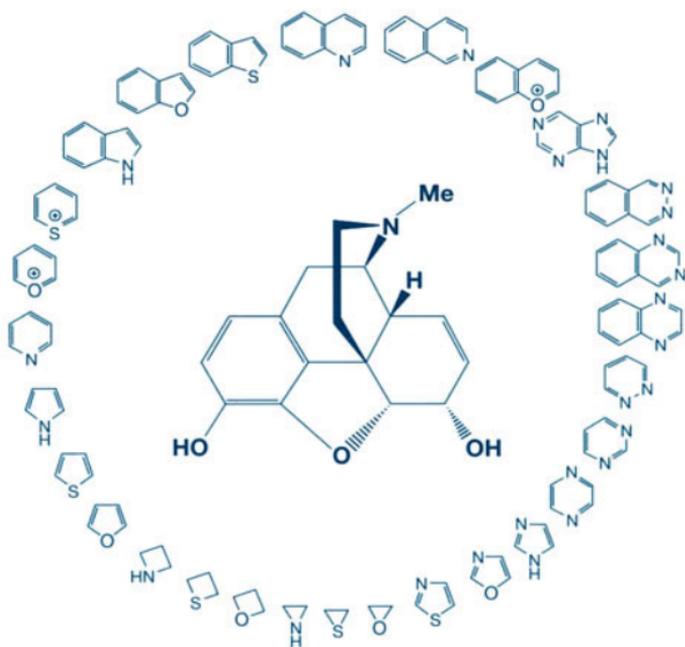


# CHIMIE ORGANIQUE HÉTÉROCYCLIQUE

- Structures fondamentales
- Chimie et biochimie  
des principaux composés naturels

**René Milcent**

Avec la contribution de **François Chau**





# Chimie organique hétérocyclique

Structures fondamentales  
Chimie et biochimie des principaux composés naturels

René MILCENT  
Avec la contribution de François CHAU



17, avenue du Hoggar  
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 2-86883-583-X

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2003

*À ma femme, et mes enfants, Stéphane et Thierry.*

*René MILCENT*

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

# Avant-propos

La chimie hétérocyclique est présente dans tous les domaines industriels, et pourtant peu d'ouvrages français lui sont consacrés.

Après de nombreuses années de recherche et d'enseignement dans ce domaine, j'ai décidé d'apporter mon humble contribution en écrivant cet ouvrage. Il rassemble des connaissances, à la fois sur les principales classes d'hétérocycles qui font l'objet d'enseignements classiques dans les Universités (Sciences et Pharmacie) et Grandes Écoles de chimie, et sur quelques autres structures comme les 1,3-azoles, diazines, purines, ou ptéridines, plus particulièrement impliquées en biologie et qui constituent, en outre, pour certaines d'entre elles, les bases structurales de nombreux médicaments.

Chaque chapitre est constitué de trois parties : les méthodes de synthèse, les propriétés chimiques, et enfin les composés naturels dérivés. Les méthodes de synthèse les plus classiques sont généralement présentées les premières. Les mécanismes indiqués sont ceux qui ont été réellement étudiés ou simplement admis par l'ensemble des spécialistes. Pour les propriétés chimiques, un choix parmi les nombreuses réactions connues a été fait en se basant d'abord sur leur intérêt en synthèse. Les réactions assez récentes de *Minisci*, ou celles qui sont catalysées par le palladium (« cross-coupling », par exemple) sont décrites et font l'objet d'un chapitre de présentation générale, au même titre que les cycloadditions 1,3-dipolaires, et bien que ces dernières interviennent plutôt dans les synthèses d'hétérocycles azotés non présentées dans cet ouvrage. J'ai pensé qu'il était utile de donner un éclairage particulier à ces réactions dans la mesure où elles sont rarement enseignées aux étudiants de premier cycle en raison de leur spécificité.

L'intérêt des chimistes actuels pour tout ce qui concerne les interactions chimie-biologie, fondé, pour partie, sur les applications de leurs travaux dans les domaines bio-industriels m'a conduit à donner une place importante à la description des principaux composés d'origine naturelle dérivés des classes d'hétérocycles étudiées, en indiquant leurs(s) synthèse(s) (les plus

classiques) et leur biosynthèse, dans de nombreux cas, de même que les mécanismes liés à leur activité. Le chapitre 12 consacré aux nucléosides, aux nucléotides et aux acides nucléiques n'a pour seul but que de présenter leurs structures. En revanche, j'ai voulu offrir une place particulière aux principaux alcaloïdes dérivés d'hétérocycles azotés, les plus nombreux, car peu d'ouvrages en donnent une description condensée, utile à la fois aux étudiants et aux chercheurs. Ils peuvent ainsi, facilement, soit découvrir, soit retrouver quelques notions sur une structure ou une classe de ces composés. Par ailleurs, les alcaloïdes représentent une merveilleuse illustration de l'implication des hétérocycles dans notre vie, dans la mesure où ils ont joué un rôle parfois de premier plan dans l'Histoire et sont les bases structurales d'innombrables médicaments.

Je regrette de n'avoir pas eu la possibilité de traiter les applications industrielles des structures présentées sauf rares exceptions, en raison de la nécessité éditoriale de limiter cet ouvrage.

Des documents annexes permettront au lecteur de trouver les significations de nombreuses abréviations souvent employés en chimie organique (pas obligatoirement dans cet ouvrage), et de quelques termes pharmacologiques utilisés dans les parties biologiques. Enfin, quelques lignes retracent l'histoire de la chimie hétérocyclique.

Pour réaliser cet ouvrage, M. François Chau, chimiste, maître de conférences à l'université Paris 7 a apporté une exceptionnelle contribution en effectuant à plusieurs reprises, la tâche particulièrement ingrate des relectures très méticuleuses, et en m'aidant de ses conseils. Je lui adresse mes vifs remerciements ainsi qu'à M. le Pr. Pierre Labbe, biochimiste à l'université Paris 7, qui a accepté de lire la partie biologique et de formuler des remarques judicieuses qui ont toutes été prises en compte.

Que tous mes collègues des universités Paris 6 et Paris 7, qui, ponctuellement, m'ont fait bénéficier de leur compétence, mon éditeur, Mme Agnès Henri et son équipe, et tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce projet, et plus particulièrement M. le Pr. Sézeur et M. le Pr. de Gramont, soient assurés de ma très profonde reconnaissance.

Septembre 2002

# Sommaire

<b>Chapitre 1. Nomenclature</b> .....	1
<b>Chapitre 2. Généralités sur les réactions</b> .....	15
<b>Chapitre 3. Oxiranes, thiiranes, aziridines</b> .....	33
<b>Chapitre 4. Oxétanes, thiétanes et azétidines</b> .....	65
<b>Chapitre 5. Furanes, pyrroles, et thiophènes</b> .....	93
<b>Chapitre 6. Pyridines, sels de pyrylium et de thiopyrylium</b> .....	217
<b>Chapitre 7. Indoles, benzofuranes, benzothiophènes</b> .....	329
<b>Chapitre 8. Quinoléines, isoquinoléines, sels de benzopyrylium, acridines, phénanthridines</b> .....	411
<b>Chapitre 9. 1,3-Azoles et benzimidazoles, benzoxazoles, benzothiazoles</b>	507
<b>Chapitre 10. Diazines et benzodiazines</b> .....	585
<b>Chapitre 11. Purines et ptéridines</b> .....	639
<b>Chapitre 12. Nucléosides, nucléotides et acides nucléiques</b> .....	697
<b>Chapitre 13. Quelques classes d'alcaloïdes</b> .....	725
<b>Abréviations, acronymes et symboles</b> .....	813
<b>Bibliographie</b> .....	819
<b>Lexique de quelques termes pharmacologiques</b> .....	823
<b>Quelques dates de l'histoire de la chimie hétérocyclique</b> .....	827
<b>Index</b> .....	831

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

# 1. Nomenclature

## 1.1 Définition d'un hétérocycle

## 1.2 Règles de nomenclature de Hantzsch-Widman

- 1.2.1 Règles concernant la dénomination des hétérocycles : préfixes et suffixes
- 1.2.2 Monocycles comportant un maximum de doubles liaisons conjuguées
- 1.2.3 Monocycles partiellement ou totalement saturés comportant un seul hétéroatome
- 1.2.4 Monocycles comportant plusieurs hétéroatomes de même nature
- 1.2.5 Monocycles comportant plusieurs hétéroéléments de natures différentes
- 1.2.6 Système bicyclique : hétérocycle accolé à un cycle benzénique
- 1.2.7 Composés formés de plusieurs hétérocycles accolés
- 1.2.8 Succession des éléments de la nomenclature
- 1.2.9 Hétérocycles liés entre eux

## 1.3 Nomenclature de remplacement ou « a » nomenclature

## 1.4 Nomenclature spécifique semi-systématique ou semi-triviale

## 1.1 Définition d'un hétérocycle

En chimie organique, la classification des molécules est basée sur le nombre et la diversité des atomes qui les composent, mais aussi sur les différents types de liaisons qui constituent leur structure.

Dans le cas où les atomes forment une chaîne, les composés correspondants sont dits **acycliques**. Au contraire, si l'enchaînement des atomes forme un cycle, on dira qu'il s'agit de composés **cycliques**.

Si le cycle est entièrement composé d'atomes de carbone, il s'agit de **carbocycle**.

D'une manière générale, si le cycle est entièrement constitué d'un seul type d'atome, carbone ou autre, on ajoute le préfixe iso, **composés isocycliques**.

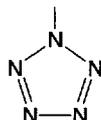
Un cycle qui est constitué d'au moins deux types d'atomes est un **hétérocycle**. Il existe deux groupes d'hétérocycles : ceux qui contiennent un ou des atomes de carbone liés à un ou plusieurs autres éléments comme l'oxygène, le soufre, l'azote... appelés **hétéroéléments ou hétéroatomes** et qui sont les **composés hétérocycliques organiques**, et ceux qui ne contiennent pas d'atome de carbone et qui sont les **hétérocycles inorganiques ou minéraux**, lesquels ne sont pas traités dans cet ouvrage (Fig. 1.1).

**Composé acyclique:**  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH-CH}_2\text{-CH(CH}_3)_2$

**Composés cycliques:**

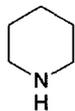


carbocycle  
(cyclohexane)

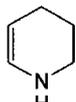


cycle minéral ou inorganique  
(pentazole)

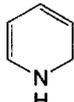
**Composés hétérocycliques organiques**



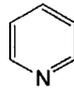
saturé  
(pipéridine)



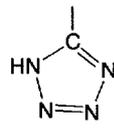
insaturé  
(1,2,3,4-tétrahydropyridine)



insaturé  
(1,2-dihydropyridine)



aromatique  
(pyridine)



aromatique  
(tétrazole)

(pipéridine) (1,2,3,4-tétrahydropyridine) (1,2-dihydropyridine) (pyridine) (tétrazole)

Fig. 1.1

La pipéridine est un **hétérocycloalcane**, dans la mesure où un atome de carbone d'un cycloalcane, ici le cyclohexane, a été remplacé par un hétéroélément, l'azote. Cette définition est encore valable si plusieurs hétéroéléments remplacent plusieurs atomes de carbone dans un cycloalcane (voir nomenclature de remplacement, § 1.3).

Les hétérocycles aromatiques définis selon la règle empirique de Hückel, polyéniques conjugués, ayant  $4n+2$  électrons  $p$  délocalisés dans le cycle ( $n$  égal à 0 ou un

nombre entier), comme la pyridine, le thiophène, le pyrrole, le furane, et dont le cycle est inscrit dans un plan (ou proche d'un plan), représentent le groupe des hétéroarènes. Cette définition peut être étendue à des composés polycycliques comme l'indole, la quinoléine, l'acridine... (Fig. 1.2).

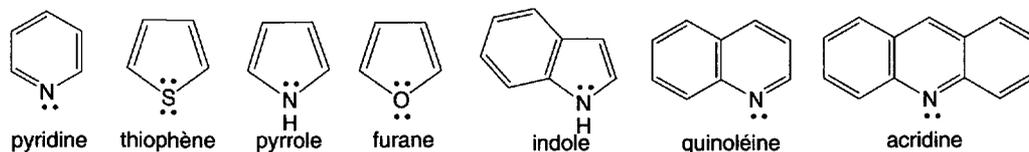


Fig. 1.2

## 1.2 Règles de nomenclature de Hantzsch-Widman

La nomenclature des hétérocycles est régie par des conventions internationales définies par la commission de l'IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry. Elles permettent aux chimistes de tous pays de retrouver la formule d'une molécule à partir de sa dénomination. C'est très utile pour la rédaction de publications de recherche et de dépôt de brevets, à caractère international.

Deux principaux types de règles IUPAC sont utilisées : celles de **Hantzsch-Widman** et celles dites **de remplacement**.

Les règles de nomenclature selon Hantzsch-Widman s'appliquent à de nombreux composés et en particulier aux hétérocycles dont le nombre d'atomes du cycle est compris entre trois et dix. Pour les hétérocycles dont le nombre d'atomes cycliques est supérieur à 10, plus rares, une autre nomenclature a été proposée.

Le but de ce chapitre n'est pas de présenter l'ensemble des règles qui régissent la nomenclature des hétérocycles mais d'en extraire les principales, celles qui concernent la partie la plus large de cette chimie. L'étudiant qui souhaiterait approfondir ses connaissances dans ce domaine fera appel aux ouvrages spécialisés indiqués dans la bibliographie et plus particulièrement à ceux qui sont édités par l'IUPAC (voir la bibliographie).

### 1.2.1 Règles concernant la dénomination des hétérocycles : préfixes et suffixes

À chaque hétéroatome est attribué un préfixe. Ces préfixes sont ordonnés selon une convention pour la dénomination d'un hétérocycle. Dans le tableau 1.1 sont indiqués les préfixes et leur ordre relatif (préséances des atomes O > S > Se > N...). Par exemple, un hétérocycle qui possède dans son cycle un atome d'azote et un atome

Tableau 1.1

Hétéroéléments	Préfixes	Hétéroéléments	Préfixes
oxygène (O)	oxa	bismuth (Bi)	bisma
soufre (S)	thia	silicium (Si)	sila
sélénium (Se)	selena	germanium (Ge)	germa
azote (N)	aza	étain (Sn)	stanna
phosphore (P)	phospha	plomb (Pb)	plomba
arsenic (As)	arsa	bore (B)	bora
antimoine (Sb)	stiba	mercure (Hg)	mercura

d'oxygène aura un nom dans lequel les préfixes seront, successivement, oxa (O), puis aza (N) car  $O > N$ . Pour que le nom soit lu plus facilement, on écrira non pas « oxaza » mais oxaza, avec élision du « a » terminal du préfixe devant une voyelle.

Le nombre de chaînons constituant le cycle est indiqué par deux suffixes, l'un pour les composés insaturés, l'autre pour les composés saturés, voir le tableau 1.2.

Tableau 1.2

Nbre de chaînons du cycle	Cycle insaturé	Cycle saturé	
		non azoté	contenant un ou plusieurs N
3	irène, irine (avec 1 N)	irane	iridine
4	ète	étane	étidine
5	ole	olane	olidine
6 (série A)	ine	ane	
6 (série B)	ine	inane	
6 (série C)	inine	inane	
7	épine	épane	
8	ocine	ocane	
9	onine	onane	
10	écine	écane	

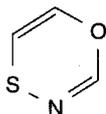
Le suffixe du nom d'un cycle à 6 chaînons totalement insaturé comportant plusieurs hétéroéléments dépend de celui qui a le *rang le plus faible* dans l'ordre de préséance des hétéroatomes. Selon que cet hétéroatome appartient à l'une des 3 séries A, B ou C, le suffixe est **ine** ou **inine** selon le cas.

**Série A** : O, S, Se, Te, Bi, Hg

**Série B** : N, Si, Ge, Sn, Ph

**Série C** : B, F, Cl, Br, I, P, As, Sb

ex. :



cycle insaturé à 6 atomes,  $O > S > N$  et N se situe dans la série B donc OXATHIAZINE

(1,4,3-oxathiazine)

Dans certains cas, les dénominations triviales sont préférées à celles des règles énoncées précédemment. C'est le cas, par exemple, pour le furane (oxole), le pyrrole (azole), la pyridine (azine)...

À ces règles de base, il faut ajouter celles qui sont spécifiques à différents types d'hétérocycles présentés ci-après.

### 1.2.2 Monocycles comportant un maximum de doubles liaisons conjuguées

La dénomination d'un cycle à nombre de chaînons définis et comportant le maximum de doubles liaisons conjuguées possibles est celle qui permet de donner la nomenclature des composés de la même famille d'hétérocycles et comportant moins d'insaturations, et jamais l'inverse (Fig. 1.3). Bien entendu, les suffixes du tableau 1.2 s'appliquent toujours.

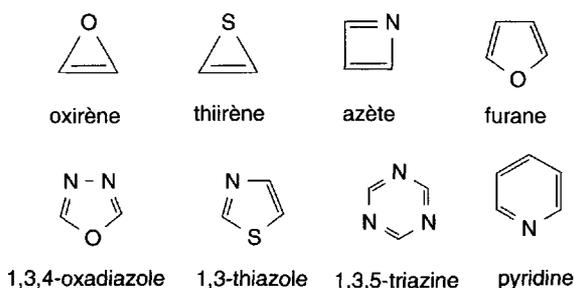


Fig. 1.3

### 1.2.3 Monocycles partiellement ou totalement saturés comportant un seul hétéroatome

Pour les monocycles saturés, s'il n'existe pas de dénomination triviale, les suffixes du tableau 1.2 sont utilisés.

Les monocycles, partiellement saturés, sont nommés en utilisant les préfixes dihydro, tetrahydro... précédés des chiffres indiquant la ou les positions des saturations **dans l'ordre de la numérotation des atomes du cycle**.

Pour les monocycles à un hétéroatome (Fig. 1.4), la numérotation débute toujours à partir de celui-ci. La rotation autour du cycle est ensuite fonction des positions des groupes substituants. Le sens de rotation est alors celui qui fournit **la somme la plus faible des chiffres affectés à ces positions**.

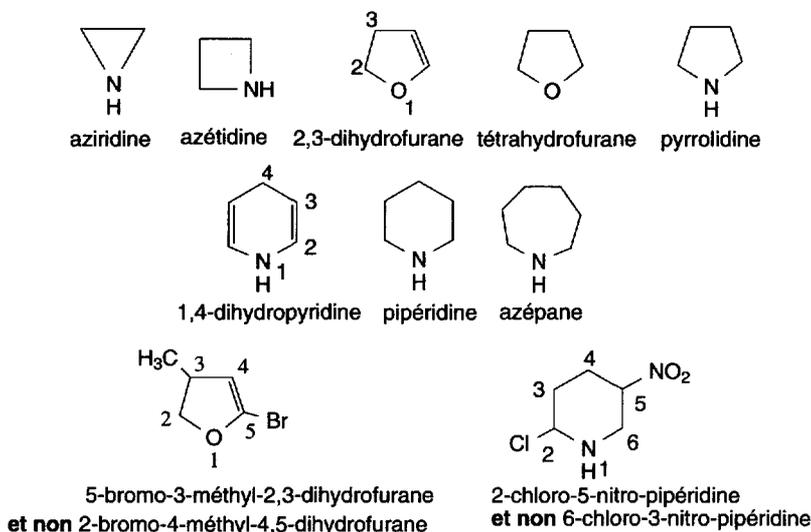


Fig. 1.4

### 1.2.4 Monocycles comportant plusieurs hétéroatomes de même nature

Les monocycles comportant plusieurs hétéroatomes de même nature sont nommés en indiquant les positions de chacun d'eux avant les préfixes di-, tri-, tetra-... Les chiffres signalant les positions de ces atomes sont choisis de telle sorte que **leur somme dans la dénomination de la molécule soit la plus faible possible** (Fig. 1.5).

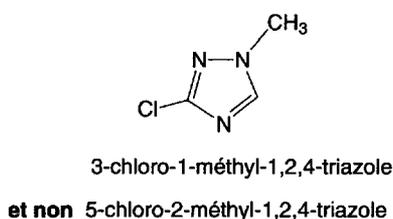


Fig. 1.5

### 1.2.5 Monocycles comportant plusieurs hétéroéléments de natures différentes

Les monocycles comportant plusieurs hétéroéléments de nature différente (Fig. 1.6) sont nommés en fonction de la présence des préfixes de chaque hétéroélément et du nombre de chacun d'entre eux (Tableau 2.2). La position 1 revient à celui qui a la présence supérieure par rapport aux autres (O > S > N...).

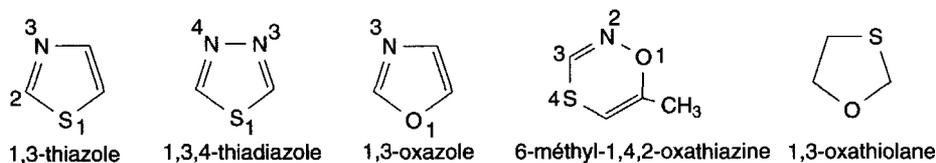


Fig. 1.6

### Position d'un hydrogène pour certains isomères structuraux

Lorsque plusieurs isomères ont pour différence entre eux la position d'un hydrogène dans le cycle, celle-ci est indiquée par un « *H* » en italique précédé de la position de l'atome auquel il est lié, celle-ci étant la plus faible si plusieurs possibilités existent (Fig. 1.7).

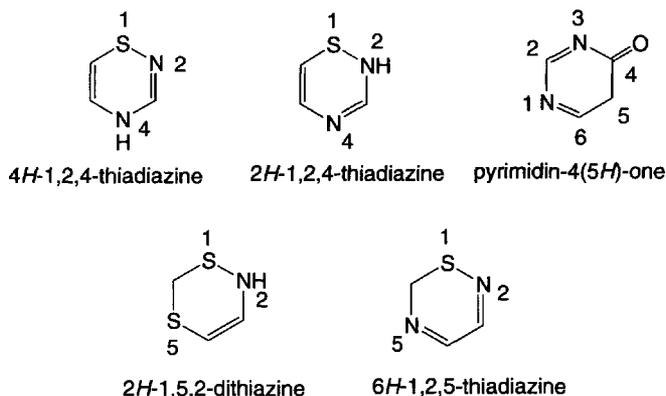


Fig. 1.7

### 1.2.6 Système bicyclique : hétérocycle accolé à un cycle benzénique

Dans la plupart des cas, ces composés possèdent des noms triviaux (quinoléine, isoquinoléine, indole...). Pour les autres composés, le nom de l'hétérocycle est précédé du préfixe « **benzo** » (avec élision du « o » devant une voyelle) suivi d'une lettre entre crochet qui désigne la liaison commune aux deux cycles définis à partir de l'hétérocycle (Fig. 1.8). Pour un système ne comportant qu'un hétéroatome, chaque liaison de l'hétérocycle est alors désignée par une lettre en partant de « a » pour la liaison hétéroatome-carbone, **la plus proche du cycle benzénique**. Pour un système bicyclique comportant un hétérocycle à plusieurs hétéroéléments, le sens de rotation autour de cet hétérocycle est fixé par les règles déjà énoncées faisant intervenir les préséances des hétéroatomes ; les côtés de l'hétérocycle a, b, c... s'en déduisent.

La numérotation des atomes est ensuite définie par la méthode conventionnelle indiquée ci-après (Fig. 1.9).

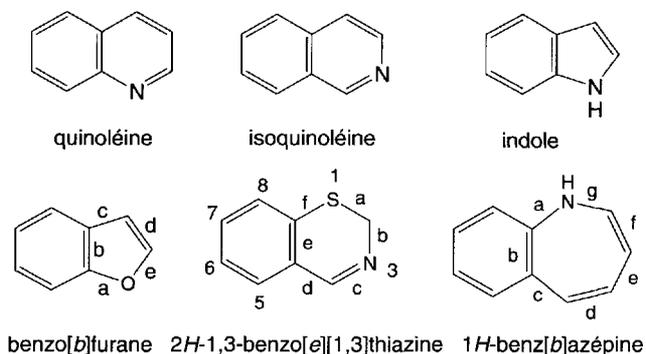
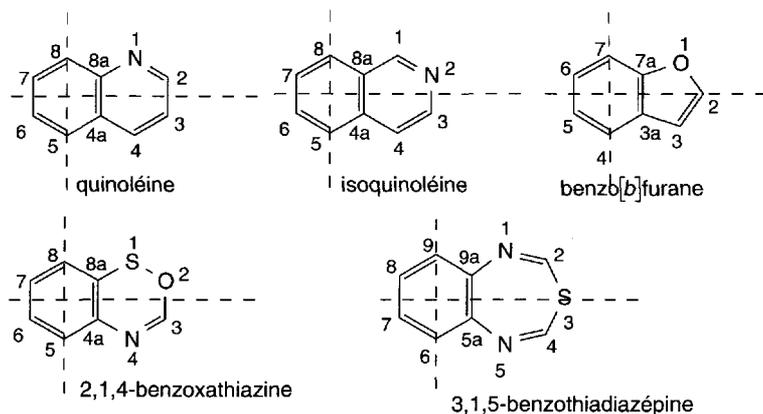


Fig. 1.8

1) Le système est dessiné selon les dispositions suivantes : l'hétérocycle est à droite du cycle benzénique, et l'hétéroatome est situé, si possible, vers le haut de la représentation. Il est alors projeté sur deux axes perpendiculaires de telle sorte que le maximum de cycles (2 en l'occurrence) soit sur l'axe XX' et aussi qu'un maximum de cycles soient dans la partie supérieure droite de la découpe.



(l'indication de la liaison commune dans ces deux derniers cas n'est pas nécessaire puisqu'il n'existe qu'une seule possibilité pour celle-ci, en raison des hétérocycles impliqués)

Fig. 1.9

2) La numérotation débute, dans ces conditions, par l'atome présent (carbone ou hétéroélément) dans la partie hétérocyclique qui se trouve en haut à droite (sans respecter l'ordre selon lequel on débute par l'hétéroélément (ex. : isoquinoléine). Lorsqu'il existe plusieurs possibilités de numérotation, on choisit celle dont la somme des chiffres intervenant dans la dénomination du système est **la plus faible**, et **la lettre**

la **plus faible** pour indiquer la liaison commune aux deux cycles. Cela est vrai aussi pour les systèmes polycycliques comportant plus de deux hétérocycles accolés.

Par ailleurs, les numérotations à retenir pour les hétéroéléments sont celles dont la somme est la plus faible, en respectant les règles de préséances.

3) Les atomes à la jonction des deux cycles ne sont pas numérotés *sauf s'il s'agit d'un hétéroatome*. Lorsqu'il s'agit de carbones, cas le plus classique, on peut, lorsque cela est utile, leur donner le même chiffre que l'atome cyclique le plus proche de valeur inférieure dans le sens de rotation, et ajouter un « a » pour les différencier (ex. Fig. 1.11).

## 1.2.7 Composés formés de plusieurs hétérocycles accolés

Ces molécules qui sont souvent complexes nécessitent l'usage de nombreuses règles particulières. D'abord il faut définir la structure qui sera considérée comme **la base** de la construction moléculaire. Elle sera précédée du préfixe qui désigne l'hétérocycle « secondaire » dont quelques-unes sont indiquées dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3

Hétérocycle	Préfixe
pyrrole	pyrrolo
furane	furo
thiophène	thièno
imidazole	imidazo
pyridine	pyrido
quinoléine	quino
isoquinoléine	isoquino

Pour choisir l'hétérocycle prioritaire pour la dénomination de la molécule, des éléments suivants seront considérés pas à pas **par ordre d'importance décroissant** :

a) La structure possède-t-elle **un cycle azoté ou un système polycyclique à nom trivial ?** (Fig. 1.10)

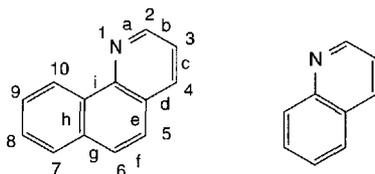


Fig. 1.10

b) Dans le cas contraire, la structure possède-t-elle **un cycle dont l'hétéroélément n'est pas l'azote, mais qui a la présence la plus haute dans le tableau des hétéroéléments** ? (Fig. 1.11)

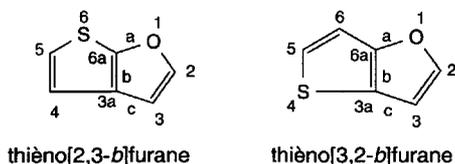


Fig. 1.11

c) Dans le cas contraire, la structure possède-t-elle **un système polycyclique (le plus grand possible) qui a une dénomination triviale** ? (Fig. 1.12)

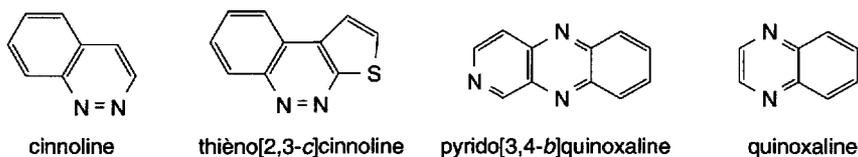


Fig. 1.12

d) Dans le cas contraire, la structure possède-t-elle **un hétérocycle ayant plus de chaînons que l'autre, dans la mesure où l'hétéroélément intervenant dans chacun d'eux est de même nature** ? (Fig. 1.13)

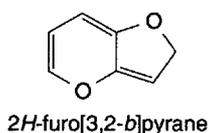


Fig. 1.13

e) Dans le cas contraire, la structure possède-t-elle **un hétérocycle qui a plus d'hétéroéléments que l'autre** ? (Fig. 1.14)

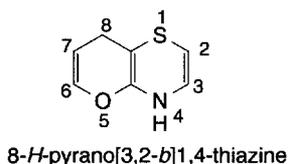


Fig. 1.14

- FAD et FADH<sub>2</sub> 691
  - FH<sub>4</sub> 311, 684
  - NAD<sup>+</sup> et NADH 291
  - phosphate de pyridoxal 300
  - thiamine pyrophosphate 573
  - Collagène 568
  - Collidine 220
  - Colorants floraux 489
  - Colorants naturels 402
  - Combes (synthèse de) 415
  - Complexe B 300
  - Complexe multienzymatique 211
  - Conhydrine 743
  - γ-conicéine 743
  - Coniine 743
  - Conrad-Limpach (synthèse de) 416
  - Convicine 633, 808
  - Cook-Heilbronn (synthèse de) 518
  - Coproporphyrines I et III 160
  - Coproporphyrinogène III 170
  - Coque du Levant 61
  - Cordycépine 679
  - Corey (synthèse de) 37
  - Corrine 158
  - Coryamytine 61
  - Coumarine** 412, 413, 414, S : 437, C : 479, N : 503
  - Couplage oxydatif 22
  - Cram 828
  - Crick 708
  - Cross-coupling 23
  - Cruorines 161
  - Cryptopyrrole 166
  - C-toxiférine 799
  - CTP (voir cytidine-5'-triphosphate)
  - Curares 799
  - Cutines 59
  - Cyanocobalamine ou vitamine B<sub>12</sub> 193
  - Cyclizine 571
  - Cycloadditions 1,3-dipolaires** 28
  - Cyclonucléoside 724
  - Cyproheptadine 571
  - Cystéine 308
  - Cytarabine 724
  - Cytidine (C) 700
  - Cytidine-5'-monophosphate (C ou CMP, ou acide 5'-cytidylique) 703
  - Cytidine-5'-triphosphate ou CTP 704
  - Cytisine 806
  - Cytochromes 161
  - Cytochrome de type P<sub>450</sub> 52, 181, 203
  - Cytochromes de types a, b, c 177
  - Cytokinine 399, 678
  - Cytosine 587, 700
- ## D
- DAHPh (voir 2-céto-3-désoxyarabinoheptulosonate-7-phosphate) 391
  - DD carboxypeptisation 82
  - Darzens (réaction de) 37
  - Décoyinine 679
  - Déhydrofuropélagones 203
  - Delphinidine 490
  - 4-déoxypyridoxine 314
  - 10-désacétylbaccatine III 76
  - Désaldolisation de la sérine 310
  - Déséripidine 782
  - Désoxyadénosine (dA) 700
  - Désoxyadénosine-5'-monophosphate A, dA, dAMP ou acide 5'-désoxyadénylique 703
  - Désoxycytidine (dC) 700
  - Désoxycytidine-5'-monophosphate (C, dC, dCMP ou acide 5'-désoxycytidylique) 703
  - Désoxyéritadénine 788
  - Désoxyguanosine (dG) 700
  - Désoxyguanosine-3'-monophosphate 703
  - Désoxyguanosine-5'-monophosphate (G, GMP, ou acide 5'-guanylique) 703
  - Désoxyhémoglobine 163
  - Désoxynupharidine 807
  - Désoxyribonucléoside 700
  - β-2-désoxyribose 699
  - Désoxythymidine (dT) 700
  - Désoxythymidine-5'-monophosphate (T, dT ou dTMP) 703
  - Désoxyuridine-5'-monophosphate (dUMP ou acide 5'-désoxyuridylique) 703
  - Desthiobiotine 212
  - Déthiobiotine 212
  - Déthiophénation du benzène 140
  - Deutéroporphyrine IX 175
  - Dewar 827
  - Diacétone(-)-sorbose 206
  - Diacétyldeutérohème 175
  - Diacétyldeutéroporphyrine 175
  - 1,3-dialkylimidazolium (sels de) 528
  - Diazabenzvalène 626
  - Diazines** 585
  - Dibenzofurane** 329, 330, 332, S : 351, C : 384
  - Dibenzothiophène** 329, 330, 332, S : 351, C : 384
  - 2,3-dicétogulonolactone 204
  - Dicloxacilline 87

Diglyme 43  
 DHF ou FH<sub>2</sub> (voir acide folique)  
 2,3-Dihydrobenzofurane 332  
 2,3-Dihydrobenzothiophène 332  
 Dihydrobioptérine 684  
 7,8-dihydrobioptérine 681  
 Dihydroergosine 761  
 Dihydroflavonols 492, 494, 495  
 2,3-Dihydroindole 332  
 Dihydrotoxiférine 799  
 3,4-dihydroxyphénylalanine( ou L-DOPA) 205, 401, 402  
 Dihydrouridine (D) 701  
*Dilthey* (synthèse de) 233  
 4-diméthylaminopyridine (DMAP) 249  
 Diméthylmercure 200  
 2,5-dioxopipérazines 599  
 Dioxyline 757  
 Diphenhydramine 571  
 Dipolarophiles 30  
 Dipoles-1,3 29  
 Dipyrrométhène 124  
 Dipyrrolyméthane 123, 171  
 Dipyrrolyméthènes 171  
 Disaccharides 323  
 Divicine 808, 809  
*d*-norpseudoéphédrine 811  
*Doebner et von Miller* (synthèse de) 417  
*Doering* 767  
 Doigt de zinc 568  
 Dompéridone 565  
 Dopamine 305, 395, 810  
 Dopaquinone 402  
 DPG (voir acide diphosphorylglycérique)163  
*Du Vignaud* 828

## E

(-)-ecgonine 773  
 Échimidine 803  
 Échinatine 803  
 Échinomycine 635, 636  
 Eicosanoïdes 326  
*Elbs* (réaction de) 617  
 Ellipticine 798  
 Élymoclavine 761, 765  
 Émétine 798  
 Endorphines 756  
 Énol-1-*o*-carboxyphénylamino-1-désoxyribulose phosphate 393  
 Enzymes héminiques 161  
 Éphédrine 811

Épinephrine 395, 810  
 Épisulsure (voir thiirane)  
 Époxydation de *Sharpless* 36  
 Époxyde (voir oxirane)  
 Époxyqualène 56  
 Ergine 761  
 Ergocornine 764  
 Ergocryptine 764  
 Ergoline 759  
 Ergonovine 761, 764  
 Ergosine 761  
 Ergosinine 761  
 Ergot du seigle (alcaloïdes de l') 759  
*Ehrlich* (test d')125  
 Érythrose-4-phosphate 391  
*Eschenmoser* (sel d')143, 201, 364  
 Éthanolamine 305  
 5-éthoxy-4-méthyl-1,3-oxazole 313  
 Éthyl cellosolve 43  
 Éthylmorphine 754  
 Éthylpyridoxal 314  
 Eucaïne A 780  
 Excitons 186

## F

Facteur extrinsèque 196  
 Facteur intrinsèque 196  
 FAD et FADH<sub>2</sub> (coenzymes) 691  
*Feist-Benary* (synthèse de) 101  
 Fentanyl 755  
*Fenton* (réaction de) 18, 666  
 Ferriprotoporphyrine 162  
 Ferroprotoporphyrine 162  
 FH<sub>4</sub> (coenzyme, voir acide folique)  
*Fischer* (synthèses de)158, 174, 333, 344, 350, 399  
*Fischer* (convention de) 318  
*Fischer-Kiliani* (synthèse de) 323  
 Flavanediols 495  
 Flavanoles 495, 506  
 2*H*-flavènes 473  
 4*H*-flavènes 473  
 Flavine, isoalloxazine ou isalloxazine 641, 651  
 Flavine mononucléotide 691  
**Flavone** 412, 413, 414, S : 441, C : 473, N : 495  
 Flavonoïdes 489  
 Flavonoles 490, 492, 495  
 Flavoprotéine 692  
 Flavylium (voir ion benzopyrylium)  
 Fluorescéine 488  
 5-fluorocytosine 634