

L'ESSENTIEL DE

BIOCHIMIE

TOUT EN FICHES

L'ESSENTIEL DE

BIOCHIMIE

Émilie GUILLAUME

Professeure en biochimie, biologie cellulaire et endocrinologie
au département de Biologie de l'ENS Paris-Saclay.

Pierre LE MARÉCHAL

Professeur émérite de Biochimie à l'Université Paris-Sud (Orsay).

Catherine BARATTI-ELBAZ

Professeure agrégée à l'ENS Paris-Saclay.

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements



d'enseignement supérieur, provoquant une

baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2008, 2018 pour la 3^e édition
11 rue Paul Bert 92240 Malakoff
ISBN 978-2-10-077709-9
www.dunod.com

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e a), 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 ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Fiche 1	Appeler chaque molécule par son nom	7
Fiche 2	Les acides aminés des protéines	11
Fiche 3	Structure 3D des protéines	20
Fiche 4	Applications de l'action des protéases	27
Fiche 5	Séparation et dosage des protéines	34
Fiche 6	Interactions protéine-ligand	46
Fiche 7	Catalyse enzymatique	50
Fiche 8	Enzymologie michaelienne: K_M et V_M	53
Fiche 9	Inhibitions des enzymes michaeliennes	65
Fiche 10	Allostérie	71
Fiche 11	Modifications post-traductionnelles des protéines	78
Fiche 12	Vitamines et coenzymes	86
Fiche 13	ATP	91
Fiche 14	Mono et disaccharides	98
Fiche 15	Polyosides	106
Fiche 16	Glycoprotéines	112
Fiche 17	Structure des acides gras et des lipides	116
Fiche 18	Lipides membranaires	124
Fiche 19	Structure des membranes biologiques	134
Fiche 20	Échanges membranaires	142
Fiche 21	Fermentations	152

Fiche 22	Acétyl-CoA et cycle de Krebs	162
Fiche 23	Catabolisme des acides gras	171
Fiche 24	Métabolisme de l'azote	179
Fiche 25	Néosynthèse des sucres	184
Fiche 26	Les oxydations phosphorylantes	191
Fiche 27	Ligands extracellulaires et transduction du signal	198
Fiche 28	Les protéines du cytosquelette	207
Annexe		217
Index		219

1. L'ordre de priorité des principales fonctions chimiques

Fonction	Nom	Préfixe	Suffixe
$\text{R}-\text{CO}-\text{OH}$	Acide carboxylique	Carboxy	Acide... -oïque
$\text{R}-\text{CO}-\text{OR}'$	Ester	Carboalkoxy	-oate d'alkyle
$\text{R}-\text{CO}-\text{SR}'$	Thioester	Carboalkothioxy	-thioate d'alkyle
$\text{R}-\text{CO}-\text{NHR}'$	Amide	Carboxamide	-amide
$\text{R}-\text{CHO}$	Aldéhyde	Oxo, aldo, formyl	-al
$\text{R}-\text{CO}-\text{R}'$	Cétone	Oxo, céto	-one
$\text{R}-\text{OH}$	Alcool	Hydroxy	-ol
$\text{R}-\text{SH}$	Thiol	Mercapto	-thiol
$\text{R}-\text{NH}_2$	Amine primaire	Amino	-amine

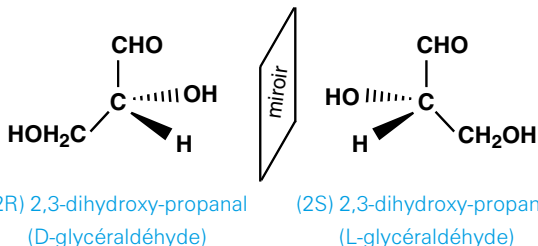
Fonctions particulières

Anhydride d'acide	Entre 2 acides organiques Phosphoanhydride : entre 2 fonctions acide phosphorique	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{CO}-\text{O}-\text{CO}-\text{R}' \\ \text{O} \qquad \qquad \text{O} \\ \qquad \qquad \\ \text{HO}-\text{P}-\text{O}-\text{P}-\text{OH} \\ \qquad \qquad \\ \text{OH} \qquad \qquad \text{OH} \end{array}$
Disulfure		$\text{R}-\text{S}-\text{S}-\text{R}'$

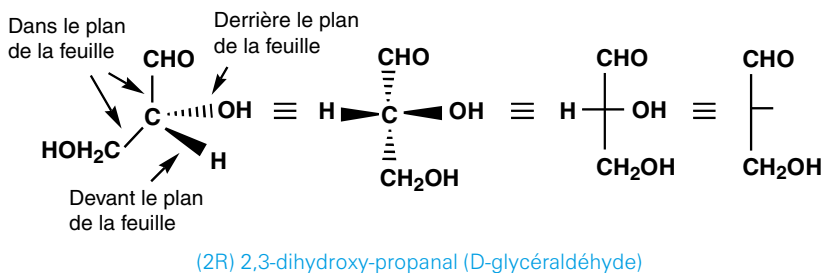
2. Représenter les molécules sur un plan

Les conventions d'écriture dans le cas d'un carbone asymétrique

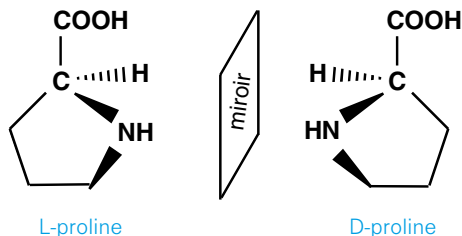
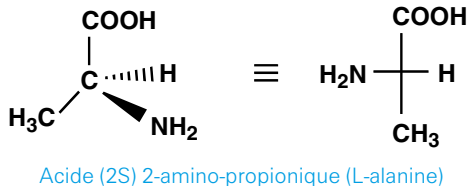
Exemple du 2,3-dihydroxy-propanal (glycéraldéhyde)



Projections de Fischer (utilisées en Biologie)



Cas de 2 acides aminés :



La proline possède un cycle pyrrole, c'est le seul acide aminé dans ce cas-là.

EXERCICE 1 **Savoir dessiner à partir des mots**

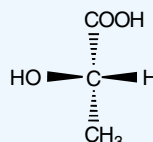
Dessiner les structures des molécules biologiques suivantes (nom chimique et nom commun s'il existe) :

1. acide 2-hydroxy-propionique ou acide lactique
2. sel tétrasodique du 2,3-bis-phospho-D-glycérate (l'acide glycérique est l'acide 2,3-dihydroxy-propionique)
3. acide 2-phosphono-oxyprop-2-énoïque ou acide phosphoénolpyruvique
4. acide 2 oxo-butanedioïque ou acide oxaloacétique

Solution

1. Acide lactique : $\text{CH}_3\text{—CHOH—COOH}$

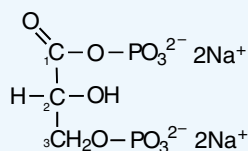
La molécule que l'on trouve dans les cellules est l'isomère L de l'acide lactique ou (2S)-2-hydroxy-propionique (représentation ci-contre).



L'acide lactique existe sous forme de lactate au pH cellulaire. Il se forme au cours de la fermentation du même nom (voir glycolyse en condition anaérobie).

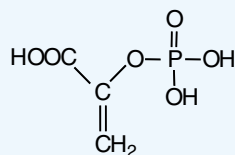
Ne pas confondre le lactate avec le lactose, qui est le sucre du lait (voir fiche n° 11).

2. Cette molécule dont la structure de base est l'acide 2,3-dihydroxy-propionique possède en plus ici, 2 fonctions supplémentaires : une fonction anhydride mixte (entre un carboxyle et une acide phosphorique) sur le carbone 1 et une fonction phosphoester sur le carbone 3.

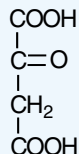


3. C'est un intermédiaire important de la glycolyse. Il existe également le 2,3-bis-phosphoglycérate (voir affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène).

3. L'acide phosphoénolpyruvique est présent sous forme de phosphoénolpyruvate (PEP) au pH cellulaire. L'hydrolyse de la fonction phosphoénol libère une énergie importante qui est couplée à la formation d'une fonction phosphoanhydride de l'ATP dans la glycolyse. La réaction est catalysée par la pyruvate kinase.



4. Acide oxaloacétique. Ce nom commun vient de l'acide oxalique (OHC—COOH) et de l'acide acétique (CH₃—COOH). Cette molécule est un intermédiaire du cycle de Krebs (voir fiche n° 18). Dans la cellule, il existe sous forme d'oxaloacétate du fait du pH intracellulaire. C'est un di-acide à 4 carbones qui possède une fonction 2-oxo ou 2-céto (ou α-céto).



EXERCICE 2 Et inversement...

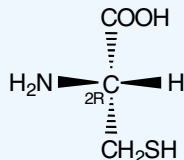
Donner les noms des molécules biologiques suivantes :

1. HSCH₂—CH(NH₂)—COOH
2. H₂N—CH₂—CO—NH—CH₂—COOH
3. CH₃—(CH₂)₁₄—COOH
4. CH₃—(CH₂)₄—CH=CH—CH₂—CH=CH=(CH₂)₇—COOH

Solution

1. Cette première molécule est l'acide 2-amino-3-mercapto-propionique. Elle correspond à la cystéine, un acide aminé présent dans les protéines dans sa configuration 2R, c'est-à-dire la L-cystéine (représentation ci-contre).

La cystéine peut former des ponts disulfures dans les protéines (voir structure tertiaire des protéines fiche n° 3).

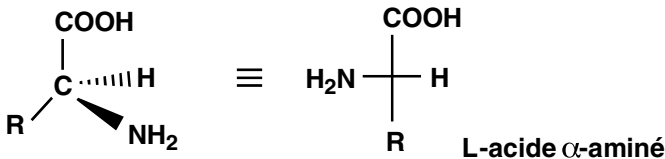


2. Le nom chimique de cette seconde molécule est complexe, mais on peut noter qu'elle possède, de gauche à droite : une fonction amine primaire, une fonction amide et une fonction acide organique. Il s'agit de deux molécules de glycine, l'acide aminé naturel le plus simple, liées par la fonction amide pour former un dipeptide glycine-glycine. La fonction amide est celle qui relie les acides aminés dans les protéines. Elle est appelée « liaison peptidique ».
3. Les formules 3 et 4 correspondent à des acides gras. On nomme ainsi les acides organiques qui possèdent de longues chaînes aliphatiques avec ou sans doubles liaisons. La molécule 3 est un acide n-hexadécanoïque (16C) ou acide palmitique. La molécule 4 est l'acide 9,12-octadécadiénoïque (18C) ou acide linoléique. Les doubles liaisons sont généralement de configuration Z (cis) dans les acides gras insaturés.

1. Configuration des acides aminés

■ Définitions

Les acides α -aminés, ou α -aminoacides, sont des molécules organiques constituées d'au moins une **fonction amine** et d'au moins une **fonction acide carboxylique**. Ces deux fonctions sont portées par un même carbone (**carbone α**) qui porte également un hydrogène et un **radical R** (chaîne latérale). Ce radical R donne son identité à chaque acide α -aminé.



Vingt acides α -aminés de la **série L** sont identifiés par des codons de l'ARN messager et sont associés à un ARN de transfert lors de la **traduction du code génétique** en protéines. Ces 20 acides α -aminés constituent le squelette des protéines.

■ Les autres acides-aminés

On connaît plus de 20 acides α -aminés chez les organismes vivants. En effet, les protéines peuvent subir des modifications sur une partie des chaînes latérales des résidus d'acides α -aminés qui les constituent. Ces modifications se produisent uniquement après la traduction (modifications post-traductionnelles), voire pendant la traduction (modifications co-traductionnelle, voir fiche n° 11). Elles sont si variées que ce sont près de 200 α -aminoacides différents que l'on peut identifier lorsque l'on procède à l'analyse chimique des protéines. Enfin, certains acides α -aminés se retrouvent dans des peptides cycliques (hormones) ou chez les bactéries dans le peptidoglycane (où ils peuvent être de la **série D**).

2. Le code génétique

	Position 1			Position 2				Position 3	
	5'	U	C	A	G			3'	
U	UUU	Phe (F)	UCU	Ser (S)	UAU	Tyr (Y)	UGU	Cys (C)	U
	UUC	Phe (F)	UCC	Ser (S)	UAC	Tyr (Y)	UGC	Cys (C)	C
	UUA	Leu (L)	UCA	Ser (S)	UAA	Stop	UGA	Stop	A
	UUG	Leu (L)	UCG	Ser (S)	UAG	Stop	UGG	Trp (W)	G
C	CUU	Leu (L)	CCU	Pro (P)	CAU	His (H)	CGU	Arg (R)	U
	CUC	Leu (L)	CCC	Pro (P)	CAC	His (H)	CGC	Arg (R)	C
	CUA	Leu (L)	CCA	Pro (P)	CAA	Gln (Q)	CGA	Arg (R)	A
	CUG	Leu (L)	CCG	Pro (P)	CAG	Gln (Q)	CGG	Arg (R)	G
A	AUU	Ile (I)	ACU	Thr (T)	AAU	Asn (N)	AGU	Ser (S)	U
	AUC	Ile (I)	ACC	Thr (T)	AAC	Asn (N)	AGC	Ser (S)	C
	AUA	Ile (I)	ACA	Thr (T)	AAA	Lys (K)	AGA	Arg (R)	A
	AUG	Met (M)	ACG	Thr (T)	AAG	Lys (K)	AGG	Arg (R)	G
G	GUU	Val (V)	GCU	Ala (A)	GAU	Asp (D)	GGU	Gly (G)	U
	GUC	Val (V)	GCC	Ala (A)	GAC	Asp (D)	GGC	Gly (G)	C
	GUA	Val (V)	GCA	Ala (A)	GAA	Glu (E)	GGA	Gly (G)	A
	GUG	Val (V)	GCG	Ala (A)	GAG	Glu (E)	GGG	Gly (G)	G

LE 21^e ÉLÉMENT

On connaît un 21^e codon : UGA (équivalent à un codon stop) qui reconnaît un acide aminé : la sélénocystéine. Celle-ci est semblable à la cystéine et possède un atome de sélénium (Se) à la place du soufre. Le Se a la même valence que le soufre.

3. Propriétés des acides aminés

Les propriétés physicochimiques propres à chaque acide aminé découlent de la nature biochimique du radical : hydrophilie, charge... On classe souvent les acides aminés en comparant ces propriétés chimiques et

notamment la capacité de la fonction portée par la chaîne latérale à s'ioniser. On peut ainsi distinguer :

les **acides aminés non-polaires** constitués d'une chaîne aliphatique ou aromatique (plus ou moins hydrophobes),

les **acides aminés polaires** (hydrophiles) mais **non chargés** au pH physiologique,

les **acides aminés polaires et chargés** : basiques (chargés positivement) et les acides aminés acides (chargés négativement) au pH physiologique.

Les pK_a des chaînes latérales sont directement reliés à cette classification.

NOTION DE pH_i

On définit le pH_i comme le pH auquel la migration électrophorétique de l'acide aminé est nulle : pas de déplacement dans un champ électrique, la charge globale est nulle. Dans ce cas, l'acide aminé peut porter des charges, mais elles se compensent.

EXERCICE 1 Exercice de traduction

1. Traduire en acides aminés (codes à une lettre) la séquence nucléotidique suivante qui correspond à une partie de l'ADN codant (ADNc) pour la protéine prion de chat :

ATC ACG GTC AGG CAG CAC ACG GTC ACC ACC ACC ACC AAG GGG
 GAG AAC TTC ACG GAG ACC GAC ATG AAG ATA ATG GAG CGC GTG
 GTG GAG CAG ATG TGC GTC ACC CAG TAC CAG AAA GAG TCC GAG
 GCT TAC TAC CAA AGA GGG GCG AGC

Penser à remplacer T (ADN) par U (ARNm) pour obtenir la correspondance avec le code génétique ci-dessus.

2. Comparer cette séquence protéique à celle de la partie correspondante du prion humain. Quel est pourcentage d'acides aminés identiques?
 ITIKQHTVTT TTKGENFTET DVKMMERVVE QMCITQYERE SQAYYQRGSS
3. Les acides aminés qui diffèrent changent-ils la charge globale de ce peptide ?

Solution

Les espaces ont pour vocation de faciliter la lecture

Chat ITVRQHTVTT TTKGENFTET DMKIMERVVE QMCVTQYQKE SEAYYQRGAS
 Homme ITIKQHTVTT TTKGENFTET DVKMMERVVE QMCITQYERE SQAYYQRGSS

Ces séquences sont identiques à 82 %. Les acides aminés qui diffèrent ne changent pas l'état global d'ionisation de ce peptide car les acides aminés neutres comme la valine (V) sont remplacés par d'autres acides aminés neutres comme l'isoleucine (I) ou la méthionine (M), un acide aminé basique comme la lysine (K) est remplacée par un autre acide aminé basique l'arginine (R) et, de même, un acide aminé acide comme l'acide glutamique (E) est remplacé par un acide aspartique (D).

EXERCICE 2 Migration différentielle

Une goutte d'une solution contenant un mélange de glycine, alanine, acide glutamique, lysine, arginine et histidine est placée au centre d'une feuille de papier et séchée. Le papier est humidifié avec une solution tampon à pH 6 et un champ électrique est appliqué. Indiquer la position de chacun des acides aminés lorsque la migration est arrêtée.

Solution

MÉTHODE

La migration électrophorétique d'un acide aminé dépend de sa charge au pH de l'électrophorèse. Pour déterminer la charge il faut comparer le pH de l'électrophorèse au pHi de l'acide aminé.

Si $\text{pH} < \text{pHi}$: l'acide aminé est chargé positivement, il migre vers la cathode chargée négativement.

Si $\text{pH} > \text{pHi}$: l'acide aminé est chargé négativement, il migre vers l'anode chargée positivement.

Le glutamate ($\text{pHi} = 3,2$) est chargé négativement à pH 6, il migrera donc vers l'anode (chargée positivement). La glycine et l'alanine ne sont pas chargées ($\text{pHi} = \text{pH}$), elles ne migreront pas et resteront localisées au niveau de la zone du dépôt. L'histidine, la lysine, et l'arginine (pHi 7,6 ; 9,9 et 10,7 respectivement) sont chargées positivement à pH 6 et vont migrer vers la cathode (chargée négativement). Pour ces trois derniers acides aminés la migration est fonction de la charge nette à pH 6 celle-ci est d'autant plus grande que l'on s'éloigne du pHi, donc Arg migrera le plus rapidement, puis Lys, puis His.

EXERCICE 3 Sérine et thréonine: les mêmes propriétés ?

La sérine et la thréonine ont en commun certaines des propriétés suivantes lesquelles ?

- un groupement OH dans leur chaîne latérale
- ce sont des acides aminés indispensables
- ce sont des acides aminés polaires
- ils ont un ou deux carbones asymétriques
- ils peuvent faire l'objet de phosphorylation

Solution

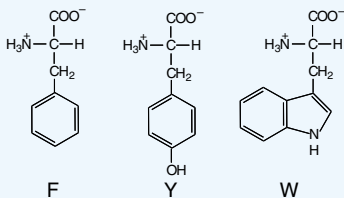
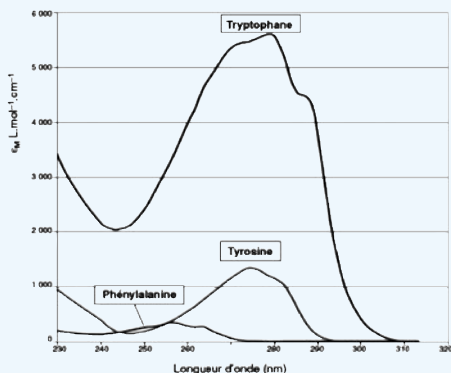
La thréonine a 2 atomes de carbone asymétriques et c'est le seul de ces deux acides aminés à être indispensables. Les groupements OH de la sérine et de la thréonine peuvent faire l'objet de phosphorylation par des kinases spécifiques de ces acides aminés.

MÉTHODE

Les acides aminés indispensables pour l'Homme sont les acides aminés que nous ne pouvons pas synthétiser et que nous devons trouver dans notre alimentation : leucine, tryptophane, lysine, thréonine, phénylalanine, valine, méthionine, isoleucine.

Un moyen mnémotechnique pour les retenir : Le Très Lyrique Tristan Fait Vachement Marcher Yseult.

EXERCICE 4 Détecter les protéines en UV



Voici les spectres d'absorption dans l'ultra-violet (UV) des trois acides aminés aromatiques que l'on trouve dans les protéines

- Qu'est ce qui caractérise ces différents spectres? Estimer les valeurs de l'épsilon molaire à 280 nm (ϵ_M^{280} appelé également coefficient d'extinction molaire) de chaque acide aminé.
- Sachant que l' ϵ_M^{280} d'un peptide ou d'une protéine est la somme des ϵ_M^{280} de chaque acide aminé, quelle sera l'absorbance d'une solution de concentration $C = 0,556 \text{ mM}$ du peptide suivant qui correspond à la partie N-ter de la protéine prion humaine ?



Quelle sera l'absorbance d'une solution à 0,1 % de ce polypeptide ? Prendre 110 Da comme masse molaire moyenne d'un acide aminé.

Solution

1. La phénylalanine, la tyrosine et le tryptophane portent un cycle aromatique, phényle pour F, phénol pour Y et indole pour W. L'hydroxyle phénolique de la tyrosine confère à cette molécule une certaine polarité qui jouera un rôle sur la valeur de la longueur d'onde maximale d'absorption (λ_{\max}) et ϵ_M^{280} .

À partir de ces spectres, on peut déterminer λ_{\max} et ϵ_M^{280} . Pour W, $\lambda_{\max} = 280$ nm et $\epsilon_M^{280} = 5\,600 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ et pour Y, $\epsilon_M^{280} = 1\,200 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ à pH 7 ($\lambda_{\max} = 275$ nm, $\epsilon_M^{280} = 1\,400 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$). On remarque donc que le noyau indole du tryptophane, de par le nombre plus important d'électrons π conjugués qu'il porte, absorbe beaucoup plus la lumière UV que le noyau phénol de la tyrosine et que la phénylalanine n'absorbe pas du tout à 280 nm, mais à 260 nm avec un ϵ_M de $200 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Enfin, ce n'est pas présenté sur le spectre, la liaison peptidique (fonction amide) absorbe également dans l'UV, mais à 210-215 nm. Ainsi, une protéine qui ne possède aucun acide aminé aromatique peut tout de même être détectée en UV. Rappelons tout de même que de nombreuses molécules biologiques absorbent en UV et particulièrement les acides nucléiques à 260 nm.

2. Le polypeptide en question possède 3 tryptophanes ($\epsilon_M^{280} = 5\,600 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) et une tyrosine ($\epsilon_M^{280} = 1\,200 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).

LGCWMLVLFV ATWSDLGLCK KRPKPGGWNT GGSRYPG

$$\epsilon_M^{280} = (5\,600 \times 3) + 1\,200 = 18\,000 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Selon la loi de Beer-Lambert (voir également fiche n° 5) : $\Delta_{\text{Abs}} = \epsilon_M \times C \times l$
 $C = 0,0556 \text{ mM} = 0,0556 \cdot 10^{-3} \text{ M}$ $l = 1 \text{ cm}$

Ainsi $\Delta_{\text{Abs}} = 0,0556 \cdot 10^{-3} \times 18\,000 = 1$

Une solution à 0,1 % contient 1 g · L⁻¹. Soit pour une masse molaire approximative de $110 \times 37 = 4\,070 \text{ Da}$:

$$\Delta_{\text{Abs}} = 1/4\,070 \times 18\,000 \times 1 = 4,42$$

CALCUL DES PARAMÈTRES D'UNE PROTÉINE SUR LE WEB

Calcul des paramètres d'un peptide ou d'une protéine automatiquement.

Se connecter au site **protparam tools** (outils pour déterminer les paramètres d'un peptide ou d'une protéine)

<http://web.expasy.org/protparam/>

Saisir la séquence ci-dessus sans les espaces. Cliquer sur « compute parameters ».

Détailler ce qui s'affiche. Que constate-t-on quant à la valeur d' ϵ_M^{280} et à celle de la valeur Δ_{Abs} pour une solution 1 % ?

EXERCICE 5 Acides aminés chargés

Toujours sur ce même polypeptide

1 10 11 20 21 30 31 37
LGCWMLVLFV ATWSDLGLCK KRPKPGGWNT GGSRYPG

1. Quels sont les acides aminés chargés de ce polypeptide ?
2. Quel est le point isoélectrique (pI) de ce peptide (pour simplifier, faire la moyenne des pK des 6 groupes chargés de ce polypeptide à pH 7) ?

On donne : leucine $pK(NH_3^+) = 9,9$ et $pK(COO^-) = 2,4$; glycine $pK(NH_3^+) = 9,6$ et $pK(COO^-) = 2,3$; lysine pK chaîne latérale = 10,6 et $pK(NH_3^+) = 9,6$; arginine pK chaîne latérale = 12,5 ; aspartate pK chaîne latérale = 3,8

Que donne l'analyse par **protparam tools** et **Protein calculator**, par exemple ?

<http://web.expasy.org/protparam/>

<http://protcalc.sourceforge.net>

POINT ISOÉLECTRIQUE

Le pH isoélectrique (pHi) ou point isoélectrique (pI) est le pH pour lequel la migration d'une substance est nulle lorsqu'on la place dans un champ électrique.

Connaissant les pK des 2 fonctions d'un acide aminé sans chaîne latérale chargée, on peut calculer théoriquement le pHi selon la formule : $pHi = (pK_1 + pK_2)/2$

Exemple de la glycine : $pHi = (2,3 + 9,6)/2 = 5,95$

Exemple de la lysine : on ne prend en compte que les groupes ionisables au-dessus de pH 7. $pHi = (9,2 + 10,6)/2 = 9,9$

Il en est de même pour un acide aminé à chaîne latérale acide comme l'aspartate, on prendra en compte des groupes ionisables pour $pH < 7$: $pHi = (1,9 + 3,8)/2 = 2,85$

Solution

1. Dans la séquence proposée on constate que les 14 premiers acides aminés sont neutres. Le 15^e est un aspartyle (D), acide aminé acide, pK de la chaîne latérale = 3,8. Les acides aminés 20 à 24 représentent une séquence très basique. On y trouve 3 lysines (pK chaîne latérale = 10,6) et une arginine (pK chaîne latérale = 12,5). La charge globale de ce polypeptide à 37 résidus sera donc plutôt basique.