l'oxygène de l'air et forme des peroxydes incolores ; inversement, par chauffage, l'oxygène est libéré par les peroxydes. Utilisations : le naphtacène intervient dans la chimiluminescence, par exemple dans les bâtons lumineux (réf. [10]) ; c'est un semi-conducteur organique à la base des transistors à effet de champ organiques et des LED organiques ; il intervient comme amplificateur dans les lasers à pigment ; il constitue la structure de base de nombreux antibiotiques.



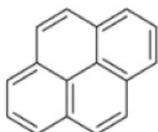
▪ Phénanthrène  $C_{14}H_{10}$  ( $n = 14$ ,  $i = 7$ ,  $c = 3$ ) : solide cristallin sous formes de feuillets incolores, suivant trois formes monocliniques basse température BT (masse volumique  $1,222 \text{ g/cm}^3$  à  $21^\circ\text{C}$ , 1 atm), haute température HT ( $1,189 \text{ g/cm}^3$  à  $71^\circ\text{C}$ , 1 atm), haute pression HP ( $1,371 \text{ g/cm}^3$  à  $20^\circ\text{C}$  (7000 atm)). Sous la forme BT, température de fusion  $101^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $340^\circ\text{C}$ , très peu soluble dans l'eau, soluble dans l'éthanol, les éthers, les solutions acides, le benzène.

Le phénanthrène fait partie des constituants fondamentaux de certains composés biologiques tels que vitamine D, hormones sexuelles, morphine, cholestérol... C'est un polluant organique persistant. Il est facilement absorbé par la peau.

Utilisations : fabrication de colorants, ramollissement des matières synthétiques, antiparasitaire, explosifs, produits pharmaceutiques, matière première pour certains conducteurs électriques...



▪ Chrysène ou benzophénanthrène  $C_{18}H_{12}$  ( $n = 18$ ,  $i = 9$ ,  $c = 4$ ) : solide cristallin incolore légèrement fluorescent, souvent associé au naphtacène à l'état naturel. Masse volumique  $1,274 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $258,25^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $448,05^\circ\text{C}$ . Insoluble dans l'eau, peu soluble dans éthers, éthanol, benzène, solutions acides. Toxicité : substance cancérigène. Utilisations : synthèse de colorants, sensibilisateurs de fluorescence et filtres UV.

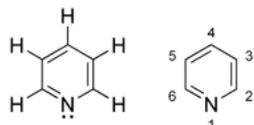


- Pyrène  $C_{16}H_{10}$  ( $n = 16$ ,  $i = 8$ ,  $c = 4$ ) : solide cristallin incolore, présent à 2% dans le goudron. Masse volumique  $1,27 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $156^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $393^\circ\text{C}$ . Insoluble dans l'eau, soluble dans éthanol, éthers, benzène.  
Toxicité : cancérigène, présent dans la fumée de cigarette. Toxique pour les reins et le foie.  
Utilisations : fabrication de colorants, composés optiques, additifs dans les huiles d'isolation électrique, sonde chimique de détermination des solvants...

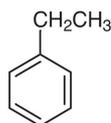
#### 4 – Composés aromatiques hétérocycliques

Les composés aromatiques hétérocycliques sont des molécules cycliques planes contenant plusieurs liaisons doubles conjuguées et des atomes autres que C et H (tels que O, N, S). Comme tous les aromatiques ils ont une grande réactivité, comparable à celle du benzène, notamment par réactions de substitutions électrophiles.

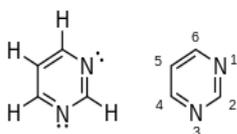
Exemples :



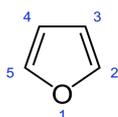
- Pyridine  $C_5H_5N$  : liquide incolore, à l'odeur piquante. Masse volumique  $0,982 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-42^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $115,5^\circ\text{C}$ , soluble dans l'eau, éthanol, éthers, solutions acides, benzène. La pyridine se comporte comme une base ( $pK_a = 5$ ), nécessite des températures d'environ  $300^\circ\text{C}$  pour ses réactions de substitution électrophile (sulfonation par l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , réaction avec le brome Br ou bromation, nitration par l'acide nitrique  $HNO_3$ ...).  
Toxicité : effets narcotiques aux concentrations élevées.  
Utilisations : solvant, catalyseur, intermédiaire dans l'élaboration des produits pharmaceutiques, agrochimiques, insecticides, herbicides, désinfectants, dénaturation de l'alcool dans les antigels, les antifongiques, les produits nettoyants...



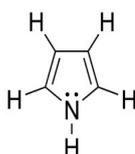
- Éthylbenzène  $C_8H_{10}$  : liquide incolore, à l'odeur caractéristique. Masse volumique  $0,867 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-95^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $136,2^\circ\text{C}$ , température d'auto-inflammation  $432^\circ\text{C}$ , soluble dans l'eau.  
Toxicité : effets sur le système nerveux central, le système de l'oreille interne, fibroses pulmonaires, cancérigène.  
Utilisation : fabrication du polystyrène, solvant, antidétonant des carburants.



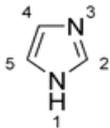
- Pyrimidine ou 1,3-diazine  $C_4H_4N_2$  : solide cristallin incolore. Masse volumique  $1,016 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $22^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $124^\circ\text{C}$ , soluble dans l'eau et l'éthanol. C'est une base faible donnant des sels avec les acides. Il fait partie des structures fondamentales de la vitamine B1, des acides nucléiques (cytosine, thymine, uracile).  
Toxicité : sans.  
Utilisations : fabrication de produits pharmaceutiques, par exemple les acides barbituriques.



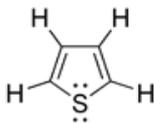
- Furane ou furanne  $C_4H_4O$  : liquide incolore très volatil, facilement inflammable, à odeur d'éther. Masse volumique  $0,951 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-85,7^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $31,4^\circ\text{C}$ , température d'auto-inflammation  $390^\circ\text{C}$ , insoluble dans l'eau, soluble dans l'éthanol, l'acétone, le méthanol, les éthers, les solutions acides, le benzène. Laissé au repos, le furane devient un peroxyde explosif de couleur brune. La réaction avec des acides forts produit la polymérisation du furane et de ses dérivés. Le furane se dissout facilement dans les graisses.  
Toxicité : par ingestion principalement, le furane a des effets toxiques sur la peau, les nerfs périphériques, le système hépato-pancréatique (glycémie, métabolisme des graisses), effets cancérigènes notamment sur le sang.  
Utilisations : préparation des solvants par hydrogénation (tétrahydrofurane THF), élaboration des produits phytosanitaires, fabrication du pyrrole...



- Pyrrole  $C_4H_5N$  : liquide incolore à l'odeur piquante, il brunit au contact de l'air. Masse volumique  $0,969 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-23^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $130^\circ\text{C}$ , d'auto-inflammation  $550^\circ\text{C}$ , peu soluble dans l'eau, soluble dans l'éthanol, les éthers, les solutions acides diluées, le benzène. Le pyrrole est très réactif, notamment dans les réactions de substitution.  
Toxicité : légèrement narcotique.  
Dans les organismes vivants, le pyrrole est présent dans la chlorophylle et dans l'hémoglobine (réf. [11]).



▪ Imidazole ou 1,3-diazole  $C_3H_4N_2$  : solide cristallin incolore. Masse volumique  $1,03 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $88-90^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $257^\circ\text{C}$ , très soluble dans l'eau, température d'auto-inflammation  $480^\circ\text{C}$ , base modérée ( $\text{pKa} = 6,95$  à  $25^\circ\text{C}$ ).  
Le cycle imidazole est présent dans : alcaloïdes, histidine (acide aminé) et l'hormone histamine qui lui est associée par décarboxylation (l'histamine intervient dans les allergies) (v. réf. [5]). Sa fusion avec un cycle pyrimidine donne une purine (nucléotide).  
Utilisations : application en chromatographie des protéines, en pharmacologie (substances dérivées de l'imidazole : antifongiques, anti-protazoaires, anti-hypertenseurs, anti-inflammatoires, maladies neurodégénératives, traitement de la leucémie, tumeurs du système nerveux), comme antiparasitaire (teignes, etc.).



▪ Thiophène  $C_4H_4S$  : liquide incolore. Le thiophène polymérise facilement en donnant le polythiophène. Il est plus réactif que le benzène (nombreuses réactions de substitution). Masse volumique  $1,065 \text{ g/cm}^3$ , température de fusion  $-38,3^\circ\text{C}$ , d'ébullition  $84,2^\circ\text{C}$ , température d'auto-inflammation  $395^\circ\text{C}$ , insoluble dans l'eau, soluble dans l'éthanol, les éthers, les solutions acides, le benzène.  
Toxicité : irritation de la peau.  
Utilisations : dénaturation des alcools, élaboration de polymères semi-conducteurs à partir des dérivés du thiophène (réf. [12]), etc.

## Annexe 1 : Polyène

Les polyènes appartiennent à la famille des alcènes linéaires ; cependant les polyènes peuvent contenir des atomes autres que C et H, ainsi que des structures hétérocycliques à liaisons simples. On a vu que les alcènes linéaires sont des hydrocarbures non ramifiés et insaturés, et contenant une ou plusieurs doubles liaisons carbone  $-C=C-$ . Formule chimique générale (pour les polyènes constitués uniquement de C et H) :  $C_nH_{2(n-m)+2}$  où n nombre d'atomes C dans la molécule, m nombre de doubles liaisons impliquant le carbone C, il est égal à 1 pour une seule double-liaison, à 2 pour deux doubles-liaisons, etc.  
Les polyènes contiennent au moins 2 doubles liaisons ( $m \geq 2$ ). On les dit polyinsaturés.  
Le nom des polyènes est obtenu à partir du nom du diène  $C_nH_{2n-2}$  associé auquel on ajoute "poly-".  
Exemples :

- Polybutadiène (BR), résulte de la polymérisation du 1,3-butadiène  $H_2C^1=C^2H-C^3H=C^4H_2$  (double liaison située en C1 et en C3, les carbone C sont numérotés en rouge) :

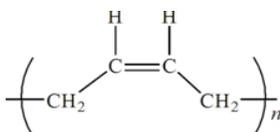


figure A1.1 : polybutadiène, polymère formé de la réplication du motif  $-CH_2-CH=CH-CH_2-$  du 1,3-butadiène

Le polybutadiène est un élastomère, c'est-à-dire un polymère aux propriétés élastiques, pouvant supporter de grandes déformations avec une bonne résilience et un faible hystérésis. Ses applications sont multiples (pneumatiques de véhicules, absorbeurs mécaniques, etc.).

- Certains polyènes ont des fonctions physiologiques importantes dans l'organisme, comme l'acide eicosapentaénoïque (EPA) ou acide timnodonique (formule brute  $C_{20}H_{30}O_2$ ), qui possède 6 doubles liaisons dont une  $-(C=O)-OH$  en bout de chaîne (figure A1.2) (on a donc  $m = 6$ ).

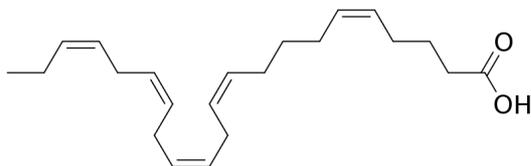


figure A1.2 : acide eicosapentaénoïque (EPA)

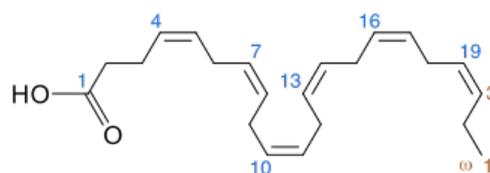


figure A1.3 : acide docosahexaénoïque (DHA)

Dans l'organisme de certains animaux, y compris chez l'être humain, l'EPA contribue à la synthèse d'un autre polyène, l'acide docosahexaénoïque (DHA) de formule brute  $C_{22}H_{32}O_2$  (avec  $m = 6$ ), qui est un acide gras oméga-3<sup>(2)</sup> (figure A1.3). Le DHA est l'un des constituants des membranes cellulaires des Bactéries et des Eucaryotes (référence [17]) que ce soit dans le règne végétal ou le règne animal, certaines espèces pouvant le synthétiser à partir de l'EPA grâce à une enzyme désaturase, d'autres non et devant alors en être

<sup>2</sup> Voir référence [13].

fournies par voie nutritionnelle. La fonction importante du DHA dans les cellules est de favoriser les échanges ioniques et de charges électriques dans leurs réactions biochimiques ; et cela s'avère d'autant plus nécessaire que les organismes vivent en milieu aquatique, ce qui explique que les oméga-3 sont très présents dans ces organismes (poissons gras, ...).

Chez l'être humain, le DHA intervient principalement dans le cerveau, la rétine, les vaisseaux, et dans le contrôle des états inflammatoires ; sa quantité journalière doit être assurée (voir aussi réf. [14]). S'agissant de l'EPA, une de ses principales fonctions est d'être un précurseur de l'hormone prostaglandine (réf. [13]).

• Certains polyènes ont des propriétés qui les rendent intéressants comme antimycosiques, soit « naturellement », soit comme composés pharmaceutiques ; c'est le cas des deux polyènes très proches : la nystatine (C<sub>47</sub>H<sub>75</sub>NO<sub>17</sub>) et l'amphotéricine B (C<sub>47</sub>H<sub>73</sub>NO<sub>17</sub>) (figures A1.4 et A1.5).

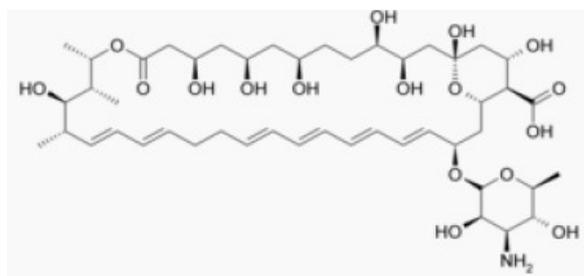


figure A1.4 : nystatine

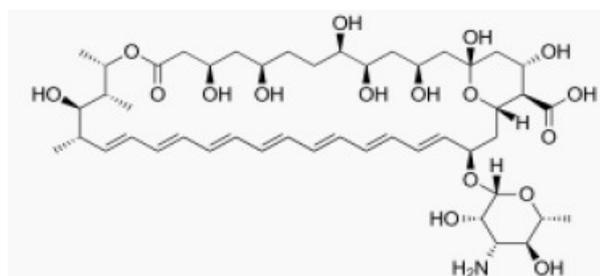
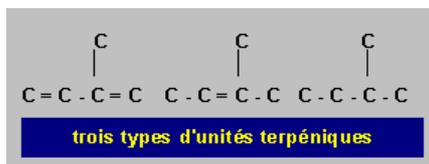


figure A1.5 : amphotéricine B

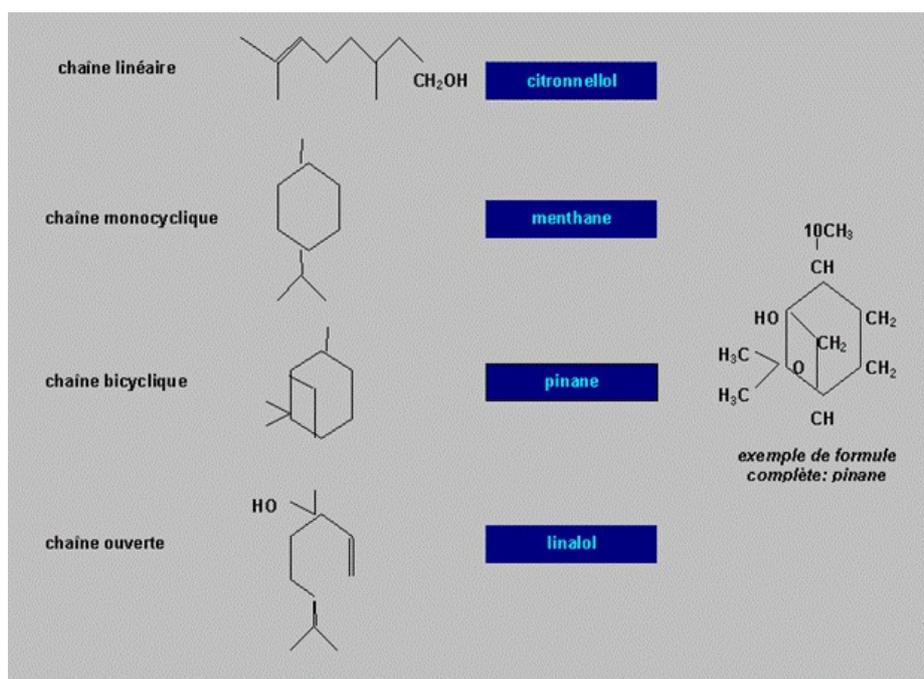
## Annexe 2 : Linalol, monoterpènes et huiles essentielles

C'est un alcool monoterpénique (formule brute C<sub>10</sub>H<sub>18</sub>O) qui bout à 198°C. Son odeur rappelle celle du muguet. On le rencontre dans de nombreuses plantes à huile essentielle: bois de rose, coriandre, lavande, bergamote, basilic...

Les huiles essentielles sont formées de monoterpènes. Ils appartiennent à la famille des terpènes qui sont des hydrocarbures linéaires ou cycliques constitués d'unités terpéniques, découverts par O. Wallach en 1885 :



Les terpènes sont formés de n multiples de l'isoprène C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>, le cas n =2 correspondant aux monoterpènes C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>. Les monoterpènes et leurs dérivés sont donc des chaînes linéaires ou des cycles formés de deux unités isoprène (voir exemples ci-après) :



Autres monoterpènes des huiles essentielles : terpinène, menthol (feuille de menthe), terpinéol, bornéol, thymol (thym), géraniol (essence de rose), citronellal, thuyone, carvone, cinéole (feuille d'eucalyptus)...

ATTENTION - Effets nocifs : à côté des propriétés antispasmodiques du linalol, il faut toutefois insister sur les dangers que peuvent présenter les plantes à huile essentielle en général en cas de surdosage: risques de troubles rénaux, d'albuminurie, de brûlures gastriques, de tachycardie, de troubles nerveux. Dans certains cas 10 millilitres d'huile essentielle pure peuvent être mortelles, comme c'est le cas pour le cinéole de l'eucalyptus !

## Références

[1] IUPAC : *Glossary of class names of organic compounds and reactive intermediates based on structure*. IUPAC Recommendations 1995. Pure & Appl. Chem. Vol.67. Nos 8/9, pp.1307-1375, 1995

[2] Pierre Yves Le Gac : *Durabilité du polychloroprène pour application marine*. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. École nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2014. Français. NNT : 2014ENAM0036ff. Tel-01132912

[3] Auteur : <https://chemicalnote.com/author/janardan-poudel/> : *Alicyclic compounds : cyclic aliphatic compounds*. Site chemicalnote, 15 mars 2021

[4] M.M. Meloni, S. Barton, J.C. Kaski : *An improved synthesis of a cyclopropene-based molecule for the fabrication of bioengineered tissues via copper-free click chemistry*. JABFM, April-June 1-6,2019. doi : 10.1177/2280800019844746

[5] Frédéric Élie : *Les plantes : leurs effets bénéfiques, et leurs risques* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022

[6] Trevor Harris, Igor V. Alabugin : *Clyclooctyne*. Octobre 2017. Researchgate. doi : 10.1002/047084289X.rn02079

[7] J.M. Baskin et al : *Copper-free click chemistry for dynamic in vivo imaging*. PNAS, october 23,2007. doi/10.1073/pnas.0707090104

[8] Jose M. Medina et al : *Cycloadditions of Cyclohexynes and Cyclopentyne*. JACS, October 5,2014. 136, pp.14706-14709. doi/10.1021/ja508635v

[9] Frédéric Élie : *Polarité de l'eau et modèle quantique des molécules* - site <http://fred.elie.free.fr>, 16 avril 2004

[10] C. Amsterdamsky, R. Panico : *Bioluminescence et chimiluminescence, quelques aspects pratiques*. Bulletin de l'Union des Physiciens n°694, publié initialement dans la Revue L'Actualité Chimique, septembre 1984

[11] Frédéric Élie : *Notions sur les oligoéléments et minéraux en nutrition* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022

[12] Dora Demeter : *Nouveaux systèmes conjugués fonctionnels dérivés du thiophène*. Université d'Angers, 2008. Français. Tel-00435521

[13] Frédéric Élie : *Notions sur les lipides et les acides gras* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022

[14] Frédéric Élie : *Besoins nutritionnels chez l'être humain* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022

[15] Cédric Dommanget : *Polymérisation radicalaire contrôlée : le défi de l'éthylène*. Chimie organique. Université Claude Bernard – Lyon I, 2013. Français. NNT : 2013LYO10216. Tel-01162063

[16] Frédéric Élie : *Notions sur les alcools* - site <http://fred.elie.free.fr> , décembre 2022

[17] Frédéric Élie : *Archéobactéries ou Archées, et les trois grands domaines du vivant* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022