

Les protéines

Partie I

Introduction- Les protéines

Une des plus importantes classes de molécules présentes dans tous les organismes vivants et les virus.

- Les **macromolécules les plus abondantes dans les cellules** (50% du poids sec).
- Elles assurent **l'essentiel des fonctions cellulaires** :

Architecture cellulaire :

Des protéines structurales maintiennent la forme des cellules et des organismes.

Effecteurs au niveau fonctionnement :

- Des protéines enzymatiques contrôlent des milliers de réactions (anabolisme et de catabolisme).
- Des protéines reconnaissent et détruisent les substances étrangères et nocives.
- Des protéines assurent que le plan à partir duquel elles sont toutes construites (l'ADN) soit reproduit pour les générations futures.

Introduction- Les protéines

On les trouvent sous différentes formes

{ **Enzymes**
Hormones
Récepteurs
Neurotransmetteurs

La protéine est la résultante du message génétique contenu dans un gène.

Les protéines sont des macromolécules constituées de longues chaînes d'acides aminés (les éléments de base).

I. Acides aminés

- Acides aminés sont de petites molécules qui portent

un groupe acide
(-COOH)

un groupe aminé
(-NH₂)

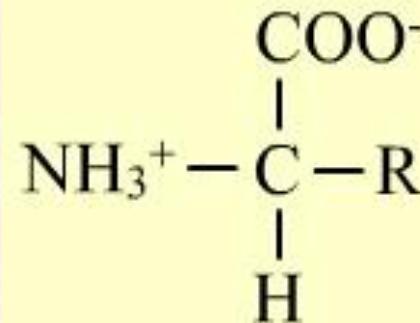
- Ils sont au **nombre de vingt** dans les protéines.

- plusieurs autres acides aminés dans l'organisme (l'ornithine, par exemple) mais ils n'entrent pas dans la composition des protéines.

Structure générale d'un acide aminé. Composition chimique

Les acides aminés retrouvés dans les protéines ont tous la même structure de base:

- Orientation autour d'un atome de carbone central, **le carbone α** ,
- sur lequel s'articulent :
 - le groupe carboxyl (-COOH),
 - le groupe aminé (-NH₂),
 - un atome d'hydrogène (-H)
 - et un groupement latéral (noté - R) = chaîne latérale



La forme d'une molécule d'un acide aminé à pH physiologique



C'est la nature du groupement latéral qui différencie les acides aminés entre eux

Structure générale d'un acide aminé. Stéréochimie

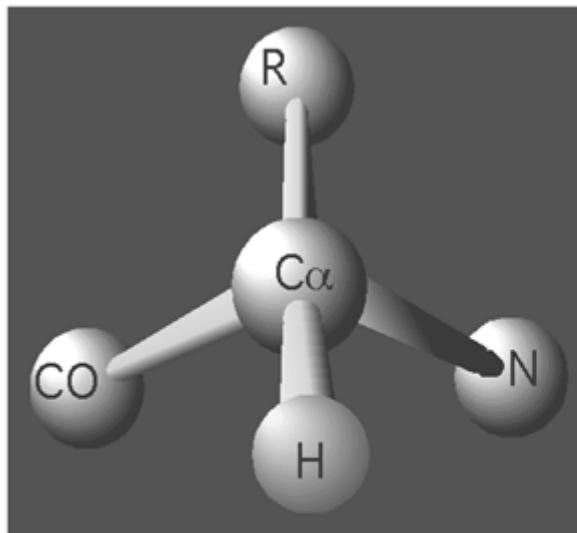
Le **C α** est en général asymétrique car il porte 4 substituants différents

Exception: glycine a un hydrogène à la place d'une chaîne latérale

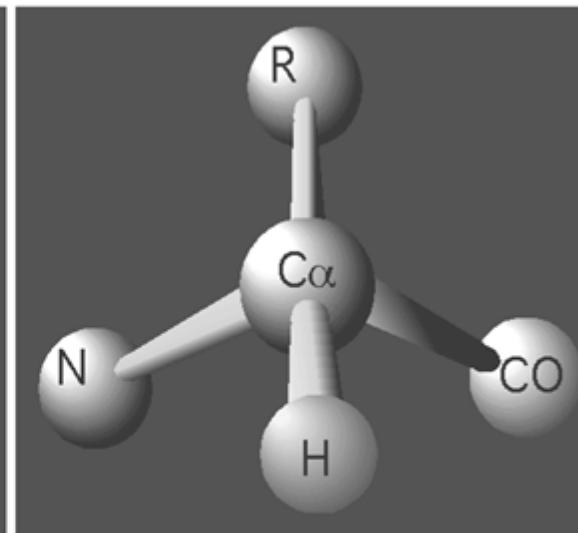
Il est possible d'avoir deux conformations différentes d'un même acide aminé. On désigne ces conformations **L** et **D**.

Bien que les deux puissent être synthétisées dans une même réaction chimique, seule la forme **L** est utilisée dans les protéines.

Structure générale d'un acide aminé. Stéréochimie



Forme L
(CO - R - N)



Forme D
(N - R - CO)

- Regarder le long de l'axe du lien qui lie son hydrogène au carbone α .
- Dans la forme L, l'agencement des autres groupements sur le carbone central **dans le sens des aiguilles d'une montre**: COOH, R, NH₃ ou CORN.

Les différents acides aminés intégrés lors de la synthèse des protéines

Nomenclature

- **Les acides aminés se différencient les uns des autres par leur radical.**
On peut donc théoriquement faire une infinité d'acides aminés.
- **chez l'Homme, comme chez de nombreuses espèces, seuls vingt acides aminés différents sont incorporés dans les protéines lors de la traduction.**
- **Pour plus de commodité, un code international de correspondance à une et trois lettres peut être utilisé pour désigner chacun de ces vingt acides aminés.**
- **Exemple Alanine = Ala = A**

Les chaînes latérales des acides aminés permettent de classer ces derniers en différents groupes partageant certaines caractéristiques:

- Certains sont polaires, et donc hydrophiles, d'autres non-polaires et donc hydrophobes.**
- Certains sont chargés, d'autres non.**
- Certains contiennent un cycle aromatique.**
- Certains contiennent du soufre, etc**

Il existe 4 familles principales d'acides aminés:

- 10 acides aminés avec R hydrophobe (non polaire)
 - 5 acides aminés avec R hydrophile neutre (polaire)
 - 3 acides aminés avec R hydrophile basique (polaire)
 - 2 acides aminés avec R hydrophile acide (polaire)
-
- **Cette classification peut varier selon les auteurs**

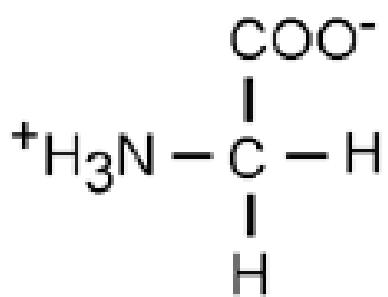
<p>Cas à part</p> <p>Glycine (G, Gly)</p>		<p>Sérol (S, Ser)</p> <p>Thréonine (T, Thr)</p> <p>Asparagine (N, Asn)</p> <p>Glutamine (Q, Gln)</p>			<p>Polaires et non-chargés</p>
<p>Acide glutamique (E, Glu)</p> <p>Acide aspartique (D, Asp)</p>		<p>Lysine (K, Lys)</p> <p>Arginine (R, Arg)</p> <p>Histidine (H, His)</p>			<p>Polaires et chargés</p>
<p><i>Négativement</i></p>		<p><i>Positivement</i></p>			
<p>Méthionine (M, Met)</p> <p>Cystéine (C, Cys)</p>		<p>Tryptophane (W, Trp)</p> <p>Phénylalanine (F, Phe)</p> <p>Tyrosine (Y, Tyr)</p>			<p>Non-polaires</p>
<p><i>Contenant du soufre</i></p>		<p><i>Aromatiques</i></p>			
<p>Alanine (A, Ala)</p> <p>Valine (V, Val)</p>		<p>Leucine (L, Leu)</p> <p>Isoleucine (I, Ile)</p> <p>Proline (P, Pro)</p>			<p>Non-polaires</p>
<p><i>Aliphatiques</i></p>					

la glycine (G, Gly), le plus petit acide aminé (chaîne latérale = un atome d'hydrogène).

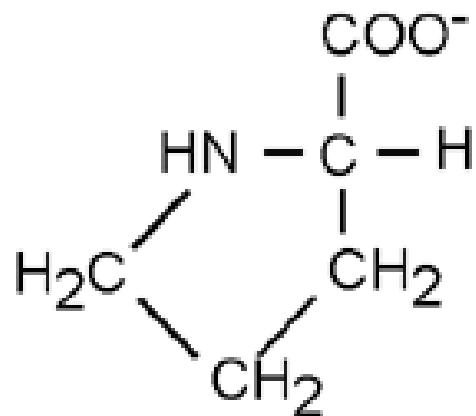
La proline (P, Pro) a une chaîne latérale en forme de boucle (un anneau pyrrolidone) qui va contacter l'azote de son groupement aminé;

la proline est techniquement un acide *iminé* (-NH-) plutôt qu'aminé.

Glycine
(G, Gly)



Proline
(P, Pro)



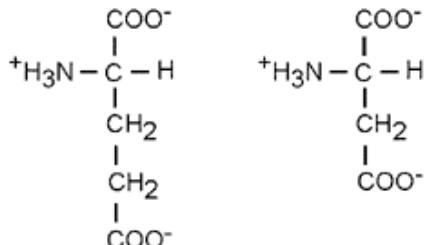
4 acides aminés ont une chaîne latérale **fortement ionisée et donc chargée à pH neutre**:

-l'**acide aspartique (D, Asp)** et de l'**acide glutamique (E, Glu)**: chaîne latérale porte **un groupement acide supplémentaire (COOH)**;

-et de **la lysine (K, Lys)** et de **l'arginine (R, Arg)** dont la chaîne latérale porte **un groupement aminé (-NH₃⁺ pour la lysine, =NH₂⁺ pour l'arginine)**.

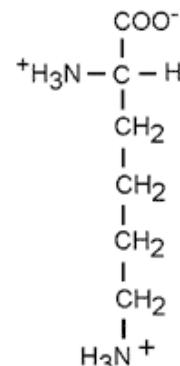
-**Un cinquième acide aminé, l'histidine (H, His), porte une charge positive plus faible à pH neutre.**

Acide glutamique (E, Glu) Acide aspartique (D, Asp)

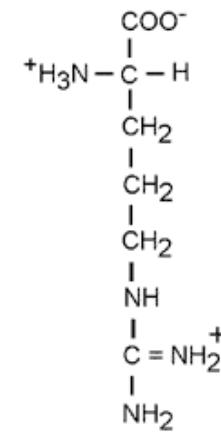


Négativement

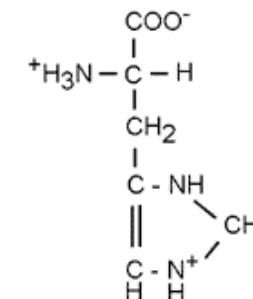
Lysine (K, Lys)



Arginine (R, Arg)



Histidine (H, His)



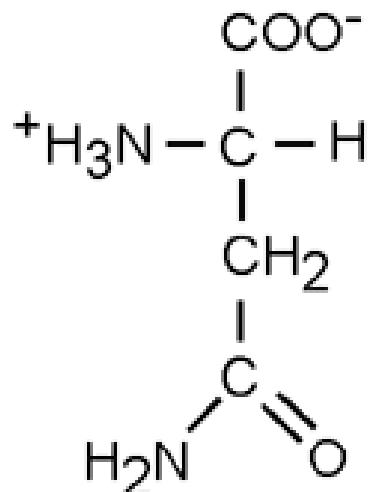
Positivement

-Les deux acides aminés acides ont des dérivés dont le groupement acide (-COOH) est changé pour un groupement amide (-CONH₂).

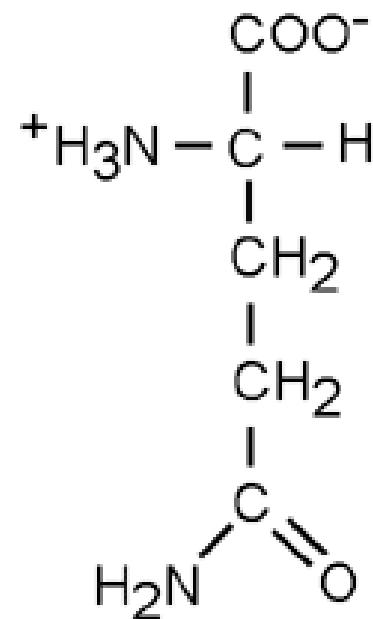
-Il s'agit de l'asparagine (N, Asn) pour l'acide aspartique et de la glutamine (Q, Gln) pour l'acide glutamique.

- sont **non-chargés** à pH neutre mais restent polaires et hydrophiles.

Asparagine (N, Asn)



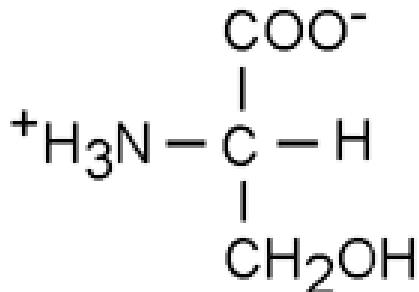
Glutamine (Q, Gln)



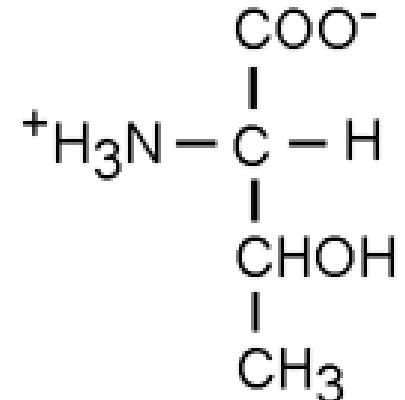
La sérine (S, Ser) et la thréonine (T, Thr) ont un groupement hydroxyl (-OH) dans leur chaîne latérale.

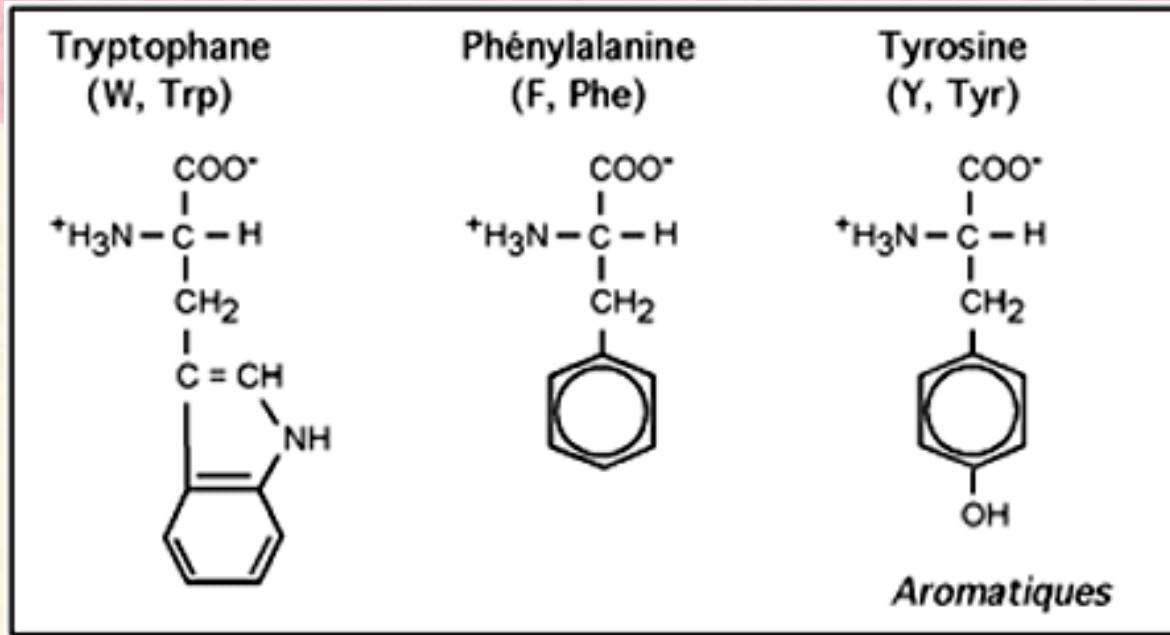
- Cela leur permet d'interagir avec l'eau et d'autres molécules en formant des ponts hydrogènes, ou d'être la cible de modifications utilisant ce site réactionnel.

Sériste
(S, Ser)



Thréonine
(T, Thr)





Les acides aminés contenant des cycles comme la phénylalanine (F, Phe), le tryptophane (W, Trp) ou la tyrosine (Y, Tyr) sont très hydrophobiques.

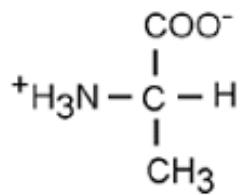
Notons que la tyrosine, malgré son caractère hydrophobique dû au cycle benzénique, a tout de même un groupement -OH qui, à l'instar de la sérine et de la thréonine, lui permet d'interagir avec l'eau ou d'être la cible de réaction utilisant les groupements hydroxylés.

c'est le cas aussi des acides aminés dont la chaîne latérale consiste en une succession de groupements éthyl- et méthyl-.

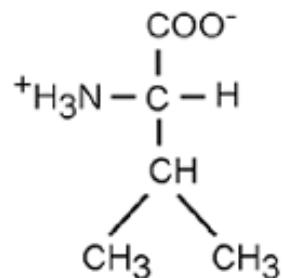
On dit de ceux-ci qu'ils sont **aliphatiques**.

L'alanine (A, Ala), la valine (V, Val), la leucine (L, Leu), L'isoleucine (I, Ile) sont tous des acides aminés aliphatiques.

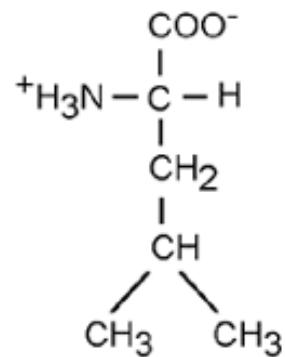
Alanine
(A, Ala)



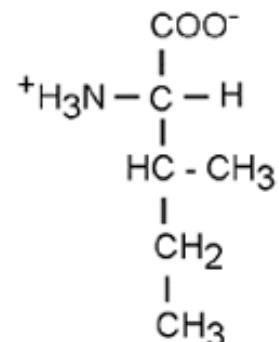
Valine
(V, Val)



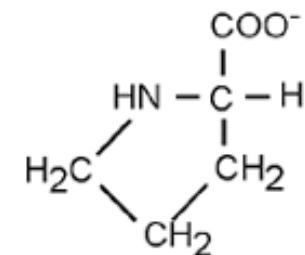
Leucine
(L, Leu)



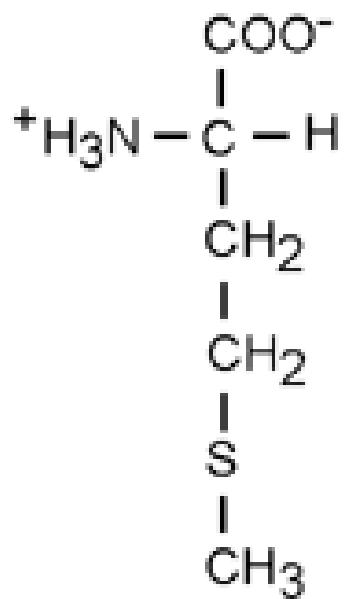
Isoleucine
(I, Ile)



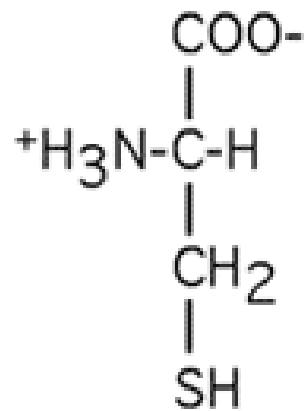
Proline
(P, Pro)



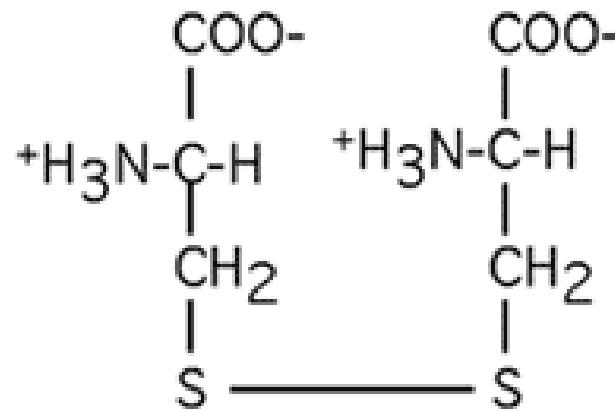
Méthionine (M, Met)



On inclut généralement dans cette famille la méthionine (M, Met), dont la chaîne latérale plutôt aliphatique contient un soufre non réactif.



Cystéine



Cystine

La cystéine (C, Cys) est un peu dans une classe à part, car elle a à l'extrémité de sa chaîne latérale un groupement sulfhydryl réactif.

Dans **des conditions oxydantes**, une cystéine forme fréquemment **un pont disulfure avec une autre cystéine** pour donner un dimère qu'on appelle **cystine**.

Les cystéines contribuent à maintenir la structure tridimensionnelle de très nombreuses protéines.

Acides aminés

D'autres doivent faire partie de notre alimentation (d'où notre besoin de manger des protéines)

Certains acides aminés sont synthétisés à même nos cellules

→ Ces derniers acides aminés sont dits **essentiels**

- la thréonine
- la lysine
- l'histidine
- l'isoleucine
- la leucine

- la méthionine
- la phénylalanine
- le tryptophane
- et la valine

Autres acides aminés et autres abréviations

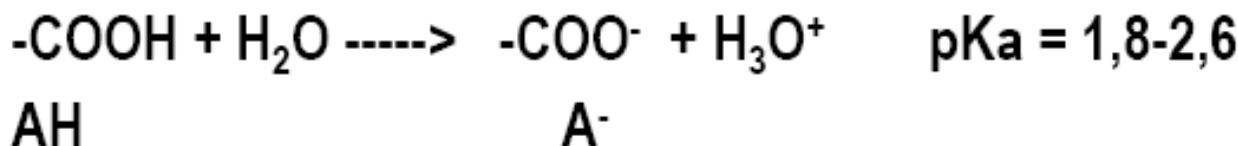
En parcourant la littérature scientifique, on tombe parfois sur des acides aminés dont le nom abrégé (Iva, Abu) n'est pas familier.

Il s'agit souvent de résidus modifiés, ou parfois de noms alternatifs pour les acides aminés de base.

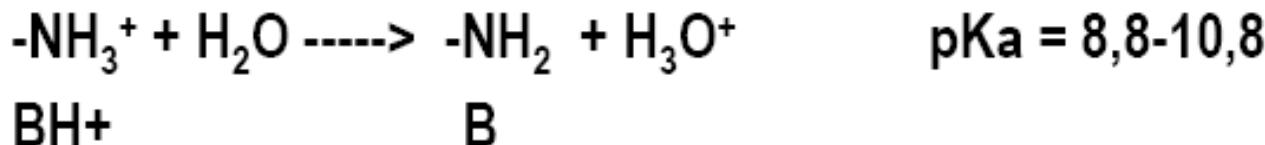
Abbréviation	Nom	Abbréviation	Nom
βAad	acide 3-amino adipique	Glu(NH2)	glutamine
Aad	acide 2-amino adipique	Glx	glutamine ou acide glutamique
A2bu	acide 2,4-diaminobutyrique	Hcy	homocysteine
Abu	acide 2-aminobutanoïque	Hse	homoserine
6Ahx	acide 6-aminohexanoïque	Hsl	Homoserinelactone
Ahx	acide 2-aminohexanoïque (norleucine)	Hyl	5-hydroxylysine
2-MeAla	2-methylalanine	5Hyl	5-hydroxylysine
βAla	β-alanine	Hyp	4-hydroxyproline
Ape	acide 2-aminopentanoïque (norvaline)	4Hyp	4-hydroxyproline
A2pm	acide 2,6-diaminopimélique	alle	alloisoleucine
Apm	acide 2-aminopimélique	allolle	alloisoleucine
A2pr	acide 2,3-diaminopropionique	Iva	isovaline
Asp(NH2)	asparagine	Met(O)	methionineS-oxide
Asx	asparagine ou acide aspartique	MetO2	methionineS,S-dioxide
Avl	acide 2-aminopentanoïque(norvaline)	Mur	acide muramique
Cit	Citruline	Neu	acide neuraminique
Cya	acide cystéique	Neu5Ac	acide n-acetylneuraminique
Dab	acide 2,4-diaminobutyrique	Nle	norleucine
Dpm	acide 2,6-diaminopimélique	Nva	norvaline
Dpr	acide 2,3-diaminopropionique	Orn	ornithine
Gla	acide 4-carboxyglutamique	5-oxo-Pro	5-oxoproline(acide pyroglutamique)
Glp	5-oxoproline (acide pyroglutamique)	Sar	Sarcosine
pGlu	5-oxoproline (acide pyroglutamique)	Sec	Selenocystéine
<Glu	5-oxoproline (acide pyroglutamique)	Ser(P)	phosphoserine
Ilu	isoleucine	alloThr	allothreonine
		aThr	allothreonine
		Thx	Thyroxine
		Tyr(I2)	3,5-diiodotyrosine
		Tyr(SO3H)	04-sulfotyrosine
		Xaa	acide aminé non-spécifié

Charge des acides aminés

- Les fonctions acide carboxyliques et amine sont ionisables
 - De même les fonctions portées par les chaînes latérales
 - Ces propriétés sont essentielles pour la fonction et la séparation des acides aminés et des protéines
-
- Ionisation de la fonction acide

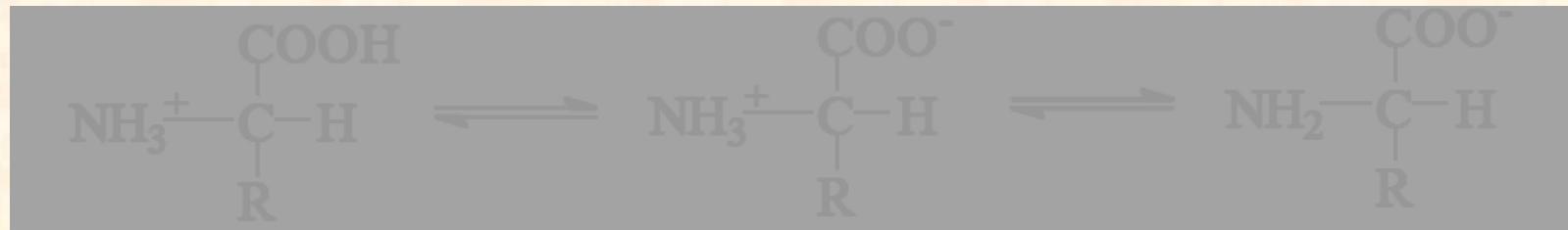


- Ionisation de la fonction amine



Charge des acides aminés

- Formes ioniques en fonction du pH



$$pK_{a_1} \sim 2$$

$$pK_{a_2} \sim 9$$

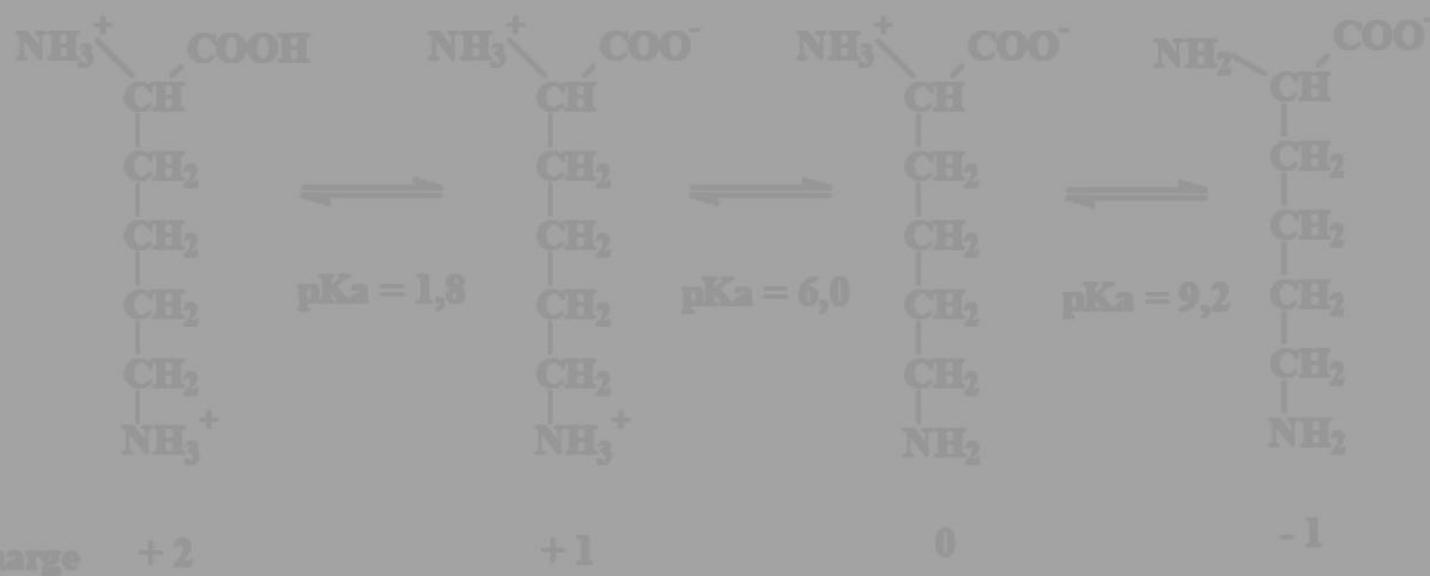
charge + 1

0

- 1

A pH neutre les acides aminés sont sous la forme de charge nulle que l'on appelle "zwitterion" car elle porte deux charges opposées

Cas de la Lysine



- Il y a 4 formes ionisées différentes
- Le point isoélectrique se calcule par la moyenne algébrique des pKa des fonctions ionisables de part et d'autre de la forme de charge nulle

$$\text{pHi} = \frac{\text{pKa}_1 + \text{pKa}_2}{2} \text{ soit } \text{pHi} = \frac{6,0 + 9,2}{2} = 7,6$$

- Les chaînes latérales portent également des groupements ionisables dont il faut tenir compte

- Les pka varient de 4 pour Asp et Glu à 10-12 pour Lys et Arg en passant par 6 pour His

- Ce qui compte en bout du compte n'est de toute façon pas tant le pK de chaque acide aminé, mais celui, global, de la protéine qui les contient!

Acide aminé	pK1 (COOH)	pK2 (NH2)	pK3 (latéral)	pI
Glycine (G, Gly)	2,35	9,6		5,97
Alanine (A, Ala)	2,34	9,69		6,01
Valine (V, Val)	2,32	9,62		5,97
Leucine (L, Leu)	2,36	9,6		5,98
Isoleucine (I, Ile)	2,36	9,68		6,02
Proline (P, Pro)	1,99	10,96		6,48
Phenylalanine (F, Phe)	1,83	9,13		5,48
Tyrosine (Y, Tyr)	2,2	9,11	10,07	5,66
Tryptophane (W, Trp)	2,38	9,39		5,89
Sérine (S, Ser)	2,21	9,15		5,68
Thréonine (T, Thr)	2,11	9,62		5,87
Asparagine (N, Asn)	2,02	8,08		5,41
Glutamine (Q, Gln)	2,17	9,13		5,65
Cystéine (C, Cys)	1,96	8,18	10,28	5,07
Methionine (M, Met)	2,28	9,21		5,74
Acide aspartique (D, Asp)	2,19	9,6	3,65	2,77
Acide glutamique (E, Glu)	2,19	9,67	4,25	3,22
Histidine (H, His)	1,82	9,17	6	7,59
Lysine (K, Lys)	2,18	8,95	10,53	9,74
Arginine (R, Arg)	2,17	9,04	12,48	10,8

Acides aminés un peu plus « exotiques »

- Certains acides aminés protéiques subissent **des modifications post-traductionnelles**.
- Certains acides aminés **ne se retrouvent pas dans les protéines**

Acides aminés modifiés de façon post-traductionnelle

En dégradant des protéines pour obtenir les acides aminés qui les composent, on en retrouve souvent **qui varient par rapport au modèle de base**.

Ces acides aminés modifiés jouent différents rôles importants dans la structure et la fonction des protéines.

On ne les ajoute pas à la liste des vingt car ils ne sont que des modifications d'acides aminés standards:

une **hydroxyproline**, par exemple, est une proline à laquelle un enzyme a été greffer un groupement hydroxyl.

Certains peuvent avoir une allure complexe: **quatre lysines** peuvent être réunies en une molécule **de desmosine** (on la retrouve dans une protéine appelée élastine, qui se retrouve dans les ligaments et le tissu conjonctif des grandes artères). La desmosine aide à conférer à cette protéine ses vertus élastiques.

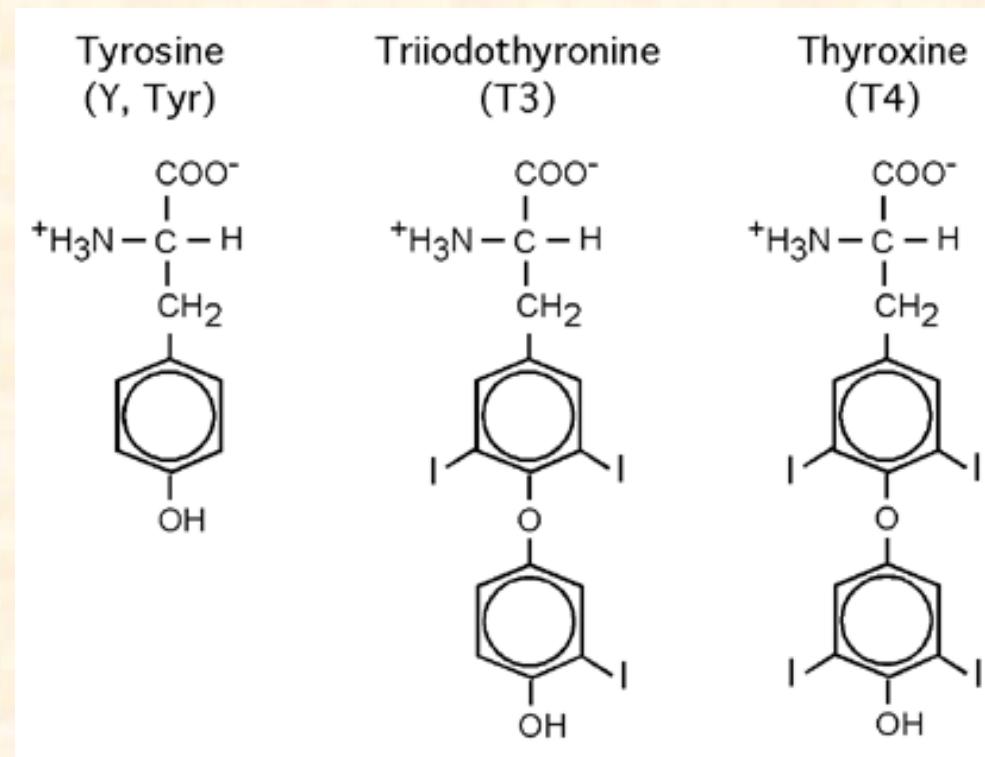
Quelques acides aminés qu'on ne retrouve pas dans les protéines

Des acides aminés peuvent avoir des rôles cruciaux sans être impliqués dans la synthèse protéique.

Les hormones thyroïdiennes, qui sont responsables du contrôle du métabolisme de l'organisme, sont appelées T3 et T4 (thyroxine et triiodothyronine).

Ce sont des modifications de la tyrosine portant un cycle supplémentaire et des atomes d'iode.

(C'est pour synthétiser ces 2 hormones que la glande thyroïde a besoin d'iode).



Le code génétique

Les acides aminés sont assemblés en chaîne selon un ordre déterminé par une séquence d'ADN.

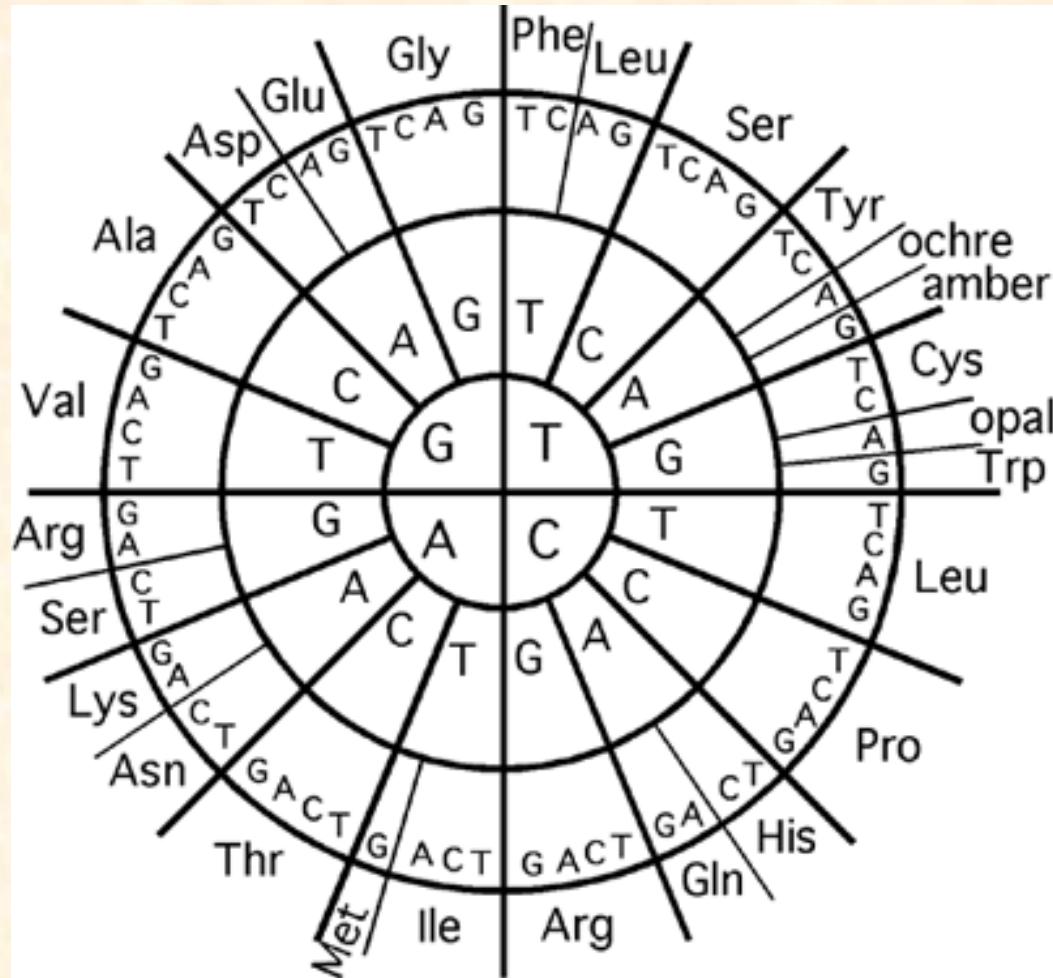
Chaque acide aminé est représenté sur l'ADN par un triplet de bases appelé *codon*.

Puisqu'il existe quatre nucléotides dans l'ADN, il existe aussi une possibilité maximale de 4^3 codons, ou 64.

Il n'y a cependant que 20 acides aminés, qui se partagent ces possibilités entre eux (et avec trois signaux d'arrêt de la traduction).

La distribution des codons n'est pas égale: il n'y a par exemple qu'un seul codon codant pour le tryptophane mais six pour l'arginine.

Le code génétique



- Chaque codon (ou triplet de nucléotides) se lit du centre vers l'extérieur.
- En plus des codons désignant les 20 acides aminés, il existe **trois codons STOP**, qui marquent la fin de la séquence d'une protéine: les codons **amber (TAG)**, **ochre (TAA)** et **opal (TGA)**

II. Peptide--- Liaison peptidique

- **Un peptide** est une molécule possédant *moins de 10 acides aminés*.
- **Un polypeptide** peut contenir *jusqu'à 100 acides aminés*.
- Avec *plus de 100 acides aminés*, on parle de **protéines**.
- La liaison peptidique: une **liaison amide**, formée par élimination d'une molécule d'eau entre un groupement $-\text{NH}_2$ et $-\text{COOH}$ de deux acides aminés

On parle de dipeptide si le nombre d'AA est égale à 2, de tripeptide si le nombre d'AA est égale à 3, de pentapeptide si le nombre d'acides aminés est égale à 5.....etc.....

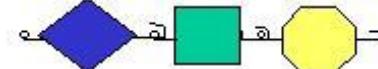
Les polypeptides (exemples de représentations schématiques)

- un dipeptide:

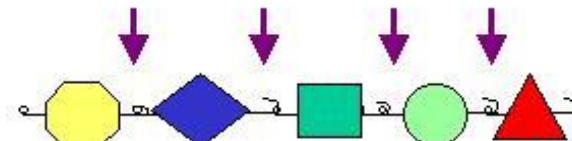


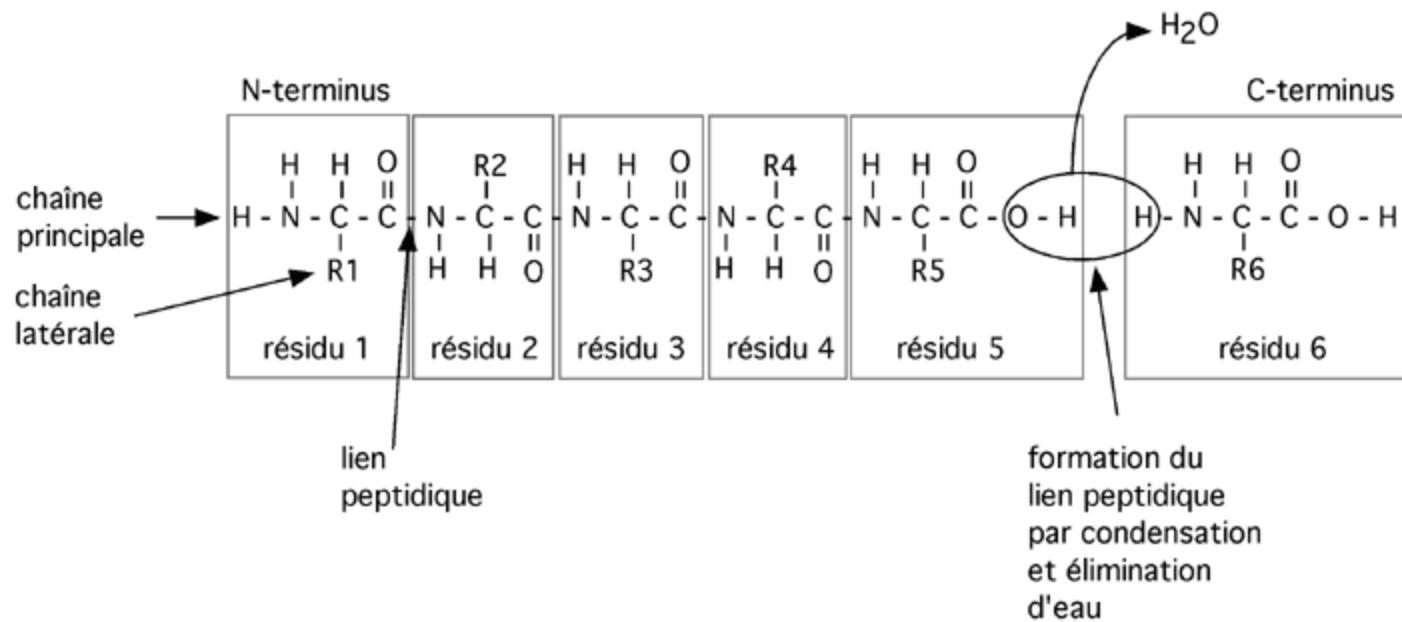
Liaison peptidique

- un tripeptide:



- un pentapeptide:





Les acides aminés liés sont des "résidus d'acides aminés"

- l'aa portant le groupement NH_2 est dit "**N-terminal**"
- L'aa portant le groupement COO^- est dit "**C-terminal**"
- Par convention d'écriture on met le **N-terminal à gauche** et le **C-terminal à droite**
- Exemple d'un tétra-peptide

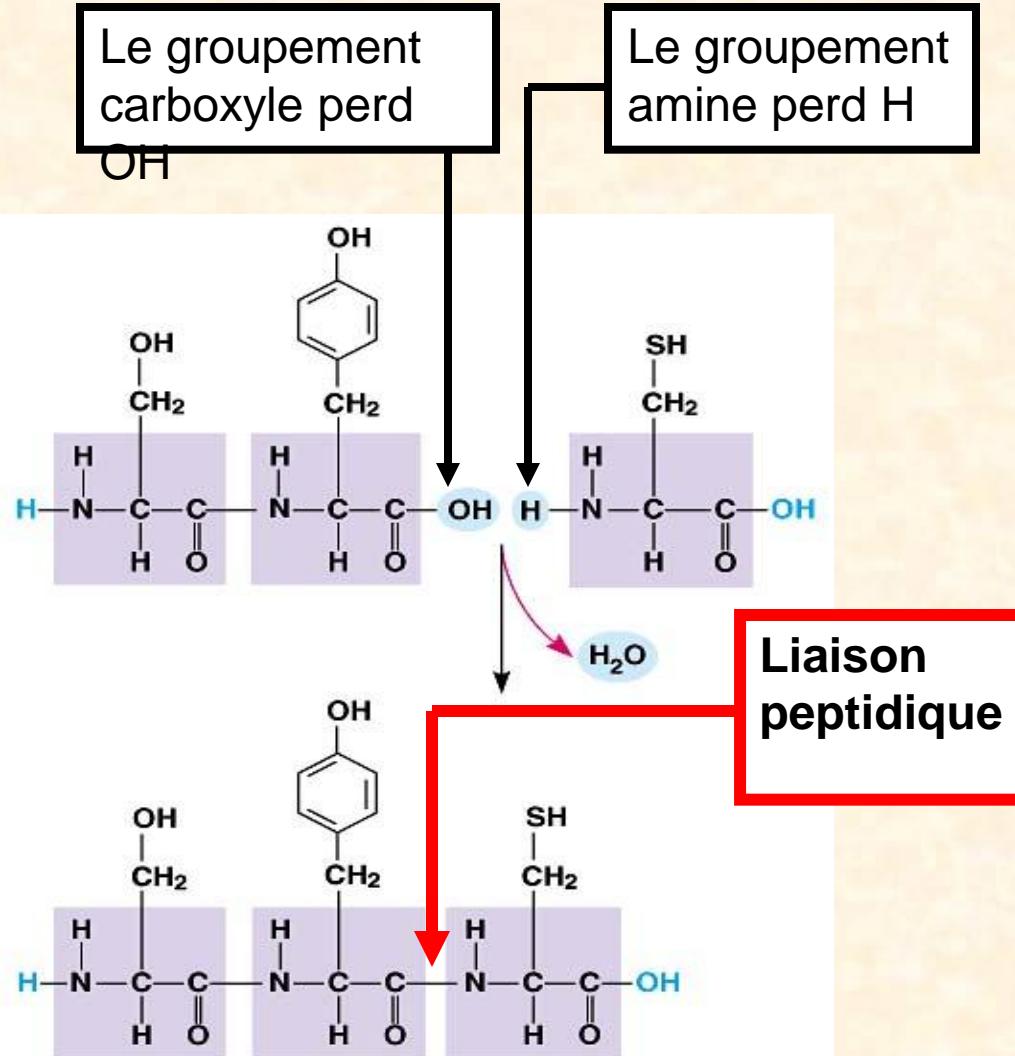
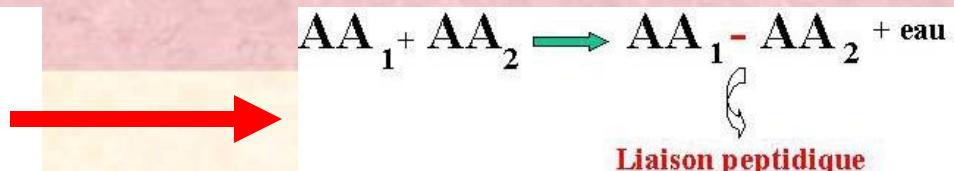
$\text{NH}_2\text{- Ala - Thr - Phe - Leu - COOH}$

4. Les acides aminés se lient les uns aux autres par liaison peptidique

Liaison peptidique

Union entre deux acides aminés
Par condensation

Les acides aminés se juxtaposent dans la même orientation : le groupement amine à gauche (par exemple) et le groupement carboxyle à droite.



Classification structurale des peptides

Les peptides peuvent appartenir à **4 classes différentes** :



a. Structure linéaire

C'est le cas le plus courant. Sa structure spatiale dépendra uniquement des chaînes latérales des acides aminés. Il est possible que deux résidus Cystéines forment un **pont disulfure intra-chaîne** ou **extra-chaîne**, lui imposant alors une conformation.



b. Structure ramifiée

Les acides aminés peuvent parfois former des liaisons amides à partir de leur chaîne latérale. On parle de liaison **peptidoïde**. Elle peut être formée à partir d'un résidu possédant une fonction $-\text{NH}_2$ (Arginine ou Lysine) ou $-\text{COOH}$ (Aspartate ou Glutamate).



c. Structure cyclique

Cette structure est observé lorsque les acides aminés N-ter et C-ter sont liés.

Le peptide n'a alors plus d'extrémité.



d. Structure semi-cyclique

Cette fois-ci, une seule des extrémités de la chaîne forme une liaison peptidoïde avec un des résidus de la chaîne.

Ainsi l'acide aminé N-ter peut se lier à un résidu Asp ou Glu tandis qu'un résidu C-ter peut se lier à un résidu Asn et Lys.

III. Structure des protéines

On distingue **quatre niveaux stades structuraux** chez les protéines, de la structure primaire à la structure quaternaire.

Primaire

Met-Glu-Gly-Ala-Cys-
Trp-Tyr-Trp-Leu-His-
Cys-Ala-Asp-Phe...

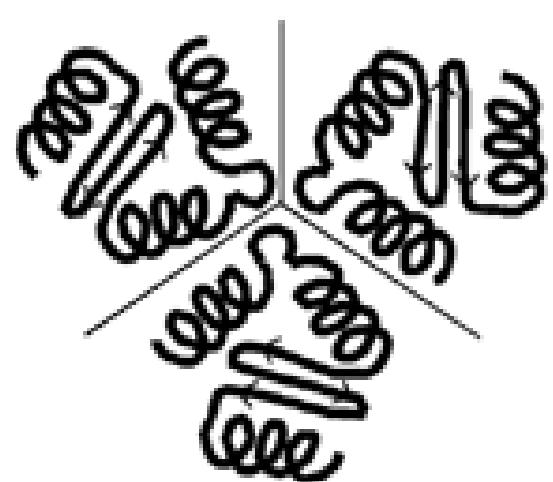
Secondaire



Tertiaire



Quaternaire



Primaire

Met-Glu-Gly-Ala-Cys-
Trp-Tyr-Trp-Leu-His-
Cys-Ala-Asp-Phe-...

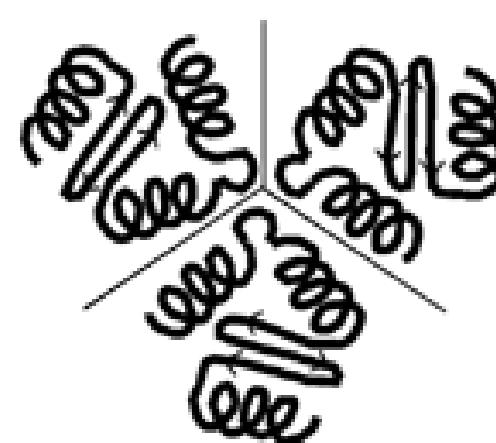
Secondaire



Tertiaire



Quaternaire



(1) Structure primaire: *ordre des acides aminés* le long de la chaîne polypeptidique.

(2) Structure secondaire: *repliement local* des acides aminés en hélices, en feuillets, ou en d'autres formes similaires.

(3) Structure tertiaire: *agencement stable dans l'espace* de ces hélices et feuillets.

(4) Structure quaternaire: *agencement des sous-unités* entre elles, quand la protéine est constituée de plusieurs sous-unités indépendantes (comme l'est par exemple l'hémoglobine).

La structure primaire est la séquence des acides aminés de la protéine. Son activité biologique est fortement dépendante de cet enchaînement.

Ex : la globine, partie protéique de l'hémoglobine, permet normalement le transport de l'oxygène.

Les malades souffrant de **drépanocytose** fabriquent la globine avec une anomalie, **le sixième acide aminé Glu est remplacé par Val.**

Ce petit changement suffit à complètement bouleverser la structure du globule rouge, qui prend alors la forme d'une fauille.

Ses fonctions de transporteurs d'oxygène s'en trouvent amoindries, elle devient fragile, et peut s'agglomérer en bouchant des capillaires.

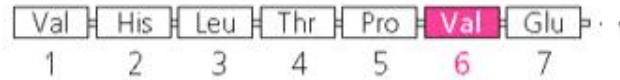
Le changement d'un seul acide aminé dans la chaîne change le repliement de la protéine et par conséquent sa conformation native.

Si le changement de forme altère le site actif, la protéine sera généralement non fonctionnelle. Plus rarement elle pourrait être plus efficace ou acquérir une nouvelle fonction.

Globules sanguins contenant de l'hémoglobine normale



Globules sanguins contenant de l'hémoglobine anormale



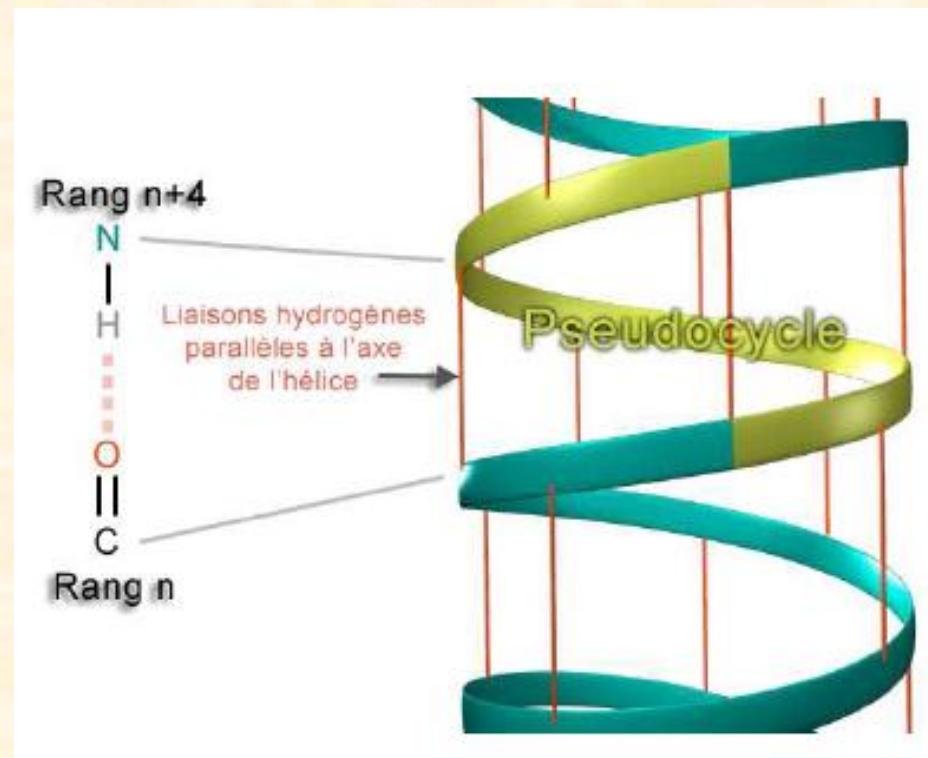
Structure secondaire: est l'ensemble des sous-structures que peuvent former les acides aminés en interagissant entre eux.

1) Hélices α : sont dues à des liaisons hydrogènes entre les fonctions amides des acides aminés.

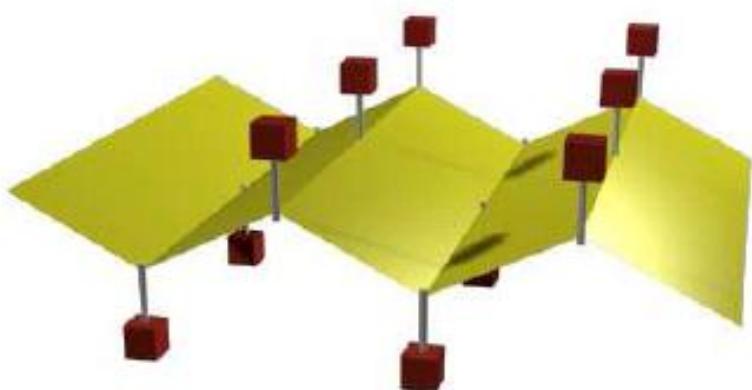
Il y a 3,6 acides aminés par tour d'hélice.

La **Proline** ne permet pas la formation d'hélice α .

C'est une sous-structure très courante, notamment dans les protéines globuleuses (ex : **hémoglobine**).



2) Feuilles β



Entre deux chaînes parallèles ou antiparallèles peuvent se former des feuilles β . Ils sont encore dus à des liaisons hydrogènes entre les fonctions amides.

Ce feuillet forme alors un plan brisé, avec les chaînes latérales perpendiculaires à ce plan, au dessus et en dessous à cause des répulsions stériques entre résidus.

Cette forme est moins courante que les hélices.

Elle constitue la majeure partie des protéines fibreuses (ex : kératine).

3) Coudes β

Les coudes sont formés de 4 acides aminés successifs hydrophiles, formant un pli à 180°, stabilisé par une liaison hydrogène .

Pour former une torsion suffisante, le deuxième acide aminé est toujours une Proline.

Cette sous-structure est généralement minoritaire dans les protéines.

Structure tertiaire : L'organisation spatiale de la protéine, notamment de ses structures secondaires, constitue sa **structure tertiaire**.

Différents types d'interaction influencent la structure de la protéine:

- Les ***liaisons ioniques*** entre résidus, cette interaction est affaiblie par les molécules d'eau, ce n'est pas la plus importante
- Les ***liaisons hydrogènes***, peu énergétiques, elles sont en très grand nombre et jouent donc un rôle très important
- Les ***interactions hydrophobes***, qui tendent à mettre les acides aminés hydrophobes au cœur de la protéine, et les acides aminés hydrophiles en périphérie, cette interaction est très importante
- Les ***liaisons de Van der Waals***, qui définissent les distances entre atomes, elle joue surtout un rôle à petite échelle
- Les ***liaisons covalentes***, notamment les ponts disulfures entre Cystéines

...

Quelques exemples de liaisons permettant de former la structure tertiaire des protéines

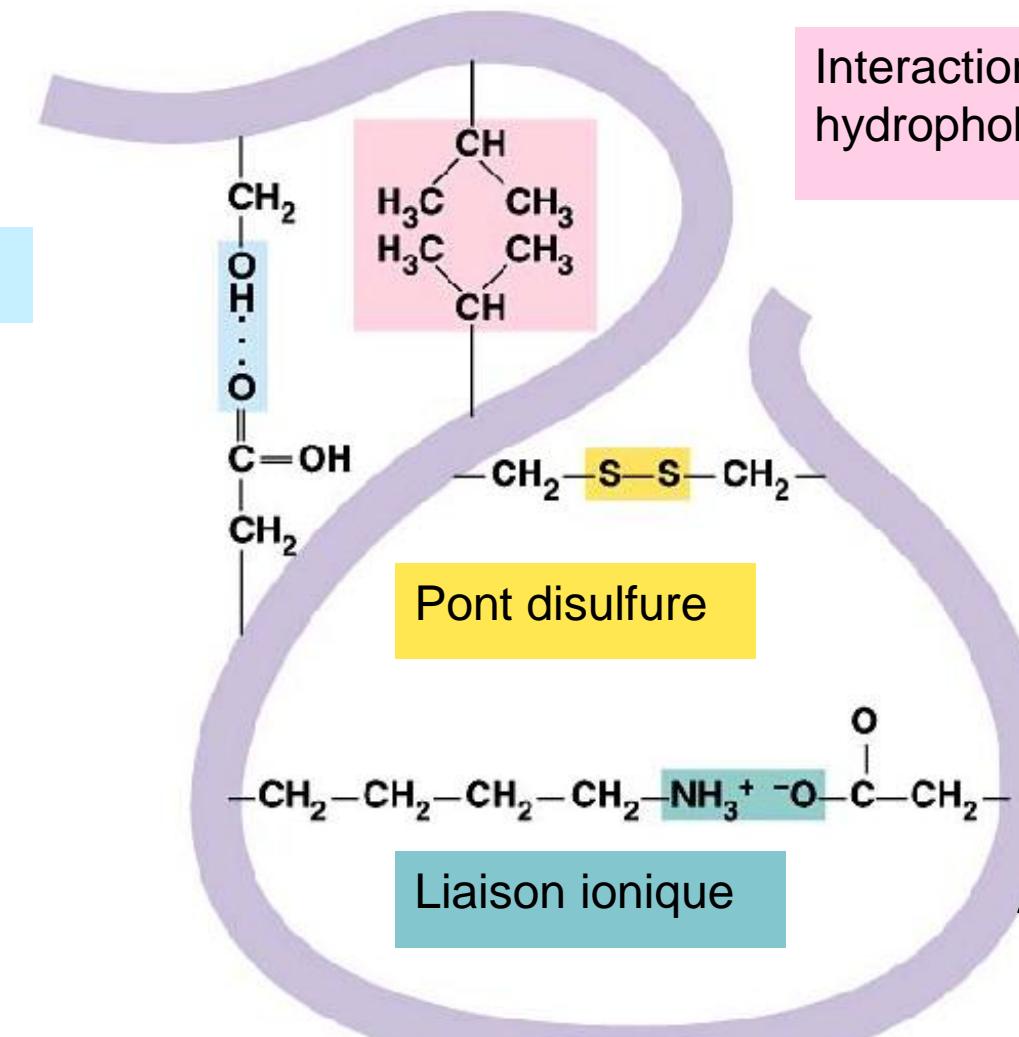
Liaison hydrogène

Interactions hydrophobes

Pont disulfure

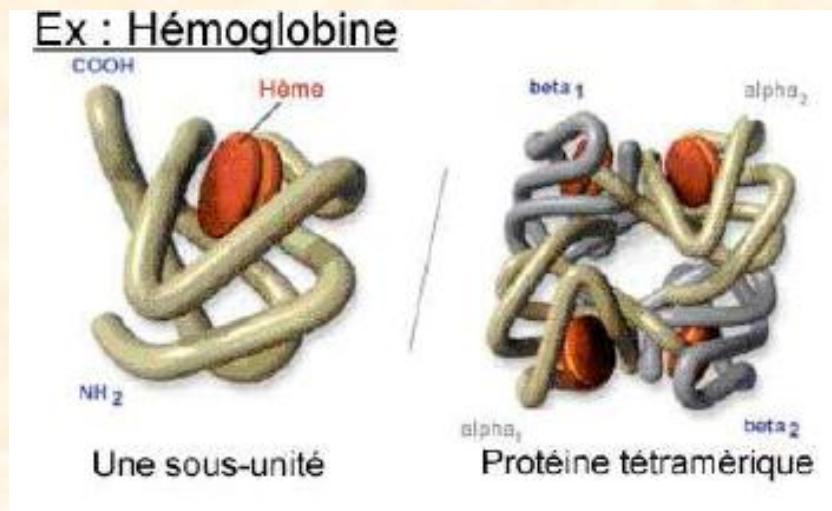
Liaison ionique

Chaîne d'acides aminés



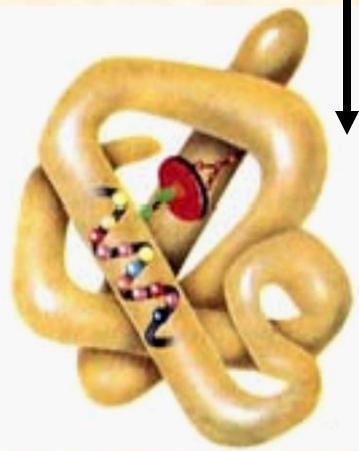
Structure quaternaire: de nombreuses protéines sont constituées de **sous-unités** identiques, associées par des liaisons faibles. C'est la **structure quaternaire**.

Ex : l'hémoglobine est formée de 4 sous-unités.





La conformation native des protéines formées d'une seule chaîne polypeptidique est une structure tertiaire.



La conformation native des protéines formées de plusieurs chaînes polypeptidiques est une structure quaternaire.



Structure tertiaire

Deuxième repliement par des liaisons diverses à intervalle irrégulier.
La molécule

Structure primaire
Séquence primaire des a.a.

Structure secondaire
Premier repliement par des liaisons H à intervalle régulier

Structure quaternaire
Interaction de diverses chaînes déjà en structure tertiaire.
Par diverses liaisons à intervalle irrégulier.

Source