

LES GUIDES MANGAS

.....

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE



Auteur
Dessins
Scénario
Studio

MASAHARU TAKEMURA
SAKURA
MASAYOSHI MAEDA
BECOM

Traduction

JEAN-YVES FÉVRIER

agrégé



Avant-propos

La biologie moléculaire étudie les molécules à la base de la vie (ADN, ARN, protéines...) et leurs interactions au sein des organismes vivants. Cette discipline utilise la physique, la chimie et la biologie, et améliore les connaissances en médecine, agriculture et ingénierie.

Les chercheurs en biologie moléculaire, dont je fais partie, effectuent de nombreuses expériences dans les instituts de recherche, les universités mais aussi les entreprises. Une grande partie de notre travail consiste à proposer des modèles, émettre des hypothèses puis à les vérifier par l'expérimentation. Comme nous ne voyons ni les molécules ni les cellules que nous étudions, les connaissances accumulées dans le champ de la biologie moléculaire viennent pour l'essentiel de données expérimentales.

La discipline a beaucoup progressé depuis quelques dizaines d'années. Elle a d'ailleurs permis des avancées spectaculaires dans la médecine clinique. Pour autant, chaque progrès apporte de nouvelles questions et il y a encore beaucoup de choses que nous ne comprenons pas.

Un chercheur a toujours envie de partager sa passion pour la discipline qu'il étudie. Hélas, faire découvrir le monde de la biologie moléculaire à des non-spécialistes est difficile. C'est frustrant pour mes collègues et moi, car cette discipline passionnante mérite d'être connue ! Elle couvre de vastes pans des sciences de la vie : les gènes, les maladies génétiques, les cancers, le clonage, les thérapies géniques révolutionnaires...

Le *Guide manga de la biologie moléculaire* a pour objet de faire découvrir cette discipline à des non-spécialistes. Les deux héroïnes, Rin et Ami, doivent suivre un cours de rattrapage en biologie moléculaire. Elles iront sur l'île privée du Dr Moro, leur enseignant, et seront guidées par son assistant Marcus qui leur fera découvrir molécules et cellules grâce à une machine de réalité virtuelle.

Tous les concepts de biologie moléculaire présentés sont exacts, mais simplifiés. Le guide vous apprend le vocabulaire et les concepts de base. Si, comme je l'espère, il vous donne envie d'en savoir plus, vous serez armé pour aborder des ouvrages plus techniques.

Pour conclure, je souhaite remercier toute l'équipe d'Ohmsha, M. Masayoshi Maeda pour son excellent scénario, M. Sakura pour ses admirables représentations en BD du monde complexe des molécules, sans oublier l'ensemble des lecteurs qui m'ont fait confiance.

Masaharu Takemura

Table des matières



Prologue

L'examen de rattrapage

7



Chapitre 1

Qu'est-ce qu'une cellule ?

21

- 1. Une cellule est une petite bulle de vie 22
 - Chaque organisme vivant est constitué de cellules 23
 - Les cellules sont vivantes 26
 - Une cellule est faite de molécules variées 29
 - Je n'ai jamais vu de cellule ! 30
 - La plus grande cellule du corps 30
- 2. Allons voir l'intérieur d'une cellule 31
 - Pénétrons dans la membrane plasmique 33
 - Cytoplasme et organites de la cellule 37
- 3. Le noyau : un petit cerveau 41
 - Qu'y a-t-il dans le noyau ? 43
- 4. Organismes uni- et multi-cellulaires 54
- 5. Organismes eucaryotes et procaryotes 57



Chapitre 2

Protéines et ADN : déchiffrons le code génétique

59

- 1. Les protéines gèrent l'activité cellulaire 65
 - C'est quoi, l'activité cellulaire ? 65
 - Les enzymes, des protéines puissantes ! 67
 - Les protéines enzymatiques 75
 - Le rôle des protéines dans la division cellulaire 76
 - La contraction musculaire utilise des protéines 77
 - Résumé 78
- 2. Les protéines sont faites d'acides aminés 80
- 3. Acide aminé modifié, protéine bouleversée 82
 - Gène : plan de construction d'une protéine 83
 - Comment la cellule sait-elle quelle protéine créer ? 83

Le plan indique l'ordre d'assemblage des acides aminés	84
Les gènes sont codés	85
4. ADN et nucléotides	87
La « structure en double hélice » de l'ADN	87
L'ADN est fait de nucléotides	88
Les nucléotides sont l'alphabet du code génétique	90
5. Le génome et les gènes	94
Chromosomes, gènes et reproduction	95
Comment visualiser la taille du génome ?	96

	Chapitre 3	Réplication de l'ADN et division cellulaire	97
---	-------------------	--	-----------

1. Les cellules se multiplient par division	98
Reproduction : une activité vitale !	98
Division cellulaire : la reproduction facile	103
La division cellulaire chez les organismes multicellulaires	106
2. L'ADN est répliqué avant la division cellulaire	111
Qu'arrive-t-il aux gènes ?	111
La structure double de l'ADN	112
L'ADN polymérase pendant la réplication	114
Qu'est-ce qu'un chromosome ?	128
Les cellules humaines comportent 46 chromosomes	129
Les chromosomes ne sont visibles que le temps de la division cellulaire	129
3. La division cellulaire	129
La mitose	129
La cytokinèse	133
4. Le cycle cellulaire	134
5. Division cellulaire et cancer	136

	Chapitre 4	Comment est fabriquée une protéine ?	137
---	-------------------	---	------------

1. Un gène utile est un gène transcrit	138
Comment faire une protéine	138
La transcription	144
2. Chromatine et transcription	150
Désentortillons le fil du téléphone	150
Un des brins du ruban d'ADN sert de moule pour la synthèse d'ARN	152
L'ARN polymérase copie l'information génétique	154
Élagage de l'ARNm transcrit	159

L'épissage alternatif	161
Le brassage des exons	161
3. L'ARN en détail	162
Caractéristiques de l'ARN	162
L'ADN et l'ARN contiennent des sucres différents	165
L'ARN est flexible	167
Il y a de nombreux types d'ARN	168
4. L'ARN de transfert ou ARNt	171
Le ribosome, l'outil de synthèse protéique	171
Fonctionnement du code génétique	173
ARNt ou ARN de transfert	176
La protéine est complète	180

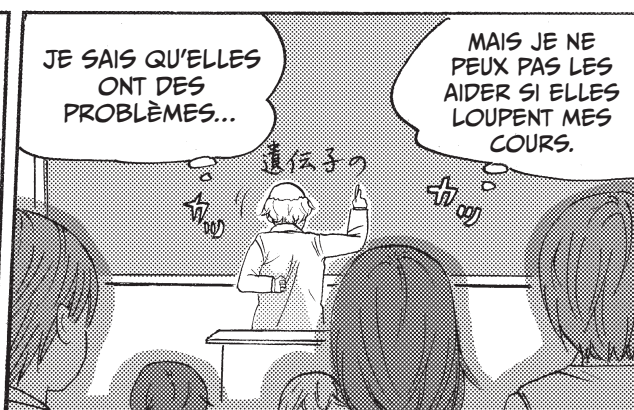
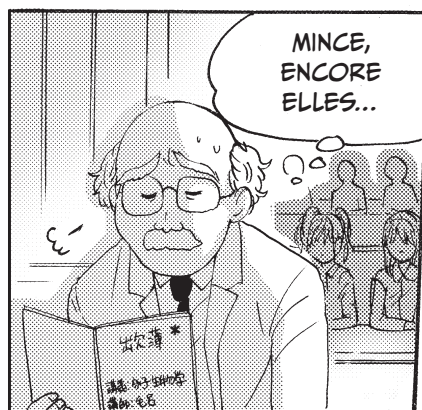
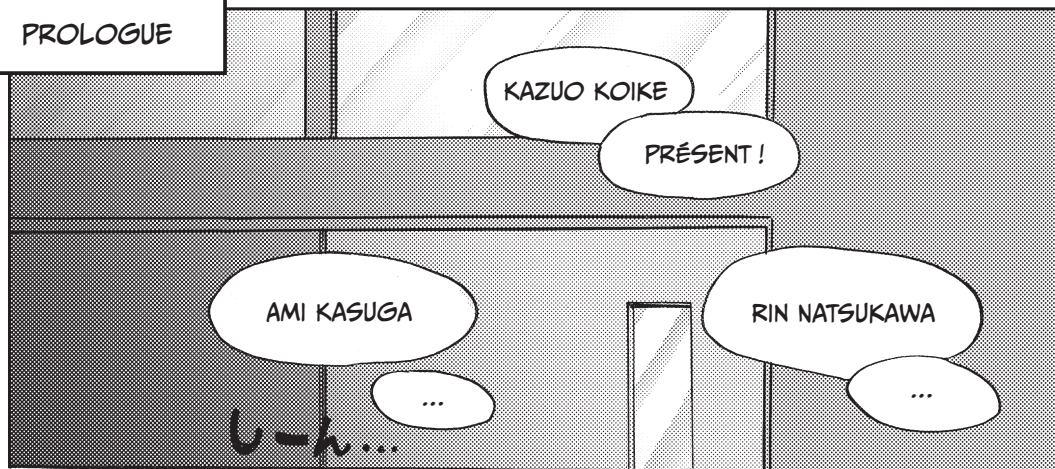
	Chapitre 5	Technologies génétiques et recherche	181
---	-------------------	---	------------

1. L'ADN recombinant	182
Manipulation de l'ADN	187
Amélioration des produits agricoles par l'ADN recombinant	189
La technique de recombinaison génétique	193
Étape 1 : le gène cible est amplifié (multiplié)	193
Étape 2 : recombinaison génétique (couper/coller)	194
Étape 3 : transduction et clonage	195
2. Détecter et isoler l'ADN	197
3. Animaux transgéniques	198
Souris KO (<i>knockout</i>)	199
4. Médecine personnalisée et thérapie génique : le futur de la prévention ?	202
Thérapie génique	204
5. La renaissance de l'ARN	207
L'interférence par ARN : l'ARN modifie l'expression des gènes	207
Les micro-ARN (miARN)	208
Vers un ARN thérapeutique ?	209
6. Comment fonctionne la PCR ?	209
7. Comment produire des animaux clonés	211
8. Les gènes racontent l'évolution	214
9. L'avenir de la biologie moléculaire	215

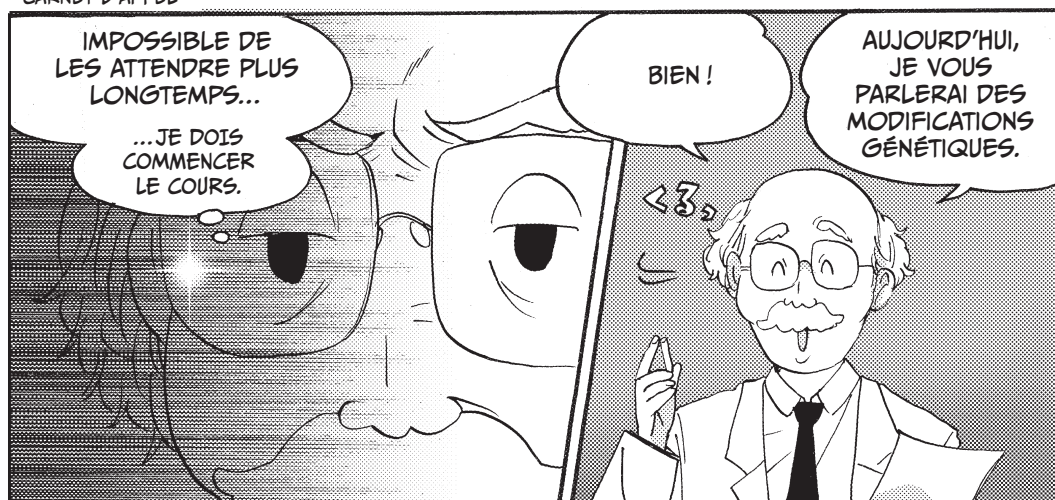
	Épilogue	216
---	-----------------	------------

Index	225
-------	-----

PROLOGUE



* CARNET D'APPEL





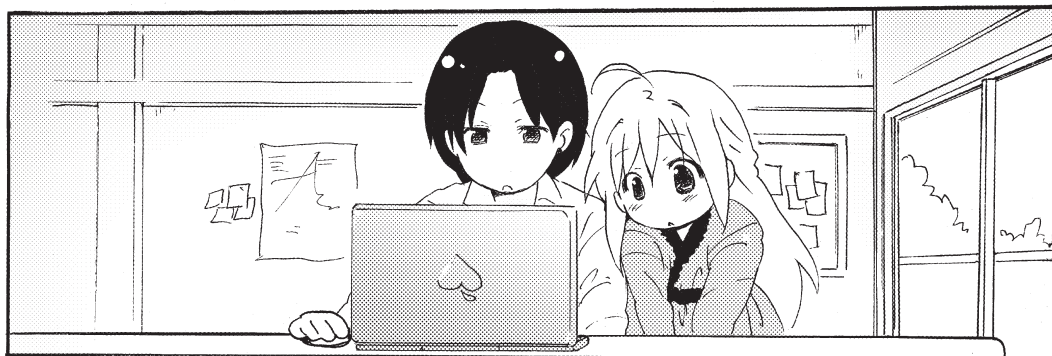
QUELQUES HEURES
PLUS TÔT...

RIN NATSUKAWA,

VOUS CUMULEZ TROP D'ABSENCES
POUR PASSER L'EXAMEN DE
BIOLOGIE MOLÉCULAIRE.

PRÉSENTEZ-VOUS DÈS QUE POSSIBLE À MON LABORATOIRE
POUR CONNAÎTRE LES MODALITÉS DU COURS DE RATTRAPAGE.

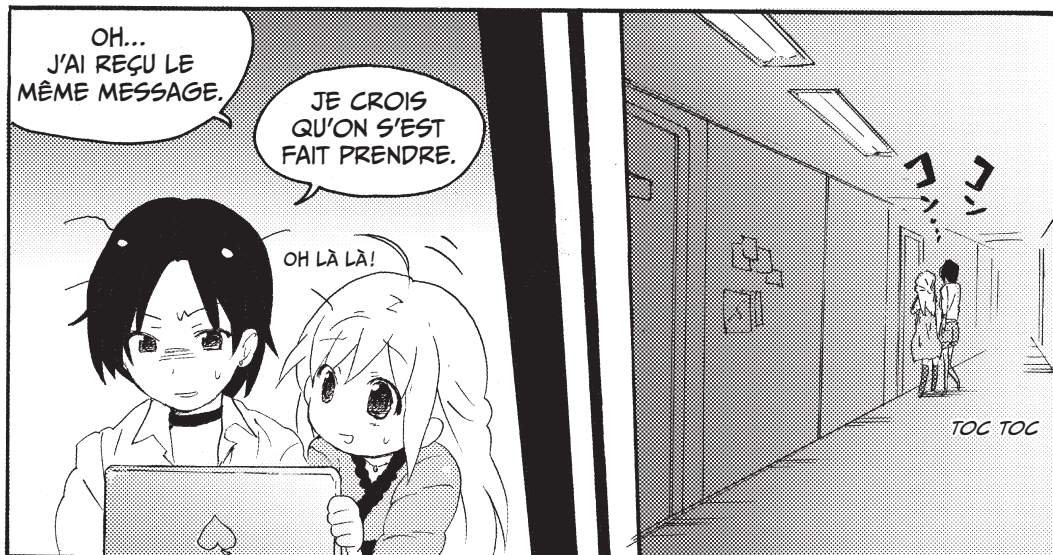
PROFESSEUR MORO

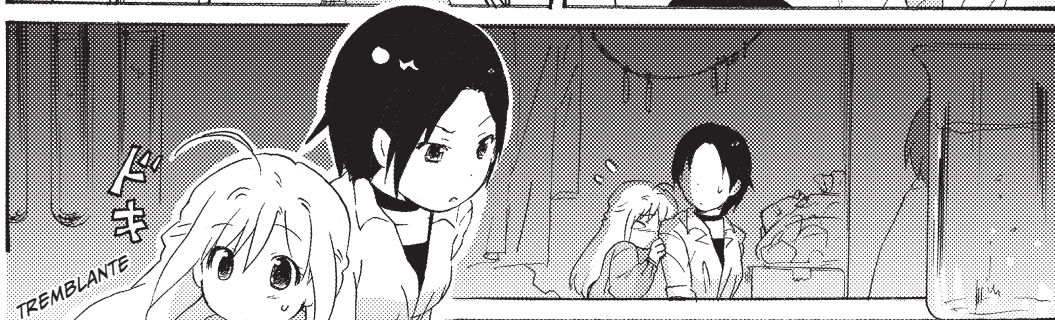
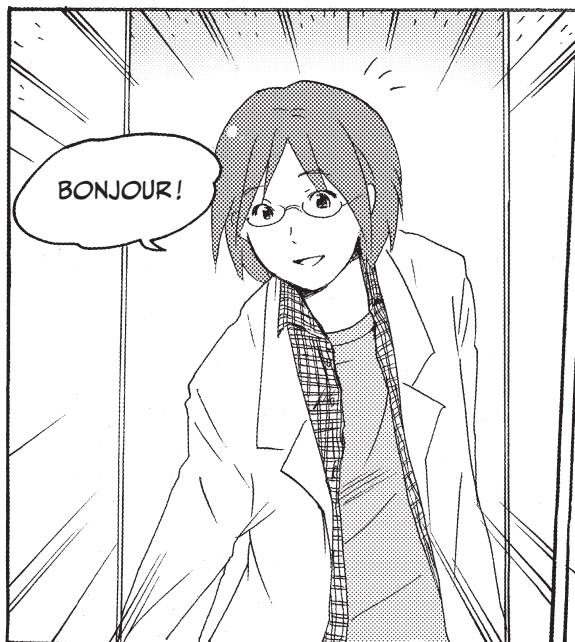


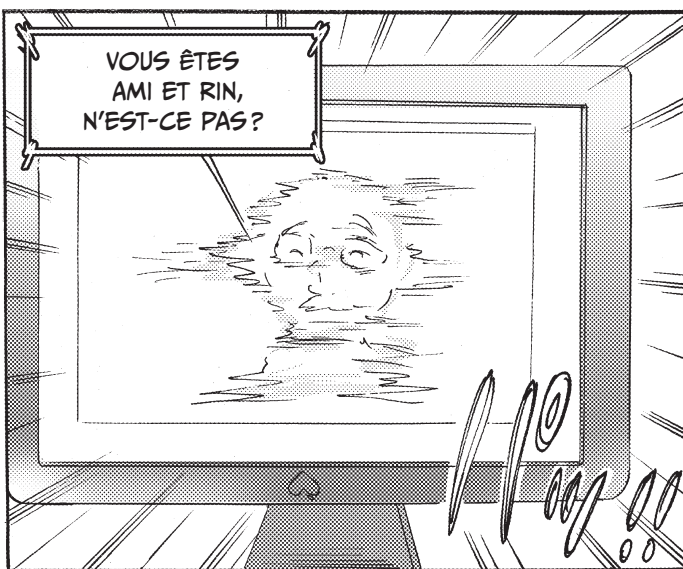
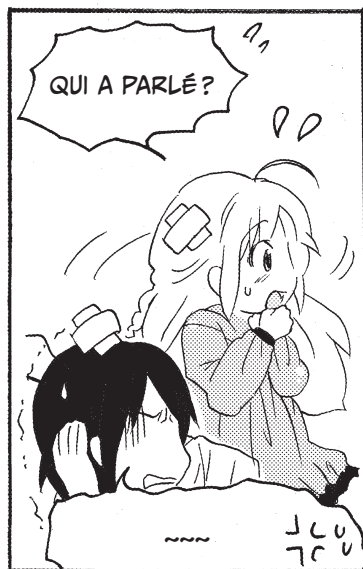
OH...
J'AI REÇU LE
MÊME MESSAGE.

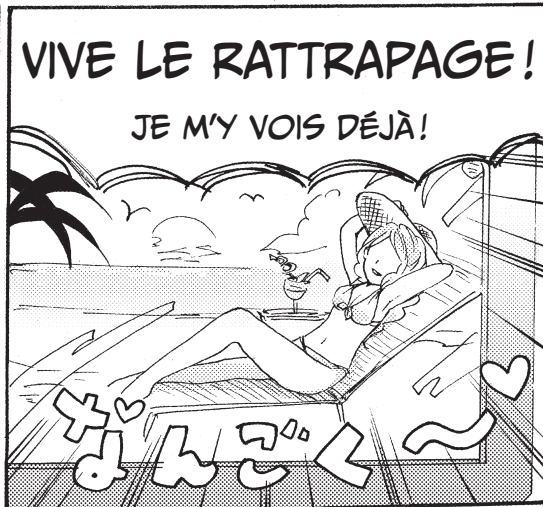
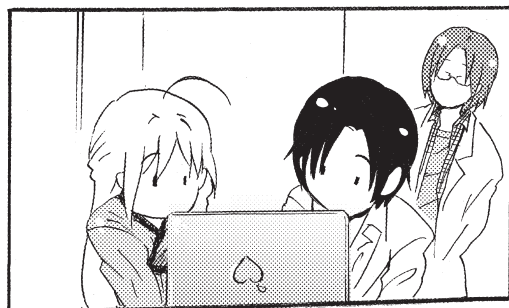
JE CROIS
QU'ON S'EST
FAIT PRENDRE.

OH LÀ LÀ!

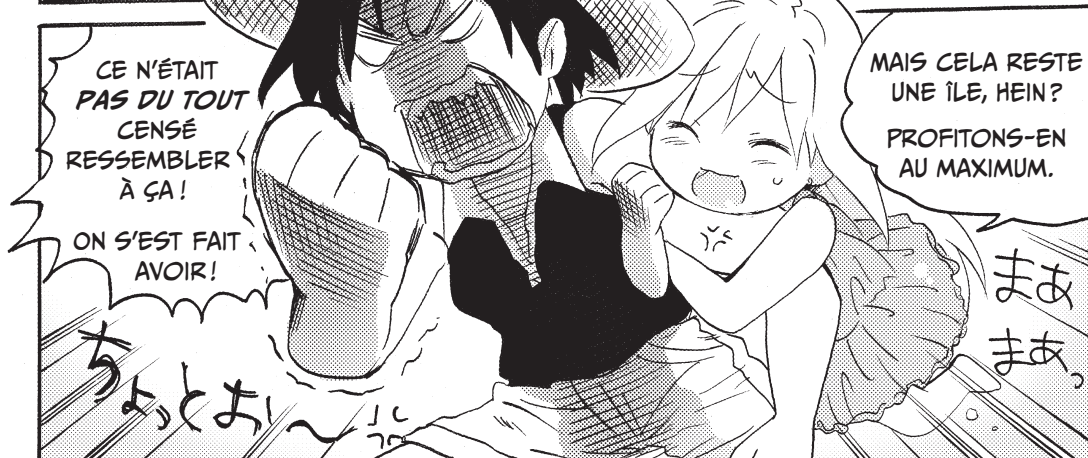
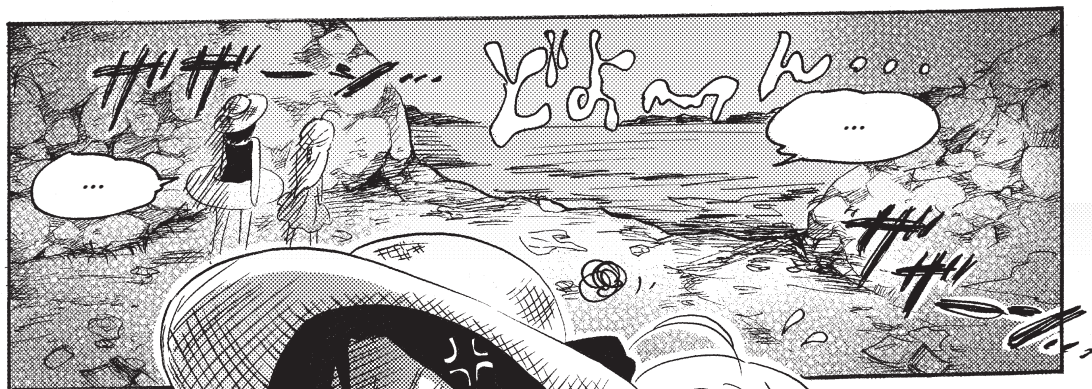


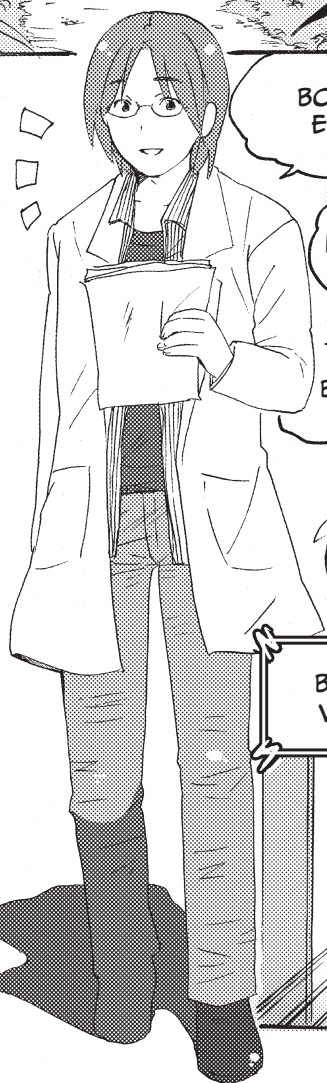
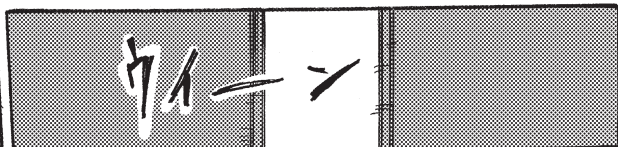
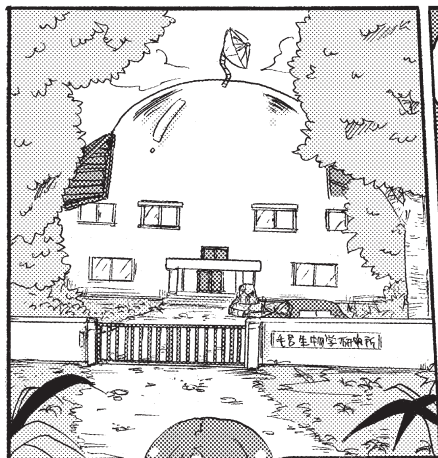






QUELQUES JOURS PLUS TARD...





BONJOUR!
ENTREZ.

CE
LABORATOIRE
EST ÉNORME.

LE DR MORO L'A
CONSTRUIT AVEC
L'ARGENT DE
SES BREVETS.

C'EST L'UN DES PLUS
GRANDS CHERCHEURS
EN BIOLOGIE
MOLÉCULAIRE.

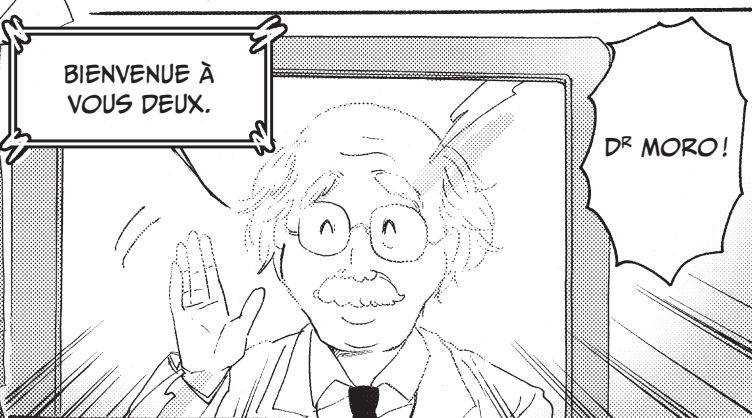
BREVETS ?!

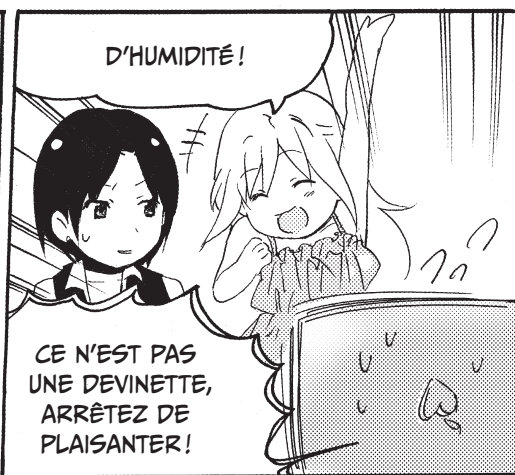
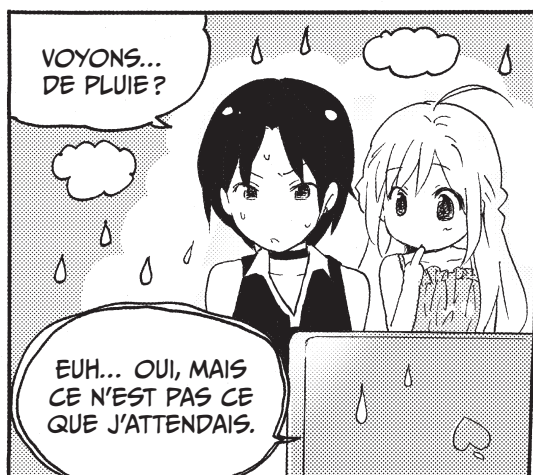
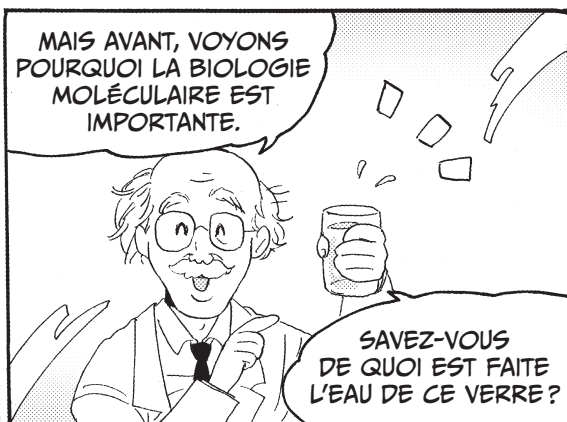
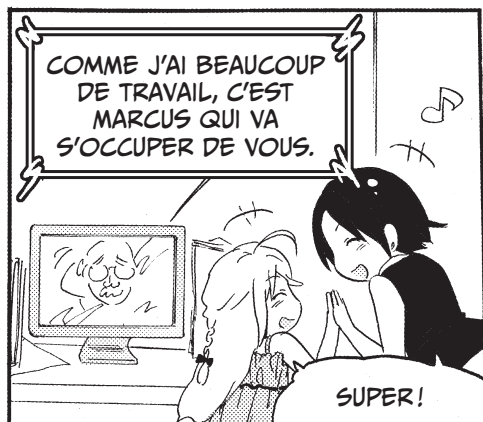
IL A FAIT
CELA
TOUT
SEUL ?

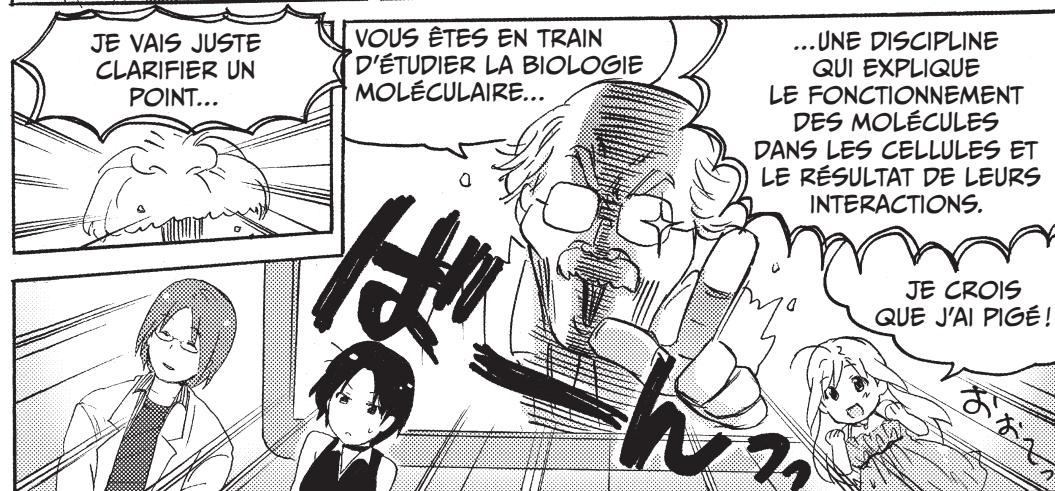
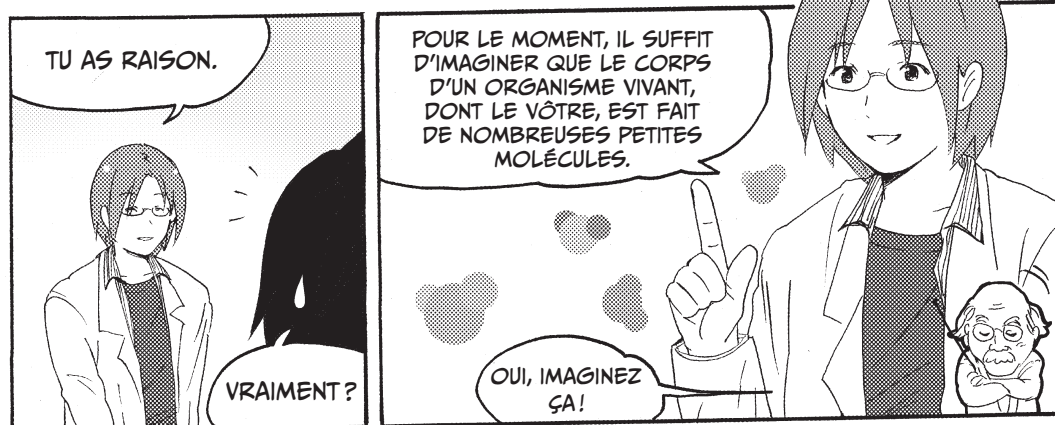
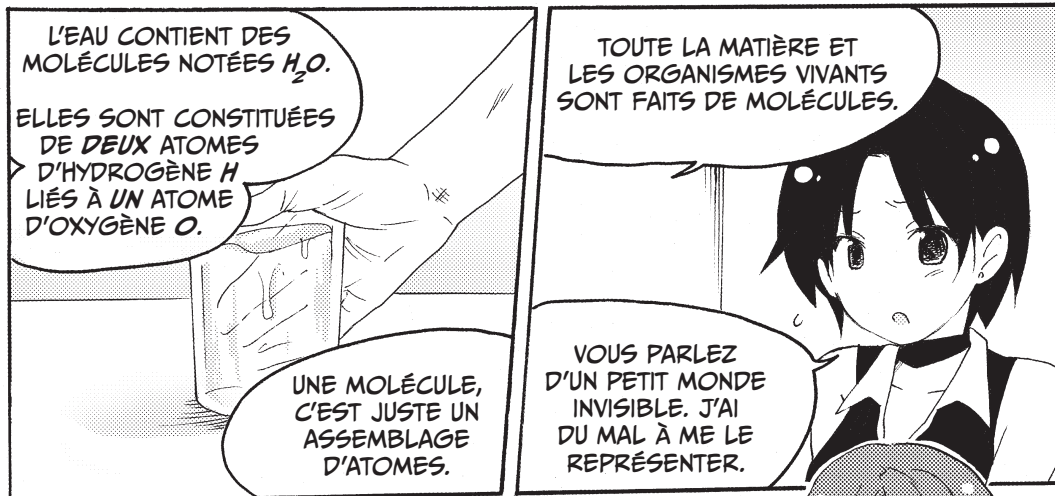
JE SUIS LÀ
LES FILLES.

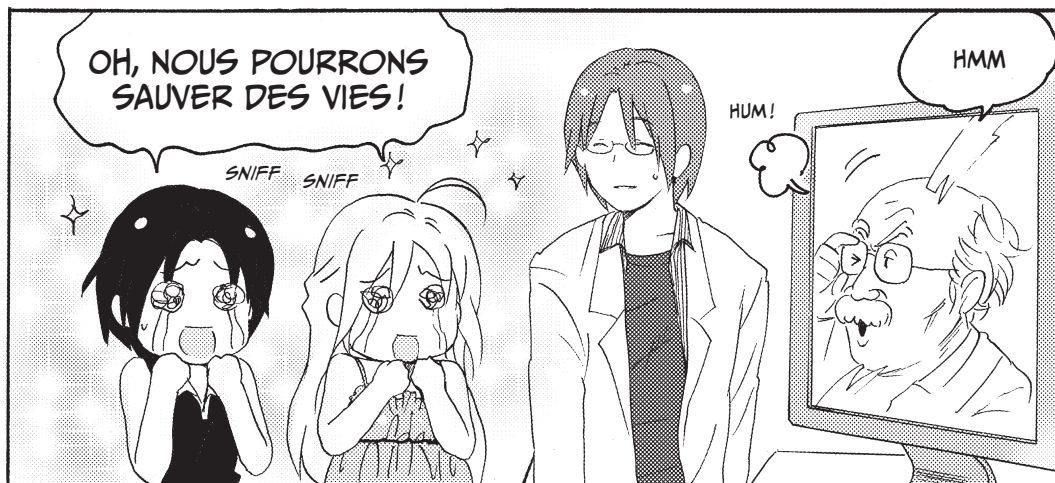
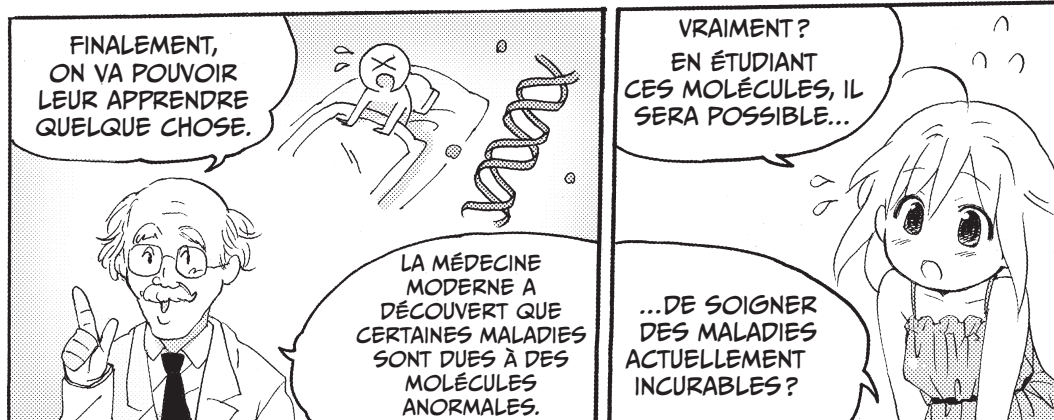
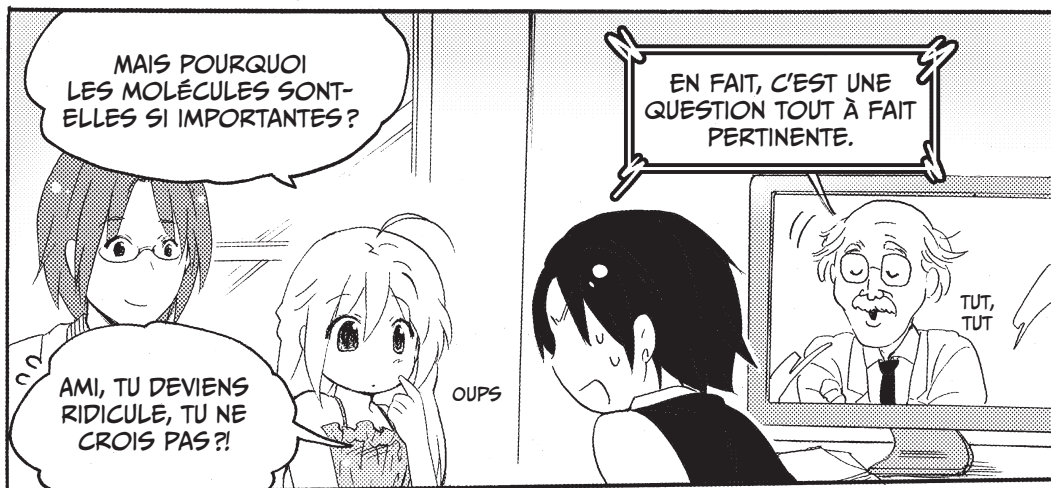
BIENVENUE À
VOUS DEUX.

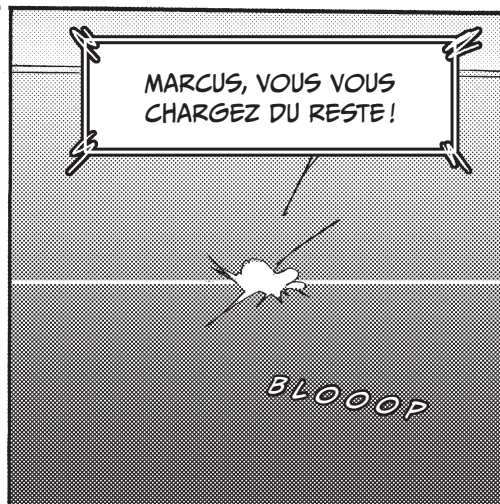
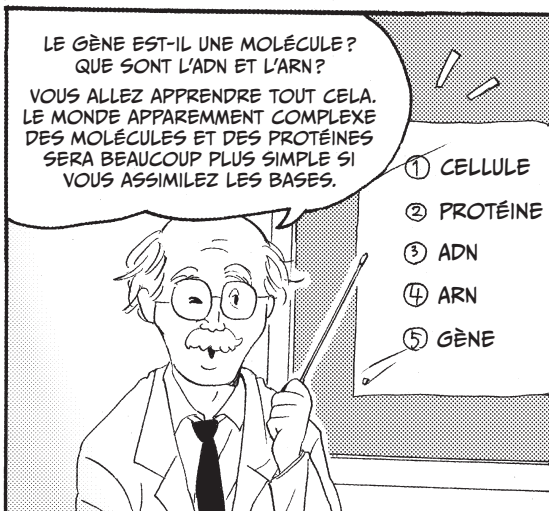
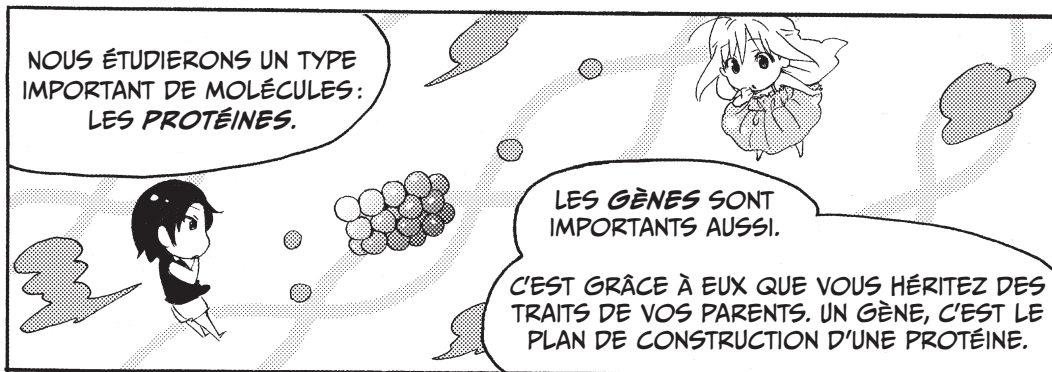
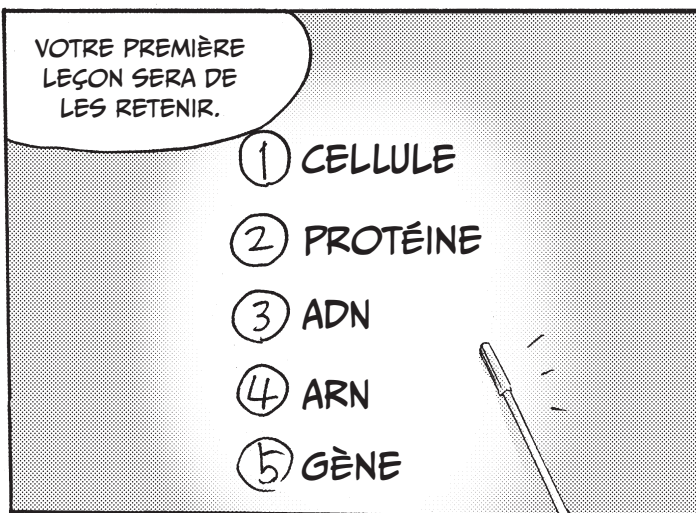
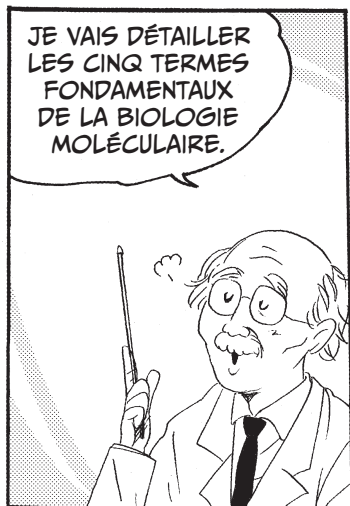
DR MORO !

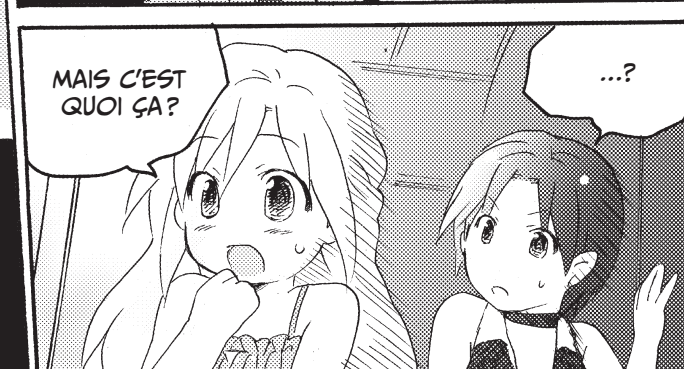
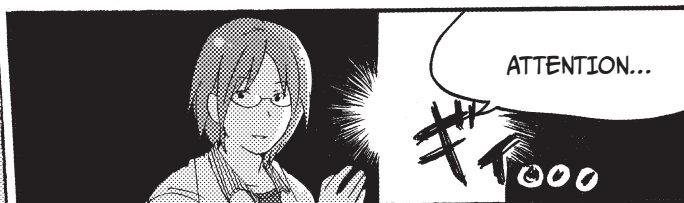
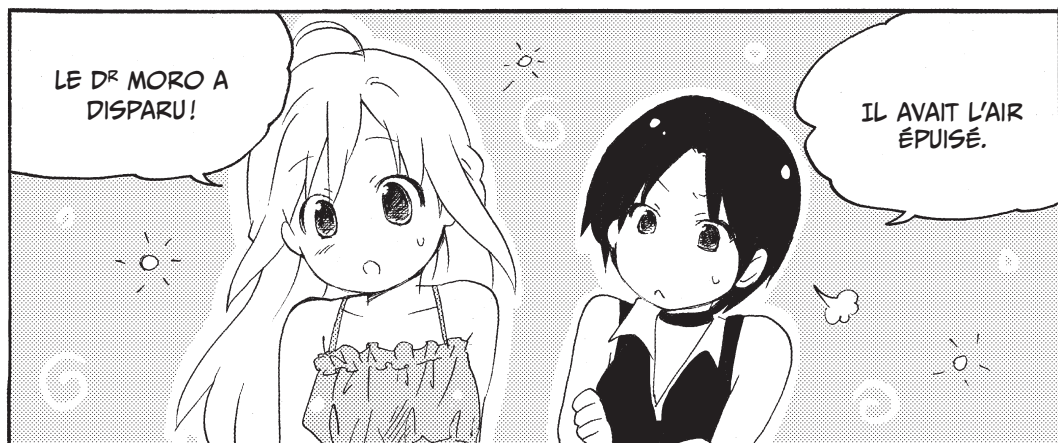






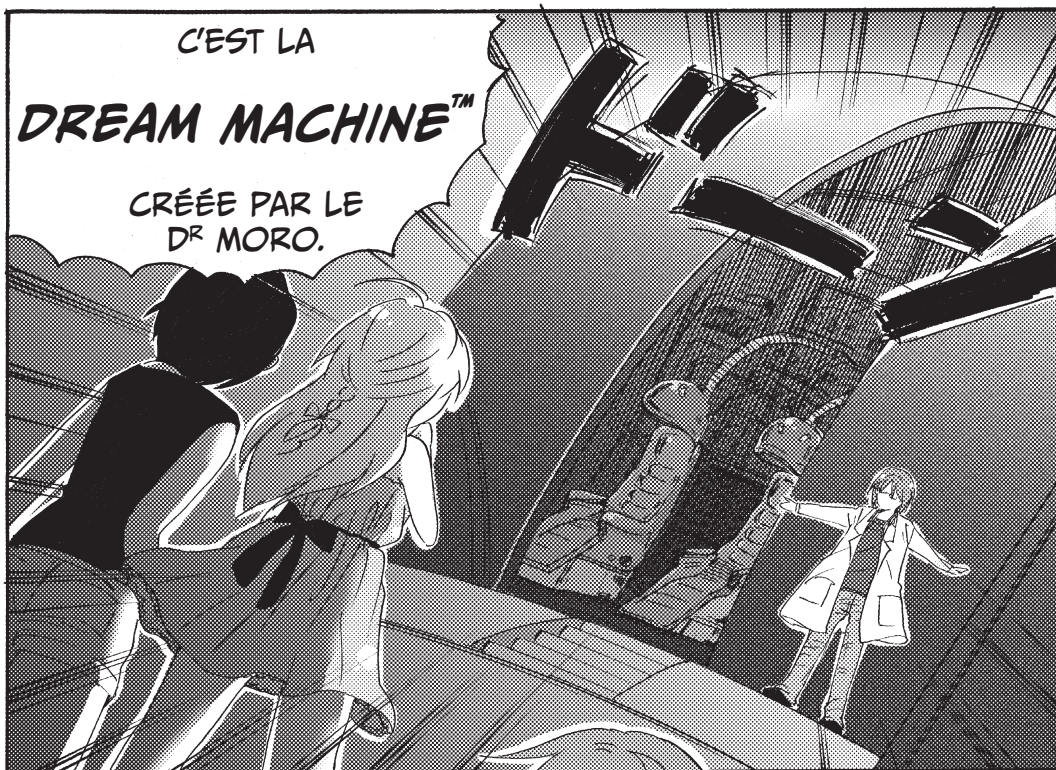






C'EST LA
DREAM MACHINE™

CRÉÉE PAR LE
DR MORO.



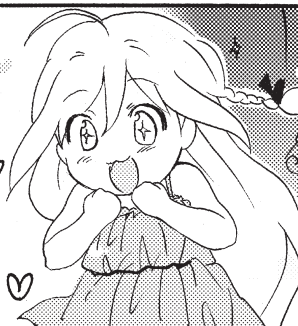
C'EST UNE MACHINE DE RÉALITÉ
VIRTUELLE AUGMENTÉE QUI
VOUS IMMERGE DANS LE MONDE
MICROSCOPIQUE DE LA BIOLOGIE
MOLÉCULAIRE.

VOUS UTILISEREZ LA
DREAM MACHINE™
DÈS AUJOURD'HUI POUR
EXPLORER
L'UNIVERS
HALLUCINANT DE
LA BIOLOGIE
MOLÉCULAIRE.

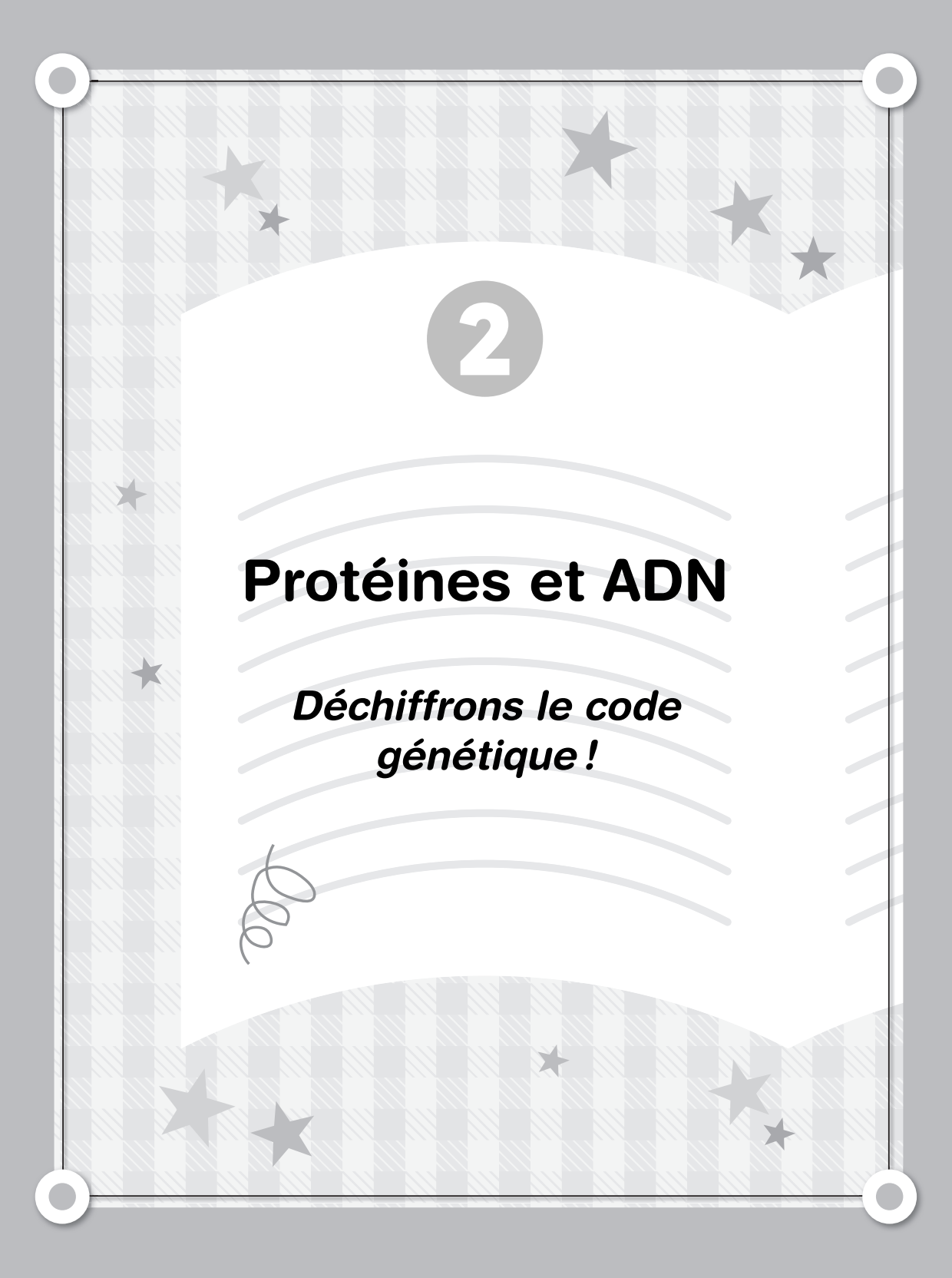


OH MON DIEU!

TOUT ÇA EST
TELLEMENT
EXCITANT!



OUAIS...
JE TE LAISSE COMMENCER.

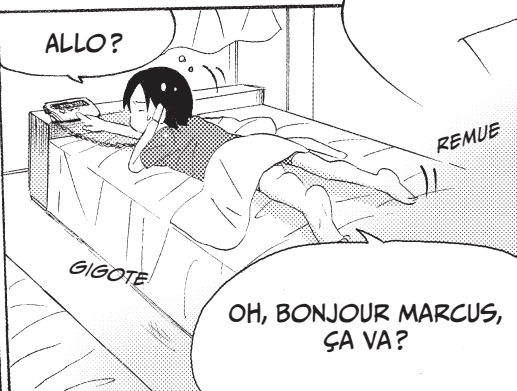
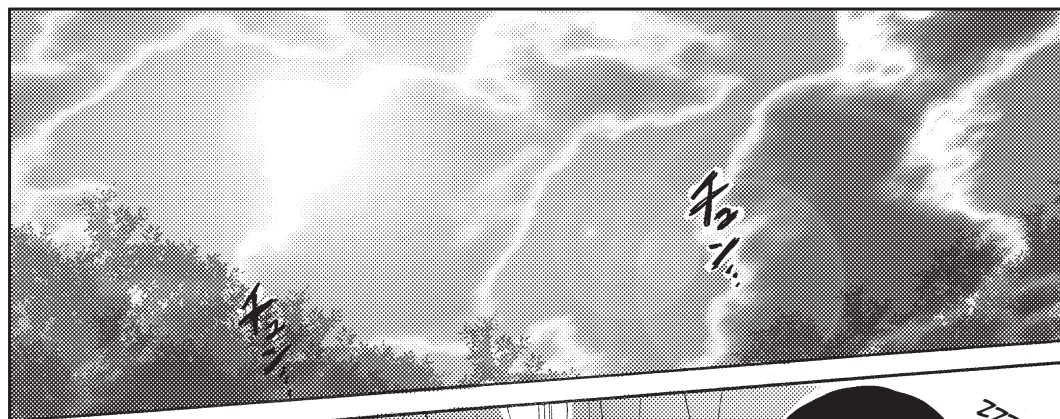


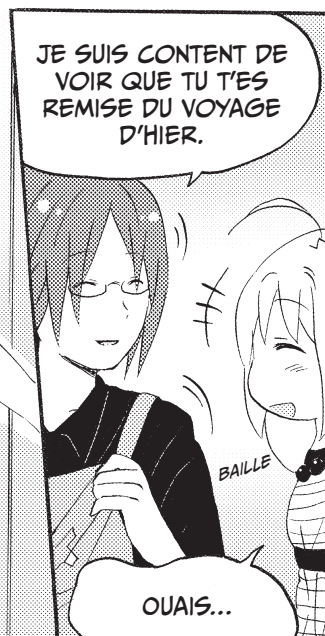
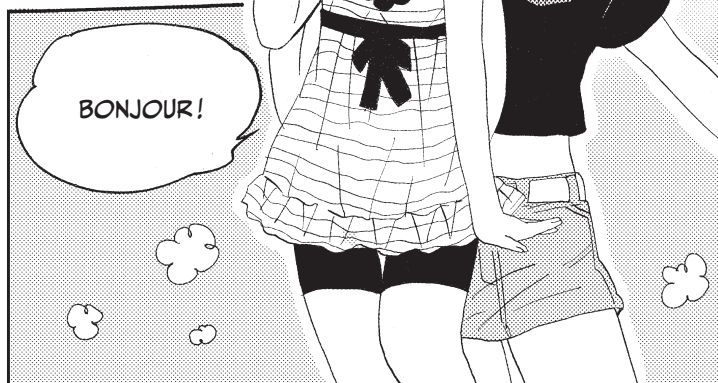
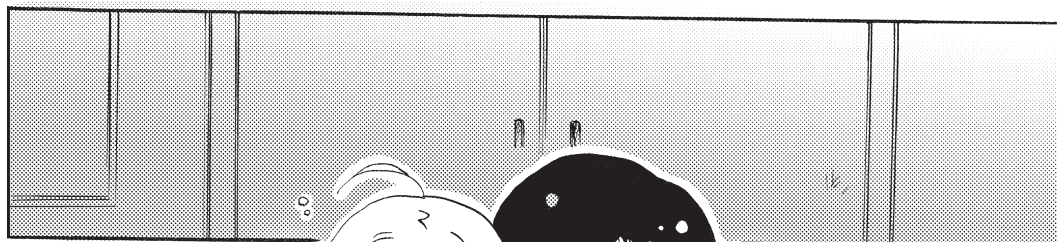
2

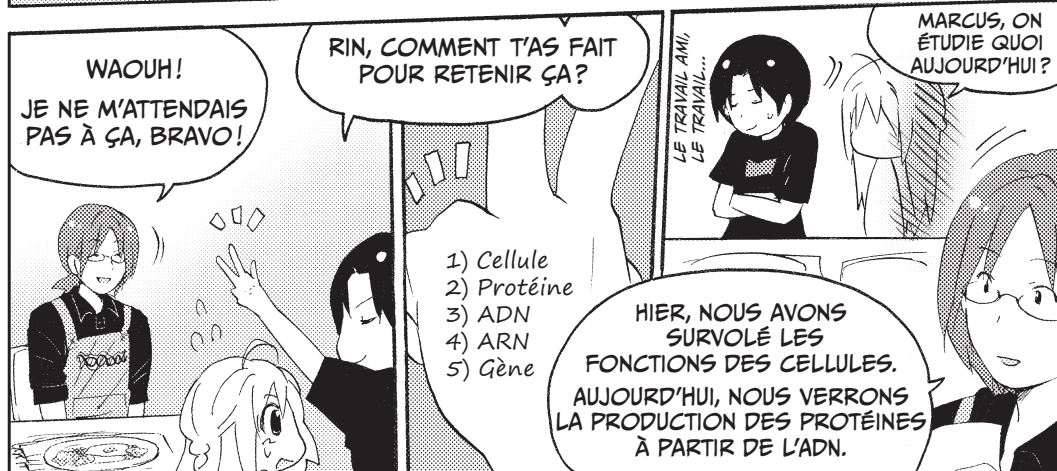
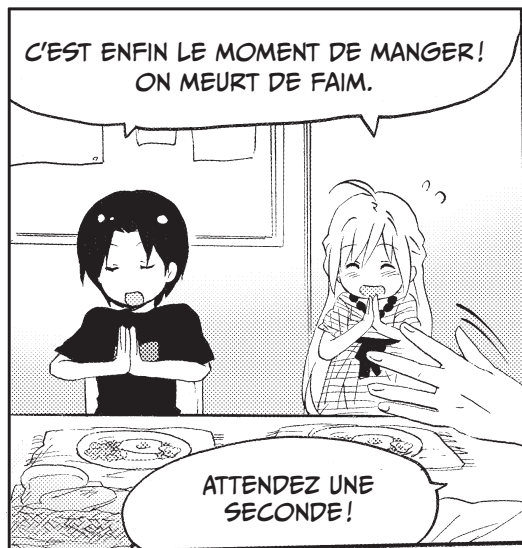
Protéines et ADN

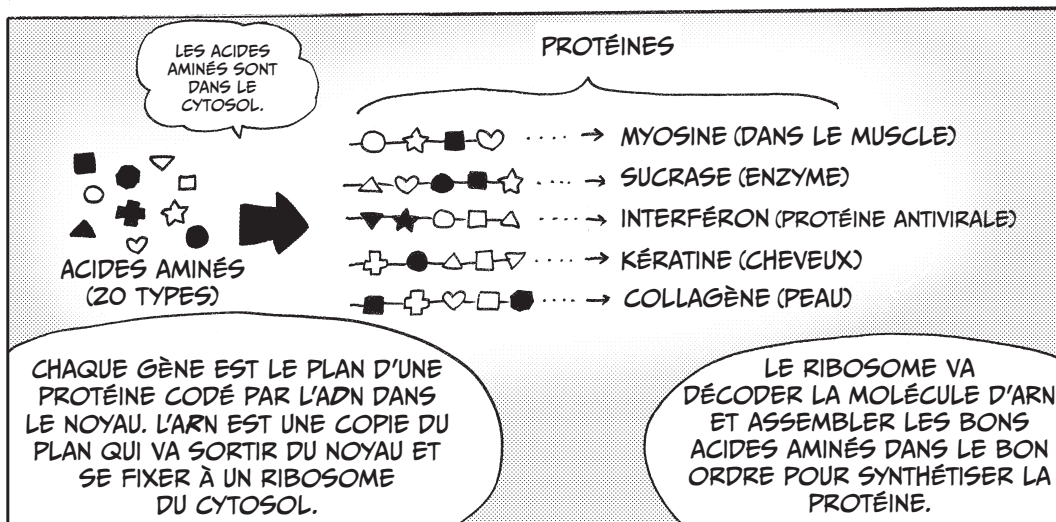
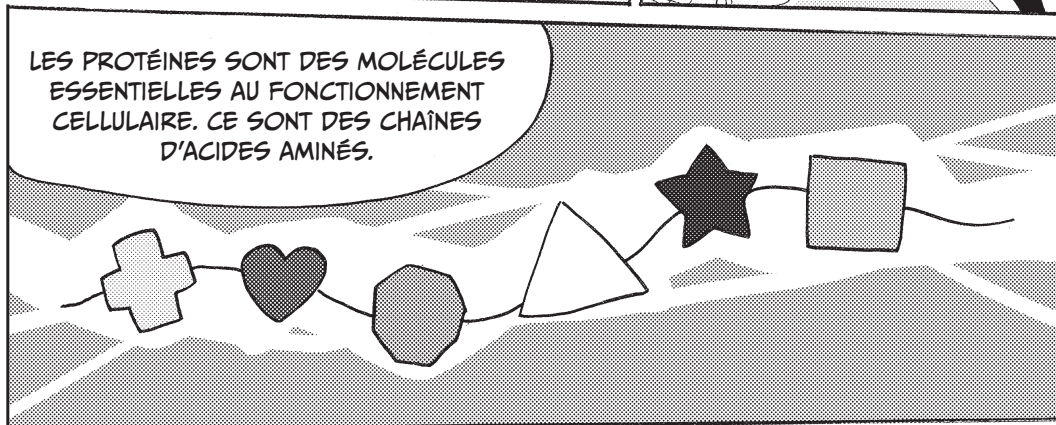
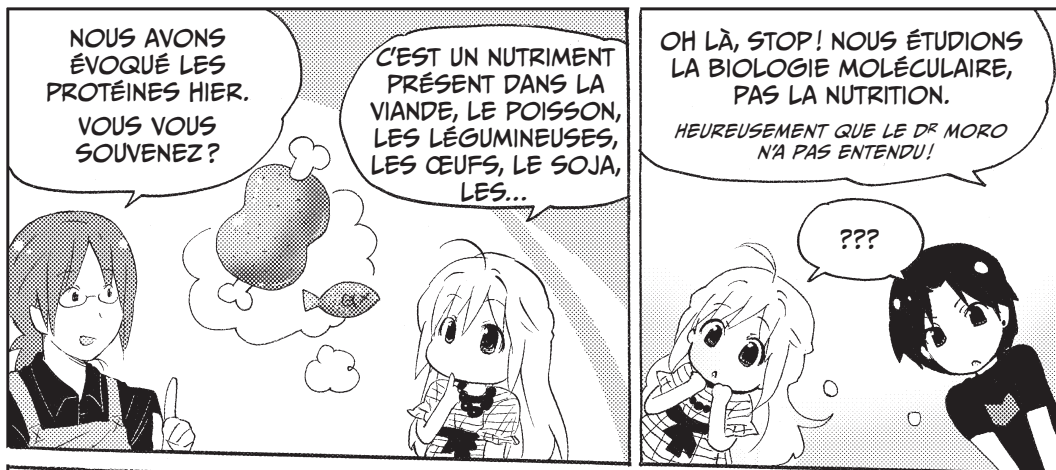
*Déchiffrons le code
génétique !*

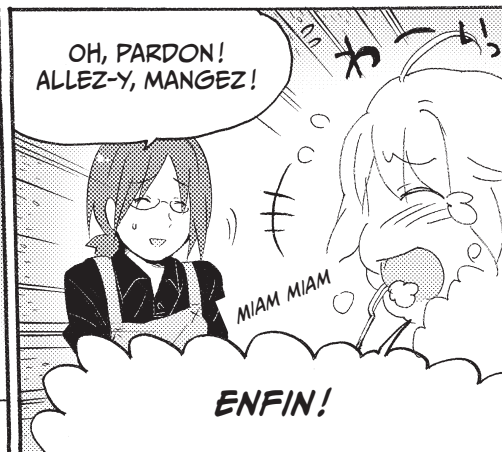
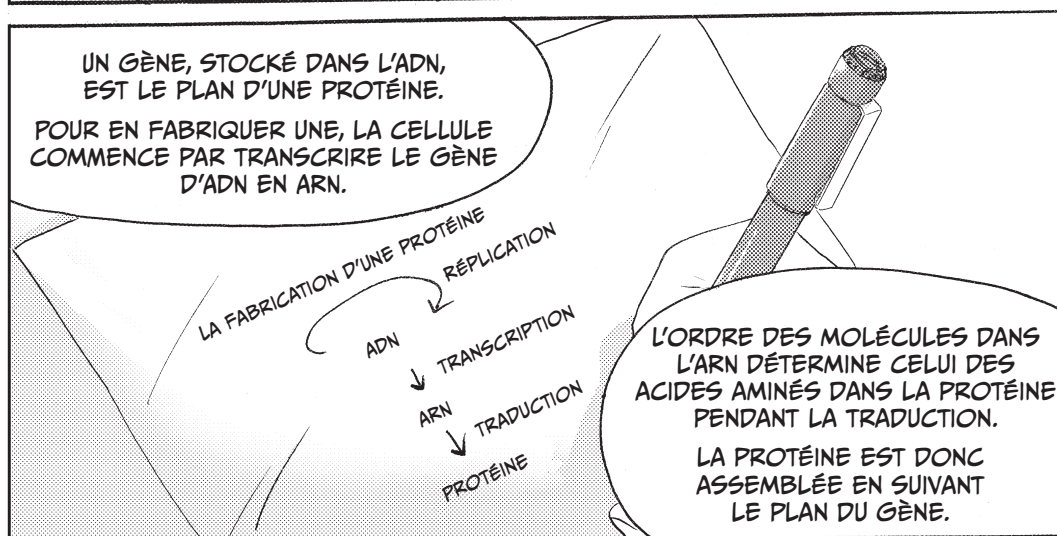
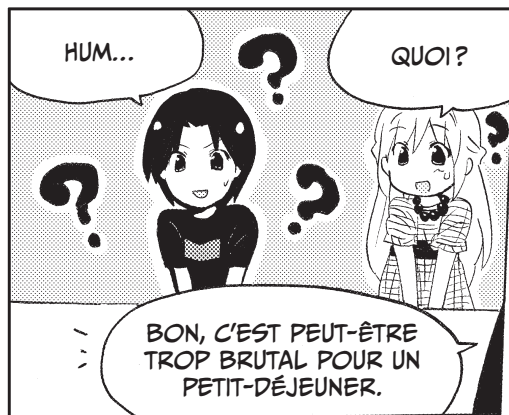












LES PROTÉINES GÈRENT L'ACTIVITÉ CELLULAIRE

C'EST QUOI, L'ACTIVITÉ CELLULAIRE ?

ALLEZ, COMMENÇONS LE COURS.

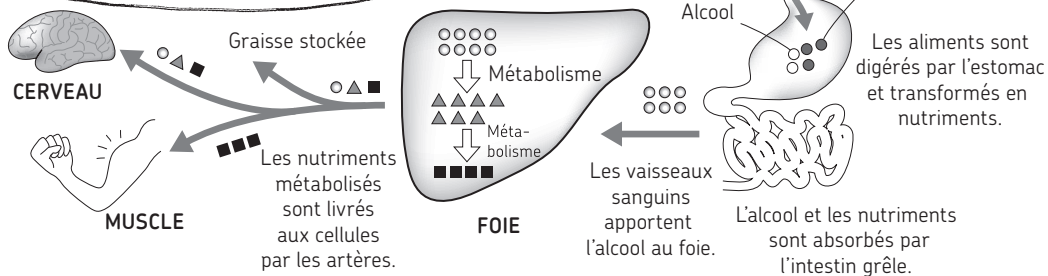
EXCUSEZ-MOI, MAIS...

OUI, RIN ?

CE QUE NOUS AVONS APPRIS EST-IL VALABLE POUR CHAQUE TYPE DE CELLULE ?

NON, CHAQUE TYPE A UN RÔLE DIFFÉRENT.

PAR EXEMPLE, LES CELLULES DU FOIE STOCKENT ET LIBÈRENT LES NUTRIMENTS ABSORBÉS, ELLES NEUTRALISENT L'ALCOOL ET LES MÉDICAMENTS...



LES CELLULES MUSCULAIRES SE CONTRACTENT ET SE RELÂCHENT POUR EFFECTUER LES MOUVEMENTS.

DONC LES TYPES DE CELLULES SONT RADICALEMENT DIFFÉRENTS LES UNS DES AUTRES!

C'EST JUSTE. ET CES DIFFÉRENTES FONCTIONS DÉPENDENT DES PROTÉINES. C'EST LE COURS D'AUJOURD'HUI.

LES PROTÉINES ONT DES FONCTIONS TRÈS VARIÉES ET ESSENTIELLES DANS LES CELLULES ET LES ORGANISMES VIVANTS.

UNE PROTÉINE DÉFECTUEUSE NE REMPLIRA PAS SA FONCTION ET LES CELLULES MOURRONT.

LES CELLULES SONT INCROYABLES, ELLES FONT TELLEMENT DE CHOSSES DIFFÉRENTES...

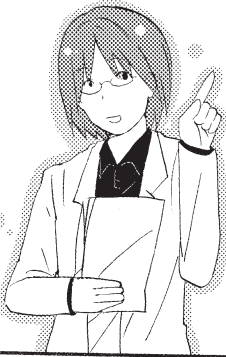
MAIS CONCRÈTEMENT, C'EST QUOI UNE PROTÉINE? ET COMMENT AGIT-ELLE?

AH, VOUS SEMBLEZ TRÈS INTÉRESSÉES! VOICI UN SUPER EXEMPLE.

LES ENZYMES, DES PROTÉINES PUISSANTES !

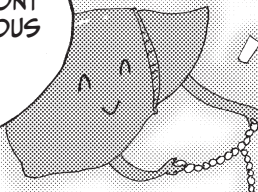
AMI ADORE LE RIZ. IL
CONTIENT DE L'AMIDON QUI
EST DÉCOMPOSÉ EN GLUCOSE
GRÂCE À DE NOMBREUSES
PROTÉINES SPÉCIALISÉES,
LES ENZYMES.

LE GLUCOSE FOURNIT
L'ÉNERGIE NÉCESSAIRE À LA VIE.
LES PLANTES LE STOCKENT
SOUS FORME D'AMIDON ET LES
ANIMAUX SOUS FORME DE GLYCOGÈNE.
DONC NOUS DIGÉRONS L'AMIDON ET
SYNTHÉTISONS LE GLYCOGÈNE.

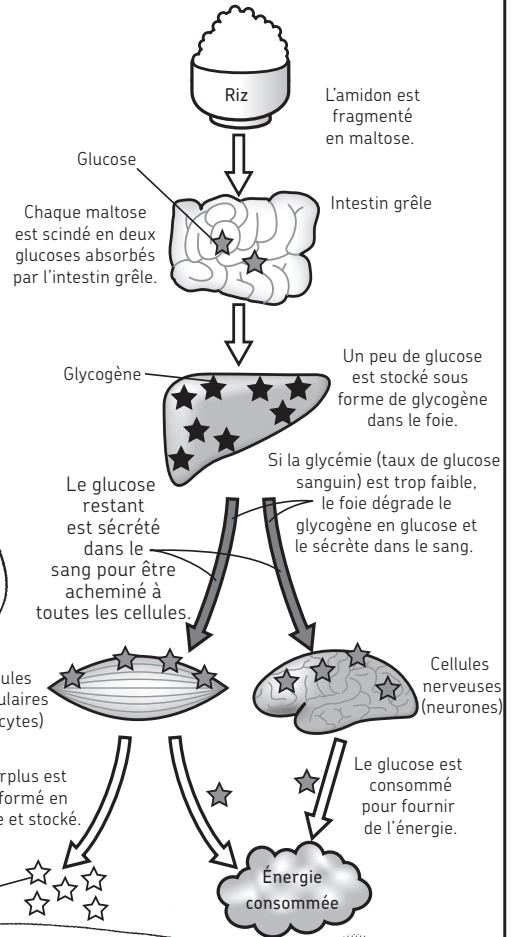


LES FÉCULENTS COMME LE RIZ,
LES PÂTES ET LE PAIN
CONTIENNENT DE L'AMIDON.
LORSQUE NOUS LE DIGÉRONS, IL EST
FRACTIONNÉ EN GLUCOSE QUI SERA
ENVOYÉ À TOUTES LES CELLULES.

LE FOIE A DE NOMBREUSES
FONCTIONS MÉTABOLIQUES, DONT
LE STOCKAGE DU GLUCOSE SOUS
FORME DE GLYCOGÈNE.
IL PEUT RÉGÉNÉRER CE
GLUCOSE SI BESOIN.



C'EST UNE PROTÉINE, LA
GLYCOGÈNE SYNTHASE,
QUI SYNTHÉTISE LE
GLYCOGÈNE À PARTIR
DU GLUCOSE.



UNE PARTIE DU GLUCOSE EST STOCKÉE
À COURT TERME DANS LE FOIE ET LES
MUSCLES SOUS FORME DE GLYCOGÈNE*.

L'EXCÉDENT EST TRANSFORMÉ EN
GRAISSE POUR UN STOCKAGE DE
LONGUE DURÉE.

RIZ

SAC DE
RIZ (5 KG)

GLUCOSE

GLYCOGÈNE

LE GLUCOSE, COMME LE RIZ CUIT,
SE CONSOMME TOUT DE SUITE.
LE GLYCOGÈNE EST COMME LE
SAC DE RIZ, STOCKÉ POUR UNE
CONSOMMATION ULTÉRIEURE.

LE GLUCOSE APPORTÉ PAR LE SANG EST
LA SOURCE D'ÉNERGIE DES ORGANES.

S'IL N'Y A PLUS ASSEZ DE GLUCOSE
SANGUIN, DES PROTÉINES VONT DÉGRADER
LE GLYCOGÈNE EN GLUCOSE, QUI SERA
DÉVERSÉ DANS LE SANG.

AHA

GLY... GLYCOGÈNE? GLO...
GLOCUSE?
GLY... GLYCOSE

OH NON, MARCUS!
LE CERVEAU D'AMI
DÉBORDE!

MINCE!

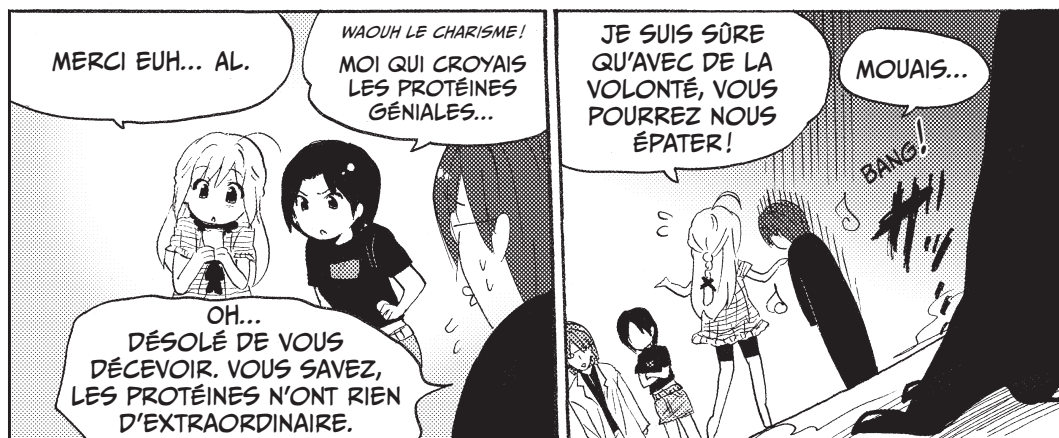
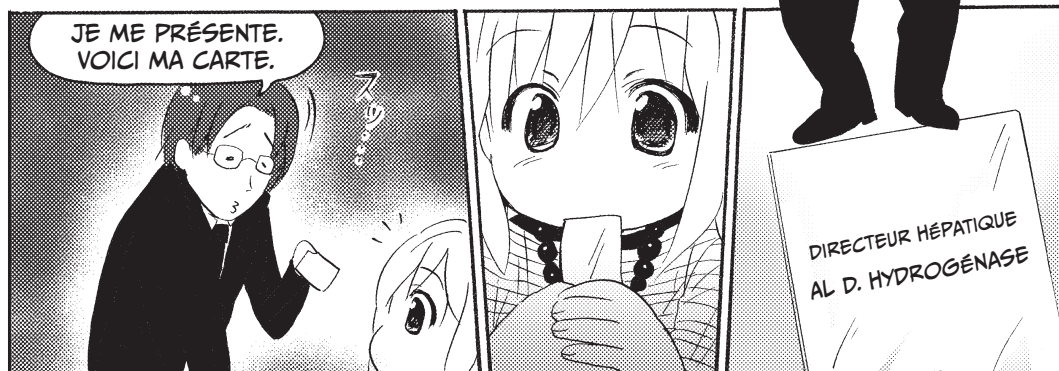
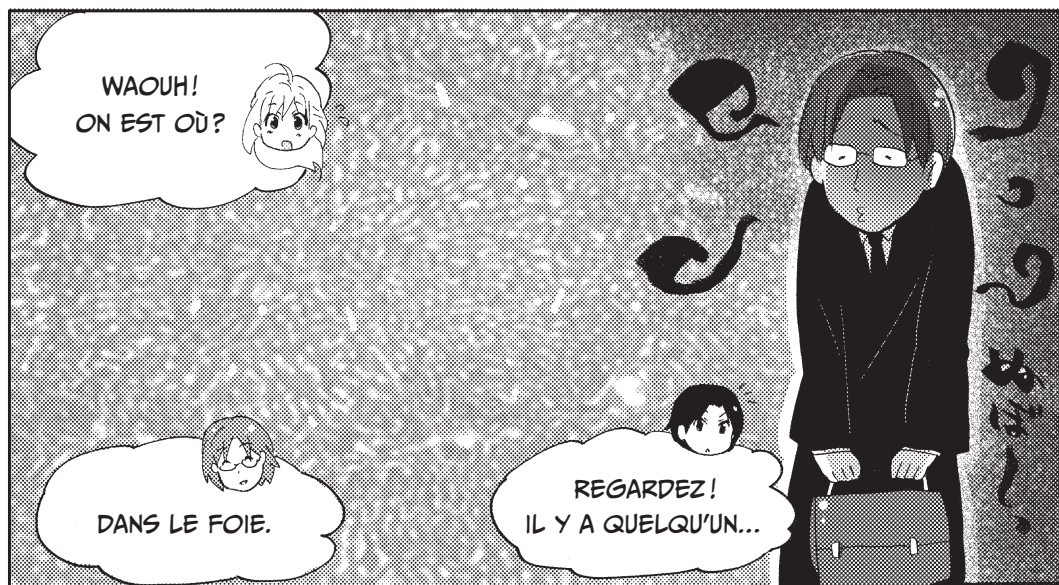
ARRÊTONS LE COURS ET
RETOURNONS DANS LA
DREAM MACHINE™
POUR ÉTUDIER LE
FONCTIONNEMENT DES
PROTÉINES.

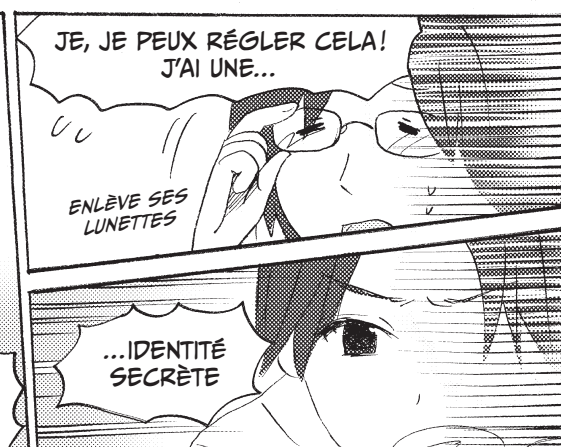
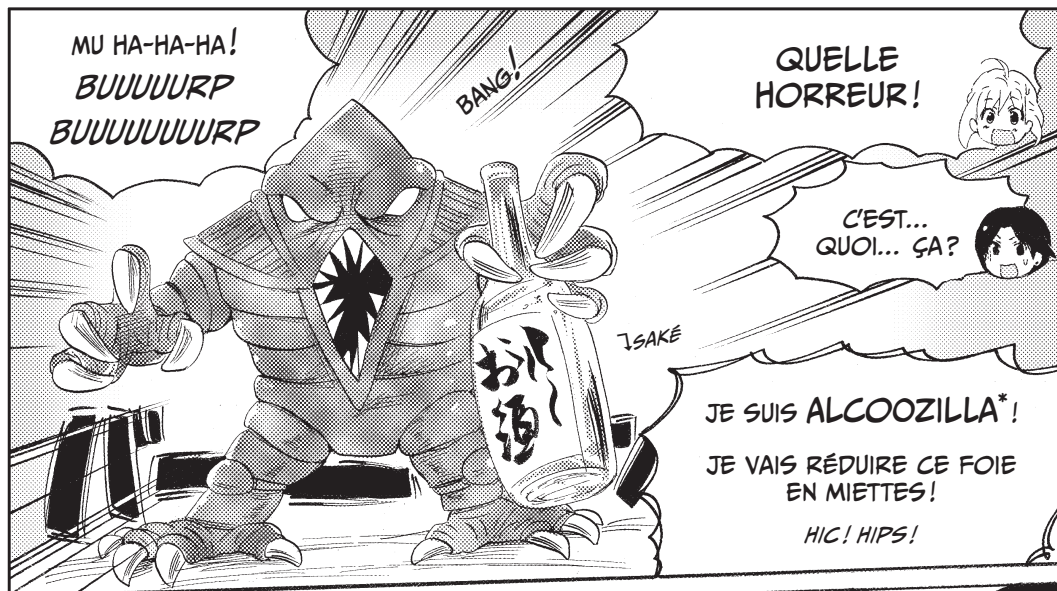
VITE, DU GLUCOSE
POUR SON
CERVEAU!

BANG!

MIAM!

* Nous pouvons stocker 500 g de glycogène, dont 75 % dans les muscles et 25 % dans le foie.





* Alcoozilla personifie l'alcool dans ce scénario.



QUAND UNE ENZYME SE LIE À SON SUBSTRAT CIBLE (ICI L'ALCOOL), ELLE SUBIT UN CHANGEMENT DE CONFORMATION (UNE MODIFICATION DE SA FORME) QUI ACTIVE SON POUVOIR SECRET!

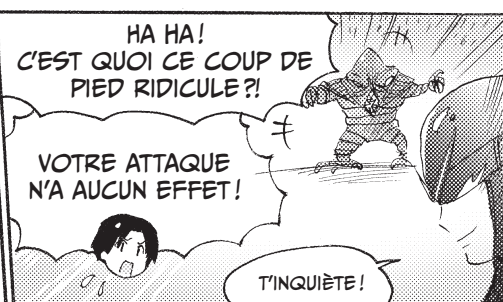
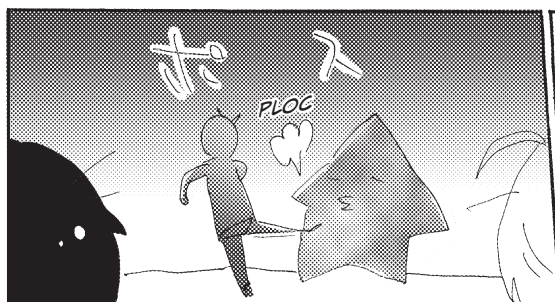
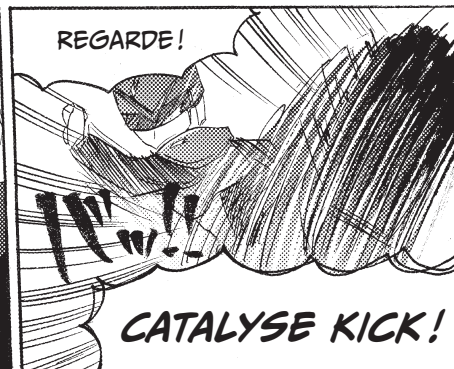
NON... UN TYPE AUSSI TERNE, QUELLE SURPRISE!

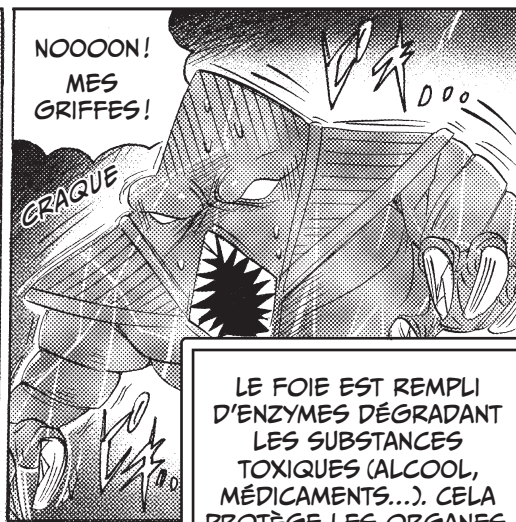
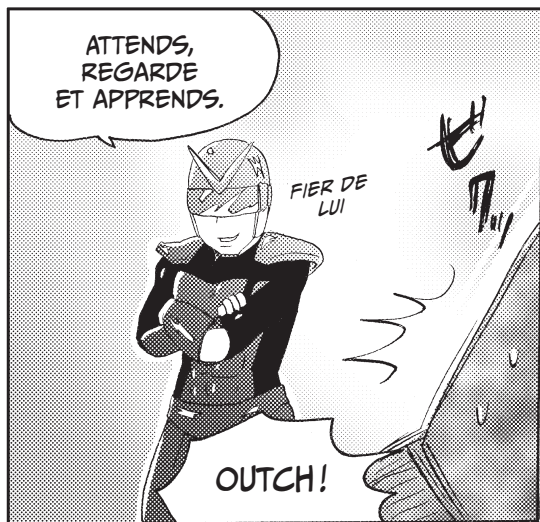


ET CE N'EST PAS UNE PROTÉINE ORDINAIRE.

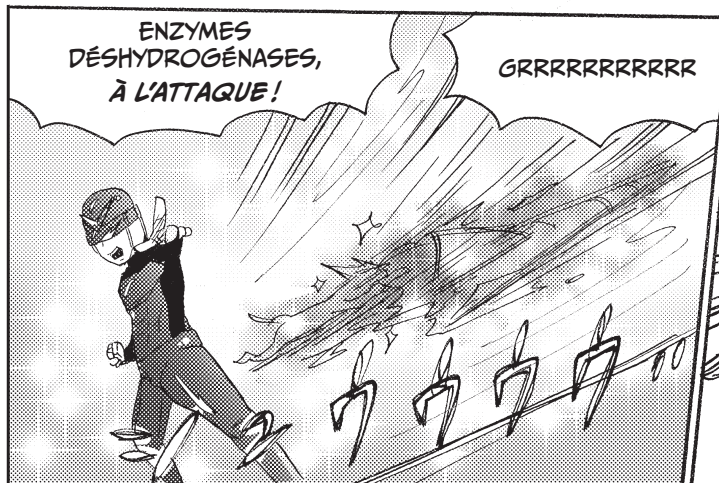
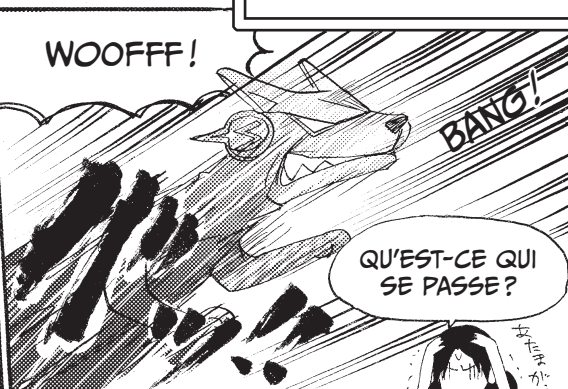
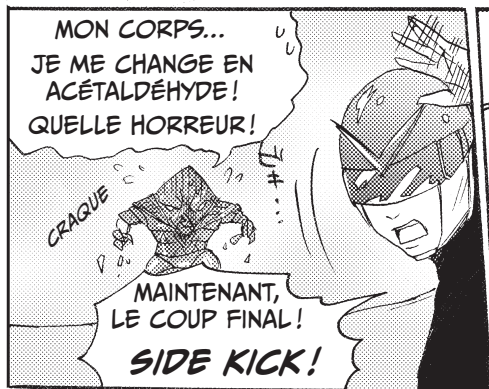
CE MEC?

C'EST UNE ENZYME, UNE MOLÉCULE QUI A LE POUVOIR D'ACCÉLÉRER LES RÉACTIONS BIOCHIMIQUES.





LE FOIE EST REMPLI D'ENZYMES DÉGRADANT LES SUBSTANCES TOXIQUES (ALCOOL, MÉDICAMENTS...). CELA PROTÈGE LES ORGANES.



CE QUI S'EST PASSÉ ?
LA 1^{RE} ENZYME DÉSHYDROGÉNASE
A TRANSFORMÉ L'ALCOOL
EN ACÉTALDÉHYDE,
TRANSFORMÉ PAR LA 2^E EN
ACIDE ACÉTIQUE (NON TOXIQUE).

VOICI LES RÉACTIONS
CHIMIQUES CATALYSÉES
PAR CES ENZYMES
PROTÉIQUES.



DÉTOXIFICATION DE
L'ALCOOL



ALCOOL

LA RESPIRATION ÉLIMINE 10 %
DE L'ALCOOL

CELL. DU FOIE

L'ALCOOL DÉSHYDROGÉNASE
RÉDUIT L'ALCOOL EN...

ACÉTALDÉHYDE

L'ACÉTALDÉHYDE
DÉSHYDROGÉNASE RÉDUIT
L'ACÉTALDÉHYDE EN...

ACIDE
ACÉTIQUE

LE MÉTABOLISME RÉDUIT
L'ACIDE ACÉTIQUE EN...

DIOXYDE DE CARBONE
ET EAU

OH, ET ALCOOZILLA
A ÉTÉ CHANGÉ EN
PETIT ANIMAL TROP
CHOUPIPOU!

PCHIT

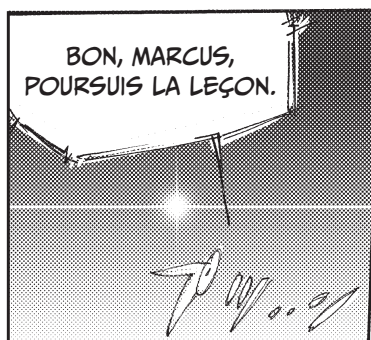
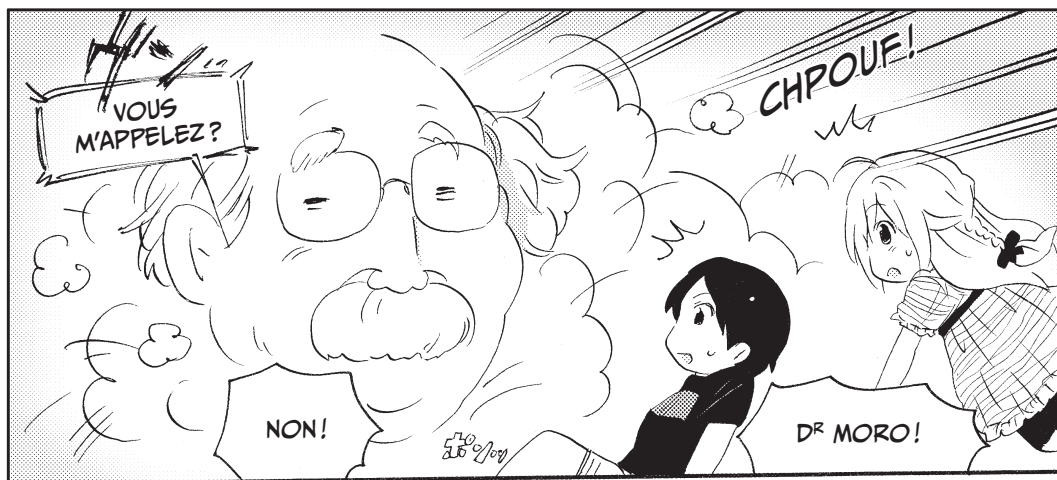
MERCI
ENZYMAN!

CE N'EST RIEN, J'AI
JUSTE RENDU SON
POUVOIR AU FOIE.
ADIEU!

LE FOIE EST SAIN ET SAUF...
POUR CETTE FOIS!

ENZYMAN,
VOUS ÊTES
LE MEILLEUR!

HÉ, STOP!
QUI A RACONTÉ
CETTE HISTOIRE?



LES PROTÉINES ENZYMATIQUES



L'organisme contient des dizaines de milliers de protéines différentes, qui peuvent être regroupées par familles. Avec EnzyMan, nous avons vu des exemples de protéines servant d'enzymes. Une enzyme permet, favorise ou accélère une réaction biochimique*. On la distingue des autres molécules participant à la réaction (celles consommées et celles produites) car l'enzyme se retrouve intacte à la fin de la réaction. Évidemment, elle interagit avec les autres molécules au cours des étapes intermédiaires, elle n'est pas qu'une simple spectatrice.

La biochimie (l'étude des réactions chimiques qui se produisent dans les organismes vivants) se cache derrière toute la physiologie : la digestion, l'absorption des nutriments, la coagulation sanguine, l'immunité, la réplication de l'ADN... Et chaque réaction nécessite une enzyme particulière.

Toutes les protéines ne sont pas des enzymes : nous étudierons dans quelques jours des protéines participant au système immunitaire en détruisant des bactéries. Ce ne sont pas des enzymes.

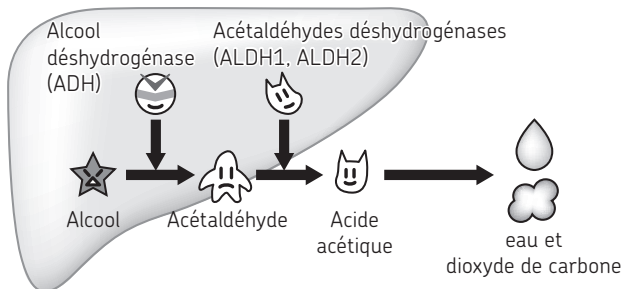


C'est pour cela que l'attaque d'EnzyMan s'appelait *Catalyse Kick* !



Les enzymes ont des noms compliqués et intimidants, mais on peut s'aider de leur fonction pour les mémoriser :

- Un nom se terminant par « -ase » indique une enzyme.
- Des enzymes ayant la même fonction ont un terme commun.
Par exemple, les deux attaques d'EnzyMan (*Catalyse Kick* et *Side Kick*) sont des déshydrogénases : elles éliminent des atomes d'hydrogène.
- La molécule ou la famille de molécules sur laquelle l'enzyme agit est indiquée : l'*alcool* déshydrogénase agit sur l'alcool et les *acétaldéhydes* déshydrogénases agissent sur... l'acétaldéhyde.
- Enfin, les enzymes classiques sont identifiées par un sigle. Par exemple, ALDH désigne les **Acé**ta**L**déhydes **Dés**Hydrogénases.



* En chimie, on parle de « catalyseur ». On utilise le terme « enzyme » dans le monde du vivant car elle sont produites dans l'organisme et participent au métabolisme cellulaire.



Cette nomenclature permet de distinguer les innombrables enzymes : n'oubliez pas que chaque réaction biochimique exploite une enzyme spécifique !

LE RÔLE DES PROTÉINES DANS LA DIVISION CELLULAIRE

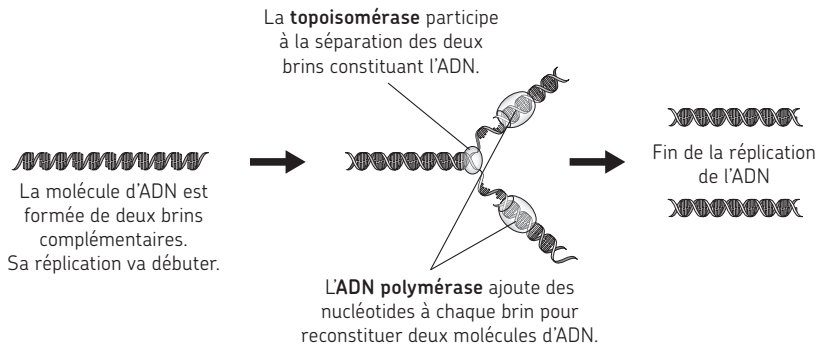


Nous avons tous commencé sous la forme d'un œuf (ovule fécondé par un spermatozoïde). Cette cellule s'est divisée en deux cellules, qui se sont elles-mêmes scindées en deux... jusqu'à former un organisme complet, possédant un nombre incalculable de cellules.

La division d'une cellule en deux cellules identiques est la *division cellulaire*. Elle comprend 3 étapes principales qui font appel à des protéines :

- la cellule duplique son contenu (organites et ADN). La copie (*réplication*) de l'ADN est initiée par une enzyme ;
- les microtubules (protéines structurales maintenant la forme de la cellule) vont tracter une copie de chaque ADN aux deux pôles (« extrémités ») de la cellule ;
- des filaments d'actine (autre protéine structurale) vont pincer la membrane plasmique à la manière d'une ceinture jusqu'à couper la cellule en deux, chaque exemplaire ayant alors ses organites au complet et le même ADN.

La figure suivante illustre le fonctionnement de deux enzymes intervenant dans la réplication de l'ADN.



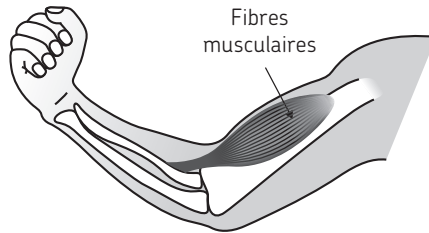
LA CONTRACTION MUSCULAIRE UTILISE DES PROTÉINES



Marcus, si on trouve des protéines partout, il doit y en avoir dans les cellules des muscles, non ?



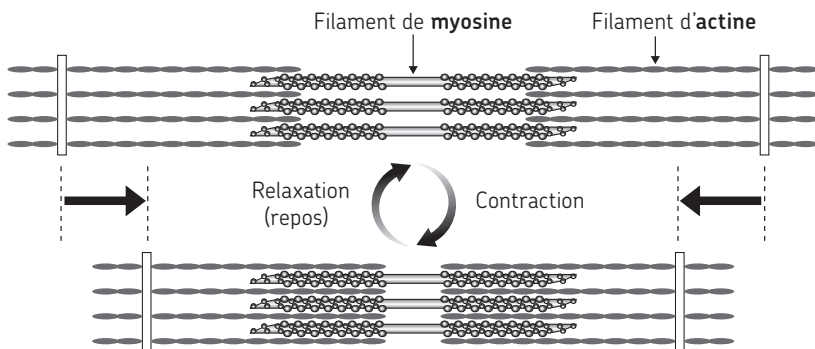
Tu as saisi l'importance des protéines ! En passant, je vous rappelle que le terme « cellule » est très général. Chaque type possède un nom : les hépatocytes sont les cellules du foie, les neurones font partie des cellules du système nerveux, etc. Les cellules musculaires s'appellent des *fibres musculaires*. C'est en lien avec leur structure.



Les muscles sont formés de faisceaux de fibres musculaires formés de filaments longs et fins :

- les *filaments d'actine*, formés de protéines appelées... **actine** !
- les *filaments de myosine*, formés de **myosine**, une autre protéine.

La contraction d'un muscle est réalisée par le glissement des filaments les uns contre les autres.





Donc quand je contracte un muscle, c'est uniquement parce que des protéines, qui sont de simples molécules, arrivent à se tracter les unes les autres ! Waouh ! Et dire qu'EnzyMan est une protéine ! Il faut dire qu'il est tellement super...



Mais c'est pas possible ! Il y a quelque chose entre EnzyMan et toi ?



Non Ami, cette fois Enzyman n'y est pour rien : ces protéines ne sont pas des enzymes ! On les dessine souvent à plat, mais elles possèdent toutes une structure en trois dimensions. C'est d'ailleurs elle qui permet à la protéine d'agir. Le glissement des actines et des myosines est un processus biochimique complexe où le changement de conformation de ces protéines permet aux unes de s'accrocher aux autres.

D'ailleurs, cela pourrait être l'occasion d'un cours entier et passionnant !



Ça, c'est sûr ! Hum... Quel dommage que ce ne soit pas au programme du cours de rattrapage.



Ah, je savais que vous trouveriez cela passionnant. Voulez-vous que...



NON !



RÉSUMÉ

Euh... Bon, nous allons terminer en résumant tout ce que nous avons vu sur les protéines. (Ça reste un sujet passionnant sur lequel je pourrais parler pendant des jours.)

Le corps contient des centaines de familles de protéines. Ce sont de simples molécules, mais chacune a un rôle spécifique dans la vie et le fonctionnement des cellules et des organes. La diversité de ces fonctions est stupéfiante !

Par exemple :

- on appelle enzyme toute protéine contrôlant une réaction biochimique ;
- des protéines permettent la contraction des muscles, d'autres sont en charge de plusieurs étapes de la division cellulaire...
- le collagène est la protéine la plus abondante du corps humain (25 % des protéines). Principalement présent dans la peau, le cartilage, les tendons et les ligaments, il assure la cohésion, l'élasticité et la régénération de ces tissus ;
- les hormones (par exemple l'insuline) assurent l'homéostasie ;
- les immunoglobulines défendent l'organisme contre les virus et les bactéries.



Jusqu'à présent, vous avez expliqué que les protéines sont des molécules qui réalisent des fonctions variées. Mais les glucides et les lipides effectuent également des tâches spécifiques. Alors, face à une molécule, comment savoir si c'est une protéine, alors que c'est la première étape pour découvrir sa fonction ?



J'attendais cette question avec impatience !

La réponse est simple : c'est la structure de la molécule qui détermine sa nature (glucidique, lipidique ou protéique). Vous vous souvenez de mon cours d'hier sur les cellules donnant les tissus puis les organes puis le corps ?



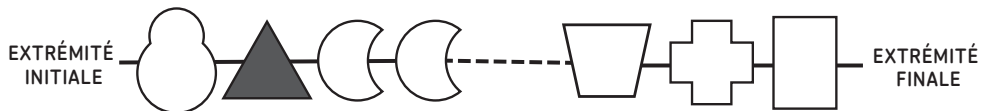
Heu... Rin s'en souvient forcément !



Ami, n'oublie pas que l'examen de rattrapage sera *individuel* !

Bon, une protéine est simple à identifier : entre ses deux extrémités, il y a une dizaine à des milliers de molécules similaires (les *acides aminés*) reliées. Il existe 20 acides aminés différents.

Deux protéines se distinguent donc par l'ordre et la nature de leurs acides aminés.



Les protéines sont une chaîne d'acides aminés



Donc les protéines sont toutes différentes, mais organisées selon un type « spécial protéine » qui va les identifier, et même chose pour les glucides et les lipides.

C'est exactement ça Ami, bravo !



Notre molécule d'ADN très longue, et d'une importance capitale, n'est pas une protéine. Elle est cependant construite sur le même modèle : une suite de molécules appelées *nucléotides* (il en existe 4 sortes). Et, comme pour les protéines, c'est l'ordre dans lequel sont les nucléotides qui compte.



L'ADN est une chaîne de nucléotides.

Ils sont identiques sur ce schéma, mais il en existe 4 différents.

(Au lieu de 20 acides aminés pour les protéines.)

C'est l'ordre des nucléotides qui porte l'information génétique.

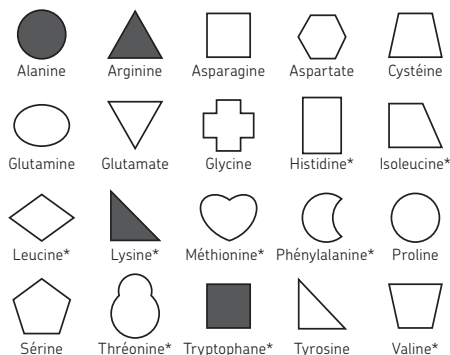


Eh bien !

LES PROTÉINES SONT FAITES D'ACIDES AMINÉS



Voici la liste des 20 acides aminés utilisés pour assembler les protéines.
(Les dessins sont fantaisistes.)



L'ÉTOILE INDIQUE
UN ACIDE AMINÉ
ESSENTIEL.



Attention, un acide aminé n'est pas *essentiel* au sens où les autres seraient facultatifs. Sur les 20 acides aminés (tous indispensables pour assembler les protéines), l'organisme sait en synthétiser onze. Il est donc **essentiel** d'obtenir les neuf autres par l'alimentation.



Marcus, le glutamate de sodium a-t-il un rapport avec l'acide aminé *glutamate* ? J'adore cet additif alimentaire, il rend ma nourriture délicieuse* !



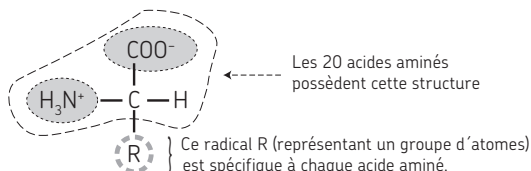
Tu as raison Ami. Le glutamate de sodium est formé de glutamate. Cet acide aminé a deux rôles cruciaux totalement indépendants. D'une part, c'est un constituant des protéines comme tous les acides aminés. D'autre part, c'est une molécule de communication entre de nombreux nerfs et neurones du système nerveux.



Oui, enfin n'oublions pas son troisième rôle crucial, être à la base du glutamate de sodium !



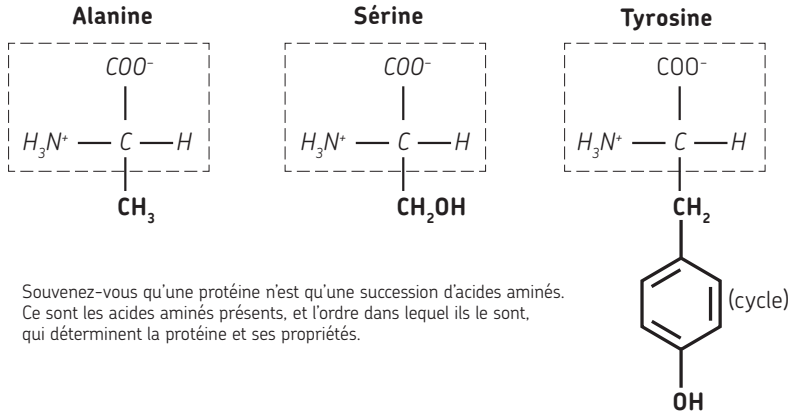
Mouai, bon... il est temps que je vous parle de la structure des acides aminés. En fait, tous ont une structure commune. Ils ne se distinguent que par un radical (une suite d'atomes) lié au carbone central. Regardez ce schéma.



(C, O, H et N représentent les atomes de carbone, oxygène, hydrogène et azote.)

* Au début du ^{xx}e siècle, le Japonais Ikeda a établi que le glutamate de sodium apportait une nouvelle saveur, l'*umami*, qui s'ajoute aux classiques sucré, amer, acide et salé.

Les radicaux sont très variables : on peut aller d'un simple atome d'hydrogène (glycine) à deux cycles (tryptophane). Voici trois exemples. Comme prévu, le carbone central forme toujours 3 liaisons identiques : avec COO^- , H_3N^+ et H . Seule la dernière liaison diffère et identifie l'acide aminé.



Souvenez-vous qu'une protéine n'est qu'une succession d'acides aminés. Ce sont les acides aminés présents, et l'ordre dans lequel ils le sont, qui déterminent la protéine et ses propriétés.



Cela va vous sembler sans rapport mais, à votre avis, pourquoi le sang humain est-il rouge ?



C'est simple ! Notre sang est de la couleur de la flamme rouge de la justice... Comme EnzyMan brûle de passion à l'idée de faire le bien !



Hum... Ça ne peut pas être ça.



Non, effectivement. C'est parce que le sang contient un pigment rouge, l'*hémoglobine*. Les globules rouges ont une fonction très importante : ils apportent à toutes les cellules du corps l'oxygène O_2 dont elles ont besoin pour produire de l'énergie. Les globules rouges sont remplis de molécules d'hémoglobine auxquelles l'oxygène se fixe.

Les globules rouges transportent aussi le dioxyde de carbone CO_2 qui est un déchet métabolique des cellules.

L'hémoglobine est rouge brillant car elle contient beaucoup de fer.



Mais pourquoi parlez-vous subitement du sang ? Cela n'a aucun rapport avec les protéines !

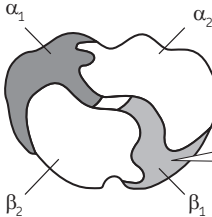


Si, si ! En fait, l'hémoglobine est constituée d'une globine, qui est une protéine. Elle est formée de 4 sous-unités protéiques : 2 notées α et 2 notées β .

ACIDE AMINÉ MODIFIÉ → PROTÉINE BOULEVERSEE



La globine contient donc quatre sous-unités protéiques : deux α identiques et deux β identiques. Chacune est formée d'une séquence d'acides aminés liés dans un ordre spécifique. (Les α diffèrent évidemment des β .)

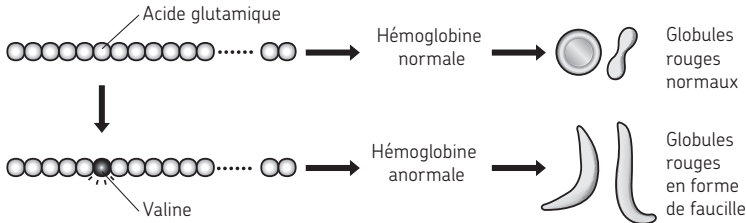


La globine est une protéine contenant quatre sous-unités protéiques : 2 unités α et 2 β .

.....
Chaque sous-unité contient environ 150 acides aminés qui se suivent dans un ordre précis.

Le changement d'un acide aminé entraîne des conséquences variables : il peut n'avoir aucun effet, rendre la protéine moins efficace, jusqu'à causer une maladie mortelle. (Tous les échelons de gravité intermédiaires existent.)

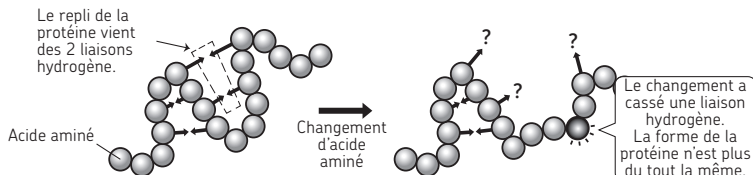
Prenons un exemple classique. Voici ce qui se passe quand l'acide glutamique, 6^e acide aminé de la sous-unité β , est remplacé par une valine.



Comment expliquer que le changement de deux acides aminés sur la globine (un changement par chaîne β) ait une telle conséquence sur le globule rouge ?*

En fait, l'écriture des acides aminés sous forme de chaîne est trompeuse. En effet, les atomes des acides aminés agissent sur les autres (forces électrostatiques, liaisons hydrogène, caractère hydro-phile ou -phobe, etc.).

Bref, certaines parties de la protéine se repoussent et d'autres s'attirent. La protéine acquiert alors une forme tridimensionnelle stable, et c'est elle qui la rend fonctionnelle. Si le changement d'un seul acide aminé modifie sa forme, il altère en même temps son fonctionnement !



* La mutation présentée donne une maladie de la famille des thalassémies.

GÈNE : PLAN DE CONSTRUCTION D'UNE PROTÉINE

COMMENT LA CELLULE SAIT-ELLE QUELLE PROTÉINE CRÉER ?



OUI, MAIS COMMENT L'ORGANISME PEUT-IL RÉALISER À CHAQUE FOIS LE BON ARRANGEMENT D'ACIDES AMINÉS ?

IL NE FAIT JAMAIS D'ERREUR, COMME CRÉER LA MAUVAISE PROTÉINE ?

BONNE QUESTION !

GRAND SOURIRE

COMMENT FÉRIEZ-VOUS POUR ÉVITER UNE ERREUR ?

J'ÉCRIRAIS LES INSTRUCTIONS ET JE LES COLLERAI SUR LE MUR !

JE DÉSIGNERAI UN RESPONSABLE POUR CHAQUE ACIDE AMINÉ ET LUI SEUL SERAIT AUTORISÉ À L'AJOUTER.

JE ME CHARGE DE L'ACIDE AMINÉ A !

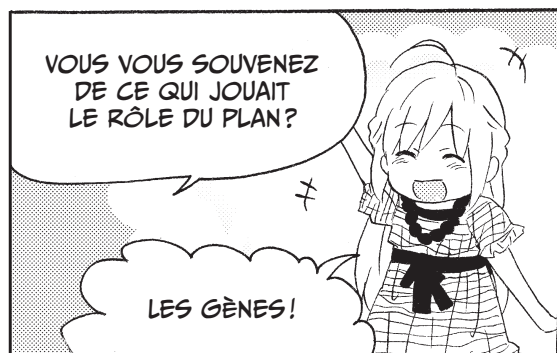
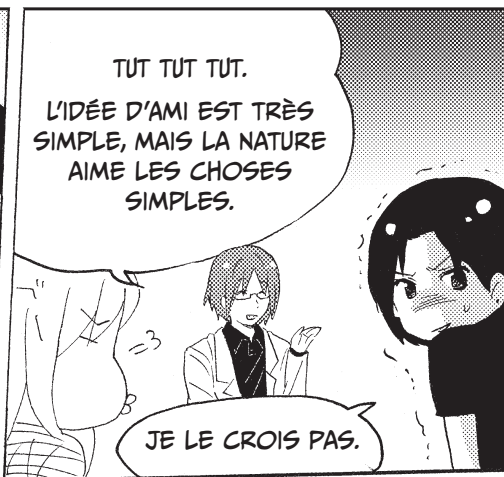
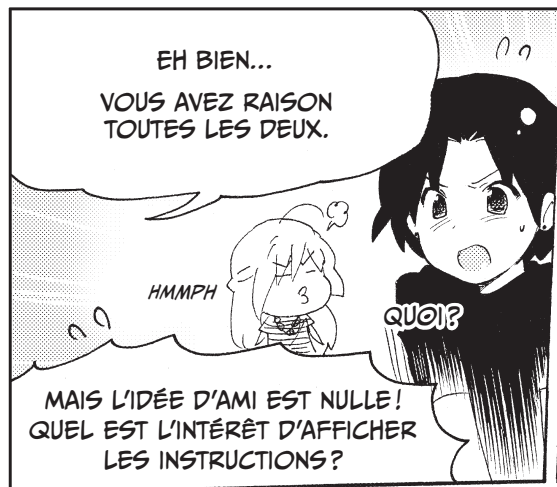
ACIDE AMINÉ

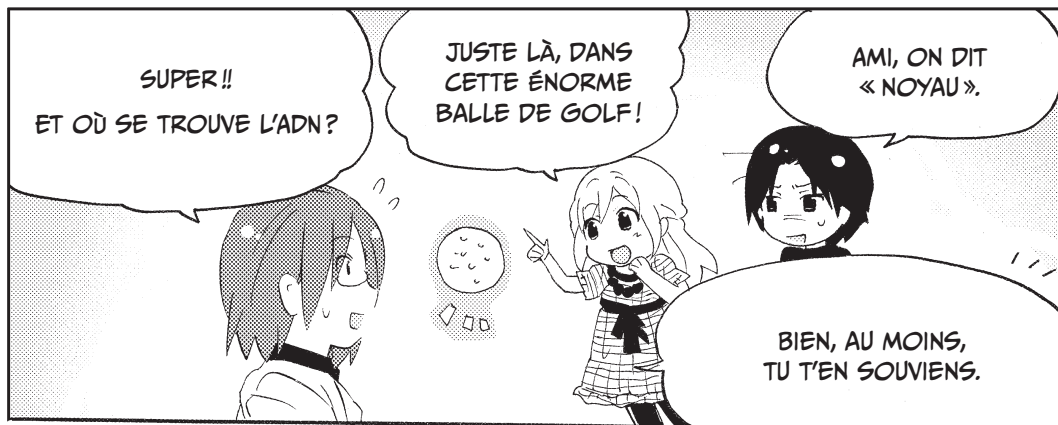
A

ACIDE AMINÉ

B

ET MOI, JE M'OCCUPE DU B !





VOUS VOYEZ,
LES INSTRUCTIONS CONTENANT
LA BONNE SÉQUENCE D'ACIDES
AMINÉS, LES « PLANS », CE SONT
LES GÈNES CONTENUS
DANS L'ADN.*

AINSI, LA SÉQUENCE
D'ACIDES AMINÉS DE LA
PROTÉINE A EST STOCKÉE
DANS LE GÈNE A.
ET COMME L'A DIT AMI,
LES GÈNES SONT DANS
LE NOYAU.

La séquence d'acides aminés de la
protéine A est écrite ici.

ADN

Par définition, on parle du gène A
pour la séquence de la protéine A.

* Une molécule d'ADN contient de nombreux gènes écrits à la suite.

LES GÈNES SONT CODÉS

ÉVIDEMMENT, LA SÉQUENCE
STOCKÉE DANS L'ADN N'EST PAS
ÉCRITE EN FRANÇAIS, MAIS...

EN ANGLAIS,
LANGUE
UNIVERSELLE?

NON, PAS EN
ANGLAIS NON
PLUS.

C'EST ÉCRIT EN CODE GÉNÉTIQUE!

UN CODE?

L'ADN N'EST PAS FORMÉ D'ACIDES AMINÉS COMME LES PROTÉINES.

Protéine

ADN

Acide aminé

Ce ne sont pas des acides aminés !

L'ADN CODE LES GÈNES AVEC DES MOLÉCULES PARTICULIÈRES APPELÉES NUCLEOTIDES.

C'EST COMME SI L'ADN AVAIT SON PROPRE ALPHABET.

ADN (ALPHABET SPÉCIFIQUE)

TRADUCTION DE L'ARN_m

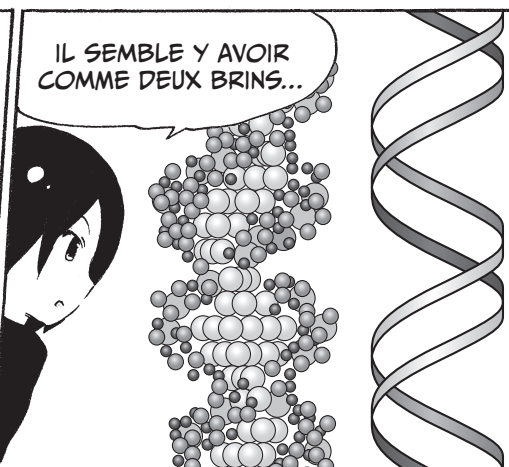
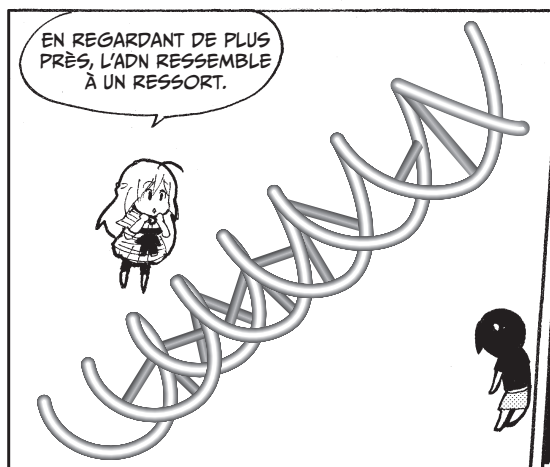
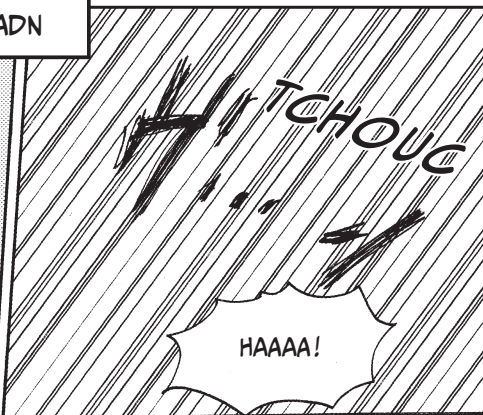
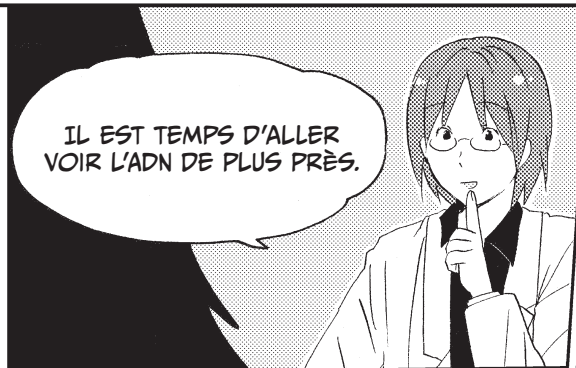
SÉQUENCE D'ACIDES AMINÉS

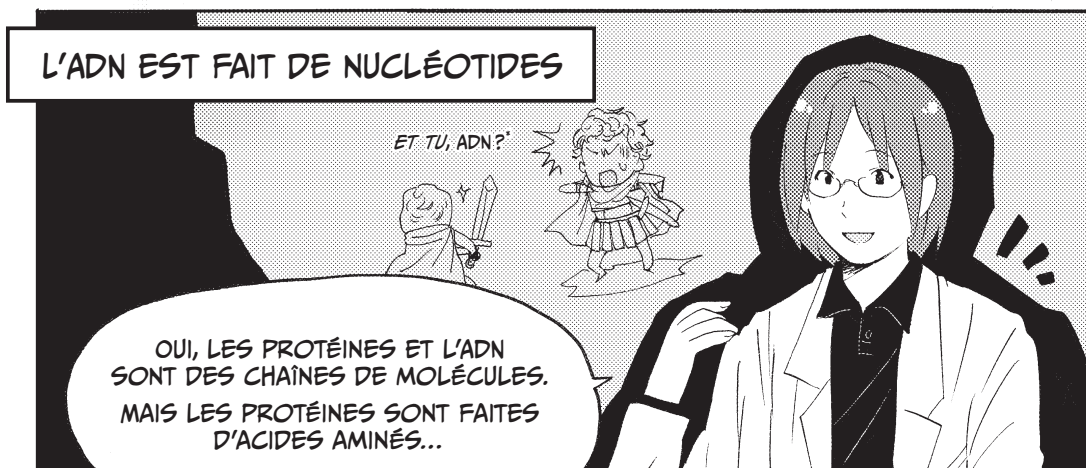
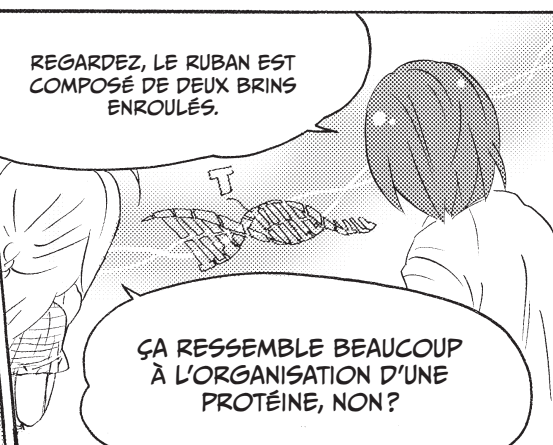
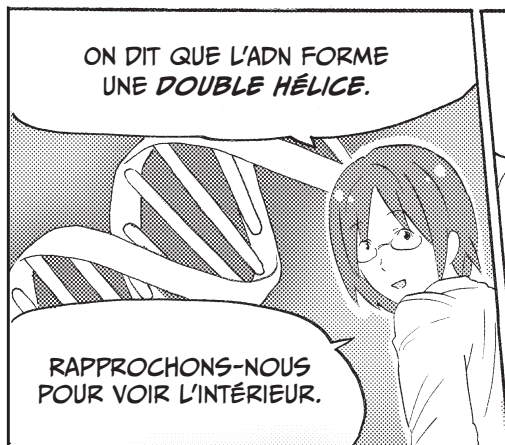
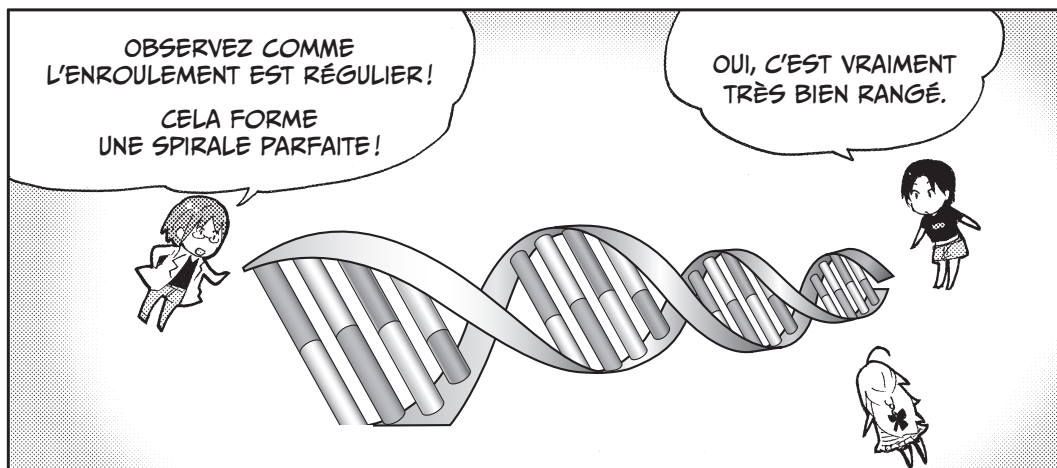
LE RIBOSOME TRADUIT L'ARN_m EN UNE SÉQUENCE D'ACIDES AMINÉS QUI FORMERA LA PROTÉINE.

CE N'EST QU'UNE APPROCHE, NOUS ÉTUDIERONS CELA DANS QUELQUES JOURS.

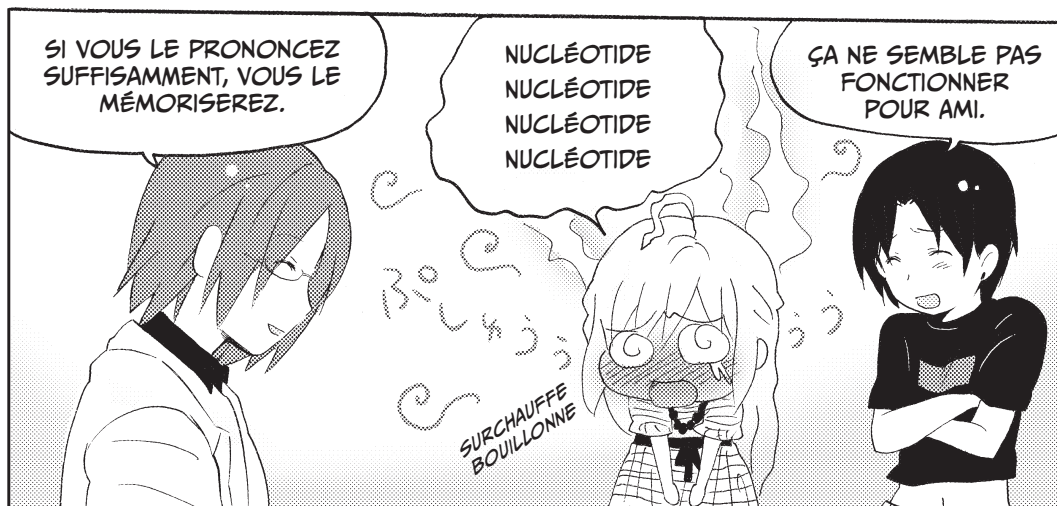
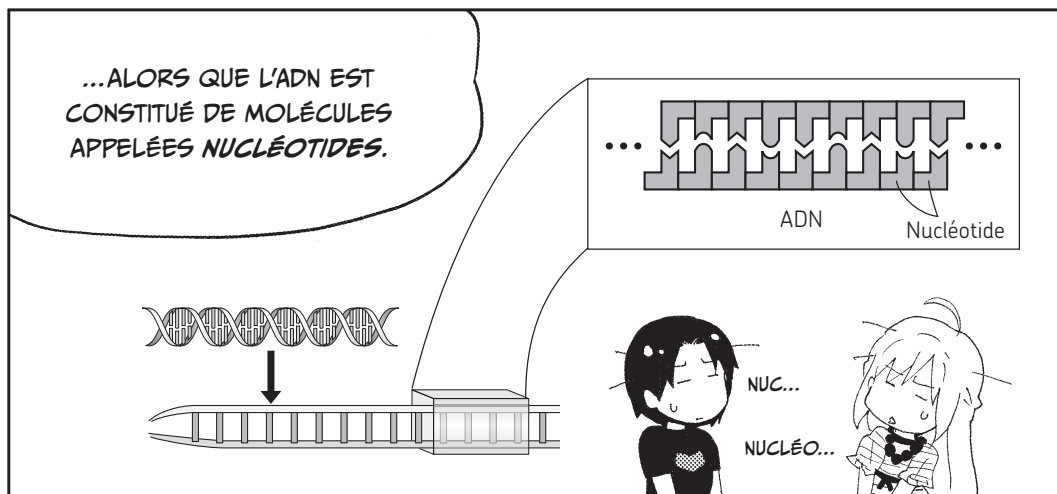
ADN ET NUCLÉOTIDES

LA « STRUCTURE EN DOUBLE HÉLICE » DE L'ADN





* Clin d'œil à la réplique *Et tu, Brute?* (« Toi aussi, Brutus? ») issue de *Jules César* de Shakespeare, prononcée par César au moment de...



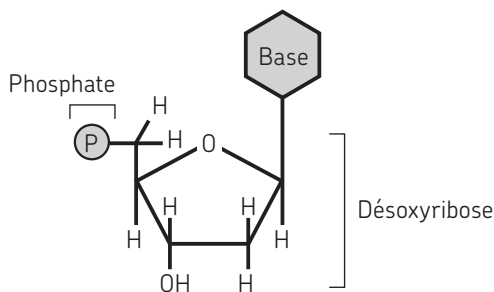
...son assassinat en reconnaissant son ami Brutus parmi les assaillants.

* *Désoxyribo* car le nucléotide de l'ADN utilise le sucre désoxyribose.

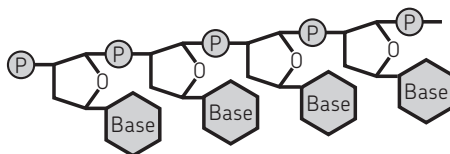
LES NUCLÉOTIDES SONT L'ALPHABET DU CODE GÉNÉTIQUE



VOICI LA STRUCTURE D'UN NUCLÉOTIDE.



Un nucléotide



ADN

ALORS L'ADN
RESSEMBLE
À ÇA...

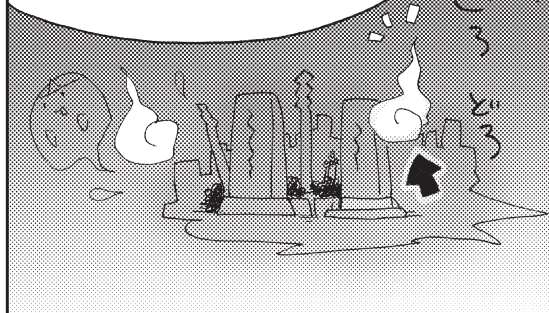


UN NUCLÉOTIDE EST
FORMÉ DE TROIS
PARTIES,

UN PHOSPHATE,
UN DÉSOXYRIBOSE
ET UNE BASE.



LE PHOSPHATE EST CONSTITUÉ
D'UN ATOME DE PHOSPHORE
ENTOURÉ DE QUATRE ATOMES
D'OXYGÈNE.



DÉSOXYRIBOSE ET GLUCOSE
SONT DES GLUCIDES.
SEUL CE DERNIER POSSÈDE
UNE SAVEUR SUCRÉE.



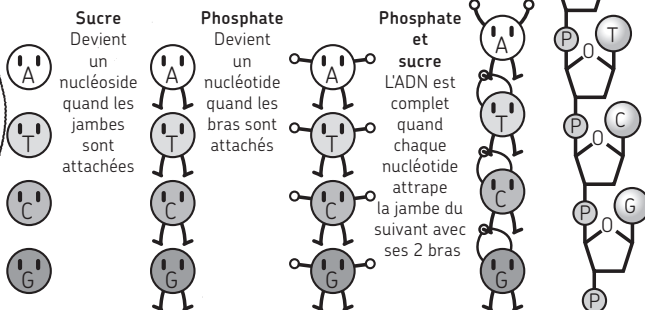
EN CHIMIE, ON UTILISE
LE TERME *GLUCIDE* PLUTÔT
QUE *SUCRE* POUR ÉVITER
LES AMBIGUITÉS.

VOYEZ LES NUCLÉOTIDES
COMME DES BONSHOMMES :

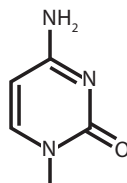
LA BASE EST LA TÊTE,
LE DÉSOXYRIBOSE LES JAMBES,
LE PHOSPHATE LES BRAS.

POUR FORMER L'ADN,
CHACUN ATTRAPE
LA JAMBE DU SUIVANT.

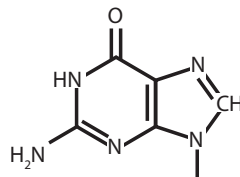
Base → Nucléoside → Nucléotide → ADN



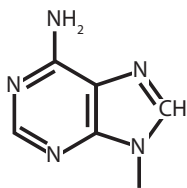
LA BASE D'UN NUCLÉOTIDE
NE PEUT ÊTRE QUE L'UNE
DES QUATRE MOLÉCULES
SUIVANTES...



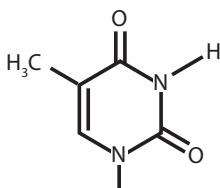
Cytosine (C)



Guanine (G)



Adénine (A)



Thymine (T)

...ADÉNINE, THYMINE, CYTOSINE
ET GUANINE, QUE L'ON ABRÈGE
RESPECTIVEMENT A, T, C ET G.

LA BASE EST L'ÉLÉMENT
PRINCIPAL DU NUCLÉOTIDE.

L'ADN EST UNE LONGUE SUITE
DE NUCLÉOTIDES RELIÉS DANS
UN ORDRE PRÉCIS QUI CODENT
LES GÈNES.

ÇA ME RAPPELLE
QUELQUE CHOSE.

MOI AUSSI, C'EST
UN PEU COMME
LES PROTÉINES.

OUI, UNE PROTÉINE
EST AUSSI UNE
CHAÎNE DE
MOLÉCULES, LES
ACIDES AMINÉS.

LES PROTÉINES ET L'ADN SONT DES **POLYMÈRES***, C'EST-À-DIRE UNE SUITE D'UNITÉS APPELÉES **MONOMÈRES***.

NOUS SAVONS QUE L'ORDRE DES MONOMÈRES (ACIDES AMINÉS POUR LES PROTÉINES, NUCLÉOTIDES POUR L'ADN) EST CRUCIAL POUR CES MOLÉCULES...



...ET DONC POUR LEUR FONCTION.

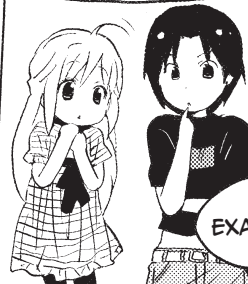


J'AI COMPRIS!
CE SONT LES 4 BASES
A, T, C ET G!

L'ORDRE DES ACIDES AMINÉS
EST STOCKÉ DANS L'ADN
EN UTILISANT UN ALPHABET
SPÉCIFIQUE DE QUATRE LETTRES.
QUI SONT... QUI SONT?



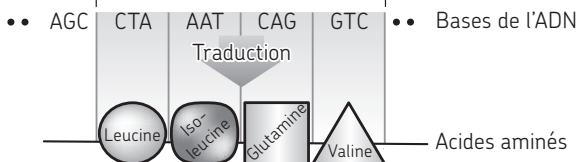
EXACTEMENT!



L'ORDRE DES
BASES DE L'ARN...

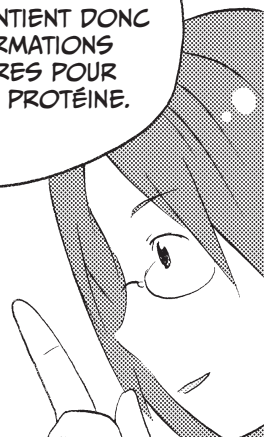
1 codon (groupe de 3 bases consécutives) détermine un acide aminé unique.

Gène

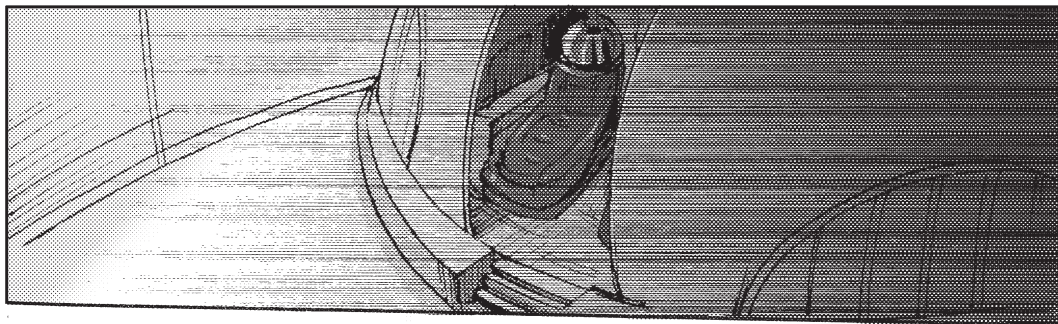


...DÉTERMINE CELUI DES
ACIDES AMINÉS DANS LA
PROTÉINE.

UN GÈNE CONTIENT DONC
LES INFORMATIONS
NÉCESSAIRES POUR
CRÉER UNE PROTÉINE.



* Poly- pour « plusieurs », Mono- pour « seul » et -mère pour « partie ».



AH D'ACCORD!
JE ME DEMANDAIS
JUSTEMENT COMMENT ON
PASSAIT DES GÈNES AUX
ACIDES AMINÉS.

RIN, TU COMMENCES
À COMPRENDRE.

ET AMI?
POURQUOI ELLE
COMMENCERAIT PAS
À COMPRENDRE
AUSSI?

TU AS RAISON AMI,^u
JE SUIS SÛR QUE
TU AS RETENU DES
CHOSSES, NON?

NUCLÉITODE
AH! **ACIDE ANIMÉ** AH!
AH! **PROUTÉINE**

にゃ **GACK**

EN EFFET, JE RECONNAIS
QUE TU ES PRESQUE AU
POINT SUR CERTAINES
CHOSSES.

RIN N'A QU'UN PEU D'AVANCE,
C'EST TOUT.

LE DR MORO SERA
CONTENT, ELLES
TRAVAILLENT DUR
TOUTES LES DEUX.

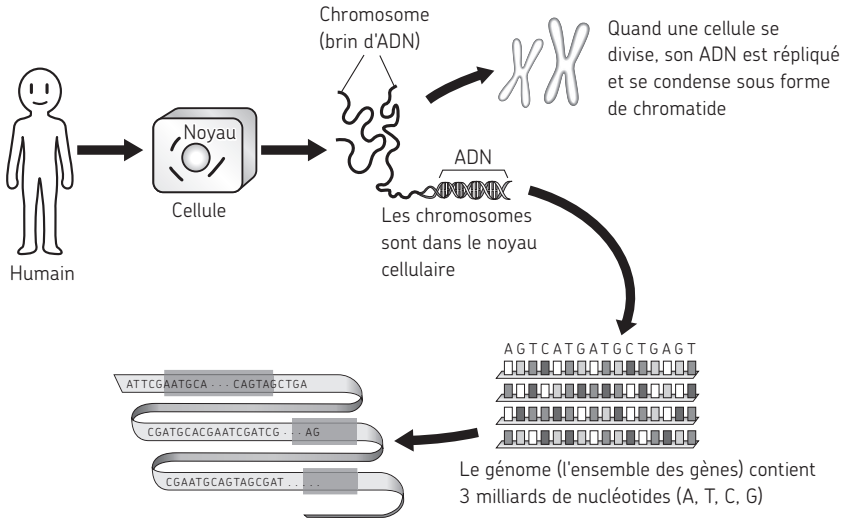
PRENDS ÇA!

AIE!

LE GÉNOME ET LES GÈNES



Le **génome** est l'ensemble des gènes d'un individu, donc tous les gènes de l'ADN contenu dans un noyau cellulaire (toutes les cellules possèdent le même ADN).



■ représente un gène. Notre ADN en contient 20 000.

Un gène contient 3 000 nucléotides en moyenne. Le record est le gène codant la protéine *distrophine* : il est composé de 2,4 millions de nucléotides !

Le *Projet génome humain*, commencé en 1990 et achevé en 2003, a séquencé l'intégralité des bases d'un ADN et identifié tous ses gènes. Il aura duré 13 ans et coûté 3 milliards de dollars.

Aujourd'hui, on séquence son ADN en quelques heures pour 500 euros.

Connaître les gènes d'un ADN est une avancée médicale majeure. Par exemple :

1. La mutation de certains gènes entraîne une susceptibilité à des maladies. Ainsi, des cancers du sein héréditaires sont dus à des mutations sur les gènes BRCA 1 et 2*. Elles entraînent un risque de 80 % de cancer du sein très agressif dès 30 ans. Savoir que l'on est porteuse de ces mutations permet d'anticiper (mastectomie bilatérale ou surveillance renforcée). Le docteur Moro vous parlera de la médecine basée sur les gènes lors de la dernière leçon.
2. Certains traitements contre le cancer d'un organe donné ne sont efficaces que si les cellules cancéreuses sont porteuses d'une mutation précise. En analysant le génome de la tumeur, on évitera d'infliger un traitement lourd et inutile si le cancer est dépourvu de la mutation.

* BRCA 1 et 2 pour *BReast cancer 1 and 2*, soit « gènes 1 et 2 du cancer du sein ».

CHROMOSOMES, GÈNES ET REPRODUCTION

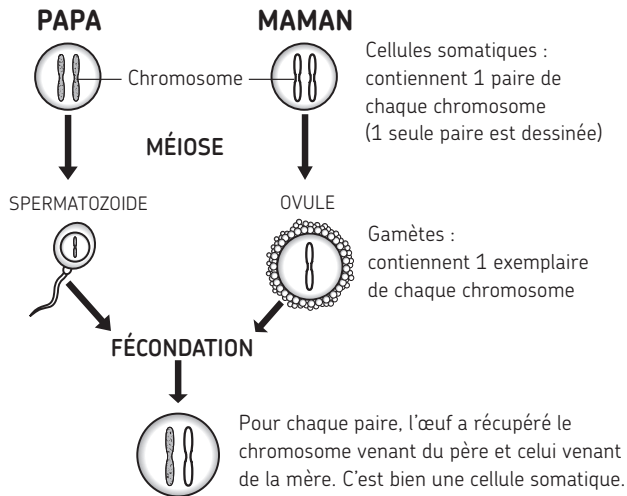


Les cellules sexuelles (ovule et spermatozoïde) sont appelées des **gamètes**. Toutes les autres cellules du corps sont des cellules **somatiques**.

Chaque cellule humaine somatique possède 46 chromosomes* regroupés en 23 paires. Dans chaque paire, l'un est hérité de la mère (depuis l'ovule), l'autre du père (via le spermatozoïde).

Les gamètes humaines n'ont qu'un exemplaire de chaque chromosome, soit 23 chromosomes chacune. La fusion de deux gamètes donnera bien une cellule somatique avec 23 paires.

Pour fabriquer les gamètes, on part d'une cellule somatique (23 paires) et on la divise (ADN inclus) pour obtenir deux cellules sexuelles ne contenant que 23 chromosomes (1 de chaque paire). Ce mécanisme s'appelle la **méiose**.



On peut imaginer le génome comme une petite bibliothèque de 46 livres contenant des nouvelles. Chaque livre est un chromosome et chaque nouvelle est un gène donnant la recette de fabrication d'une protéine.

Ce qui précède donne l'impression que l'ADN est une suite de gènes qui se succèdent comme les voitures d'un train. Ce n'est pas le cas : entre les gènes, il y a de longues séquences de bases non codantes. Elles jouent un rôle essentiel dans la régulation de l'expression des gènes, et possèdent d'autres fonctions que la recherche continue d'explorer.

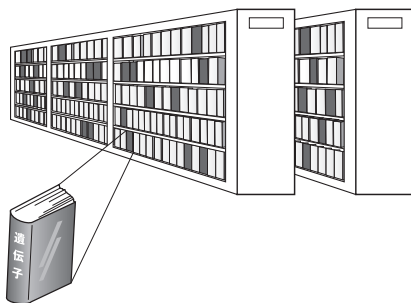
* Le nombre de chromosomes dépend de l'espèce. Ainsi, la poule en possède 78 et certaines fougères 1 200.

COMMENT VISUALISER LA TAILLE DU GÉNOME ?



Nous avons vu que l'ADN, contenu dans le noyau de chaque cellule, était formé de 3,2 milliards de bases choisies entre A, T, C et G.

En considérant une base comme une lettre, il faudrait 5 000 livres de 300 pages pour contenir l'ADN d'une cellule, donc d'un individu.



Index

- 3' (3 prime), extrémité 123–124
- 5' (5 prime), extrémité 123–124
- acétaldéhyde déshydrogénase (ALDH)
72–73, 75–76
- acide aminé 29, 44, 63–64, 79–82
 - chaîne 63, 173, 178–180
 - codon 172–179
 - création des protéines 79–86, 173–178
 - remplacement 81–83
 - séquence 63–64, 83–86, 180
 - structure 80–81, 92
 - transcription/translation . 63, 160, 172–179
- acide nucléique 29, 42, 49, 159, 205–208
- actine 77–78
- adénine 91, 113–114, 163
- ADH (alcool déshydrogénase) ... 72–76
- ADN 17–18, 41–43, 49, 58, 62–65
 - ADNc (complémentaire) 194
 - anomalies et mutations 136, 143–144, 164, 199, 214
 - bases ... 91–92, 113–114, 163–166
 - brin codant 152–153
 - chromosomes 94–95, 128–134
 - circulaire 194, 196
 - double hélice . 87–88, 112–115, 152
 - gène 111–112
 - génome 94–96, 198–199
 - ligase 195, 211
 - manipulation 187–189
 - nucléotides 76, 79, 86–93, 112–117, 121, 123, 164
 - polymérase . 76, 114–126, 164, 209
 - réplication 64, 75–76, 98, 111–126, 134
 - squelette sucre-phosphate 113, 164–165, 197
 - structure 48–50, 76, 83–93, 112–115, 123, 150–151, 166, 170
 - synthèse 120–123
- anaphase 132
- antibiotique 196
- anticodon 177–178
- ARN 17–18, 43, 49–51, 62–63, 162–168
 - amorce 121–122, 194
 - ARNc (circulaire) 194, 196
 - ARNi (interférent) 207–209
 - ARNm (messager) ... 50, 158–159, 167
 - ARNpm (pré-messager) 160
 - ARNt (transfert) 167, 171–173, 176–179, 208
 - base 152, 159, 173–177
 - miARN (micro-ARN) 208
 - ribonucléotide 165
 - RISC 208
 - séquence 147, 152–156, 159, 166–167, 176–177, 209
 - structure 166–167, 170
 - traduction 86, 171–172
 - transcription ... 152–153, 159–160
- ATP 39
- bactérie 28, 38–39, 54, 58, 161
 - E. coli (Escherichia coli) .. 106, 191
- bibliothèque d'ADNc 194
- cancer . 94, 136, 143, 200, 202–203, 206
- catalyse 71, 75
- cellule 22–25
 - animale 129, 133
 - basale 109, 134
 - communication entre 35

cytoplasme .. 31, 37, 44, 50–51, 58, 131–132, 158, 207

eucaryote 57–58

fonctions 65–66

multicellulaire 25, 54–58, 106–109

organisme vivant 26–30, 37

organite ... 29, 37–41, 58, 133, 180

peau 55, 63, 108–109, 134, 215

procaryote 57–58

production d'énergie 29, 38–39, 67, 81

sang 81–82

somatique 213–214

souche 199, 214–215

structure 29, 31–32, 79, 130

unicellulaire 25, 28–30, 54–58, 103–106

végétale 133

centrosome 31, 130–131

cholestérol 29

chromatine 128, 134, 150–151, 154

chromosome 94–95, 128–134

sexuel 129

clonage 211–214

transduction 192, 195–197

code génétique 86, 173–174

codon 172, 174–179

anticodon 177–178

stop 175–179

complexe de pré-initiation 172

corps nucléaire 58

CTD (domaine carboxy-terminal) .. 159

cycle cellulaire 134–135

cytocinèse 130, 133, 135

cytoplasme 31, 37, 44, 50–51, 58, 131–132, 158, 207

cytosine 91, 113–114, 163–164

désoxyribose . 90–91, 123–124, 164–165

division cellulaire 76, 98, 103–109, 128–133

DMLA 209

E. coli 106, 191–192, 195–197

EcoRI 194

embryon 199, 211–212, 215

énergie (cellule) 29, 38–39, 67, 81

enveloppe nucléaire 42, 50, 58, 130–134, 158, 171

enzyme 63, 67–74, 78

acétaldéhyde 72–73

ADN ligase 195, 211

ADN polymérase 76, 114–126, 164, 209

ARN polymérase 154–160

catalyse 71, 75

de restriction 194, 210–211

déshydrogénase 72–76

glycogène synthase 67, 75

protéines et 67–76

ribozyme 208

splicéosome 160

épissage 160–161

épithélium 55–56

exon 159–162

foie 38, 65–75, 147

fuseau mitotique 132

gamète 199

gène 17, 42, 50–52, 58, 62–64

chromosome 94–95, 128–134

comme plan 17, 50–51, 63–64, 83–85, 112, 143–145, 152, 159, 189

construction protéine 83–86

évolution 148, 161–162, 214

exon 159–162

expression ... 52–53, 149, 207–210

fossile 149

intron 159–161, 171, 194

mutation . 136, 143–144, 164, 199, 214

pseudogène 148–149

recombinaison 189–197

réplication ADN 111–112

structure 84–86

suppresseur de tumeur	136	mitochondrie	31, 38–40
thérapie	202, 204–206	mitose	130–133, 135
transgène	199	molécule ..	15–16, 22–24, 29, 35–42, 63
génomé	198–199, 213	monomère	92
animal	198–199, 213	mosaïque	199, 201
humain	94–96	muscle	55–56, 65–66, 77–78
transduction et clonage	192, 195–197	mutation ..	136, 143–144, 164, 199, 214
globine	82	myosine	63, 77–78
glucose	29, 39, 67–68, 75	noyau	41–42, 130
glycogène	67–68, 75	structure	43–53
glycogène synthase	67, 75	nucléole	31
golgien (appareil)	31, 37–40, 180	nucléoside	91
guanine	91, 113–114, 163	nucléosome	49, 150
hémoglobine	78, 81–82, 144	nucléotide ..	76, 79, 86–93, 112, 115–117, 121–123, 164
hétérochromatine	151	nutriments ..	37, 54, 65, 75, 78, 133, 136
histidine	80, 173–176	Okazaki (fragments)	124–125
histone	48–49, 128–129, 150	organisme	
homéostasie	78	multicellulaire ..	25, 54–58, 106–109
hormone	78	unicellulaire	25, 28, 30, 54–58, 103–106
hybridation	190	organite	29, 37–41, 58, 133, 180
hydrogène (liaison)	82, 113, 116	paramécie	24, 54, 58, 104, 106
immunoglobuline	78	PCR ...	76, 114–126, 193–197, 209–211
insuline	78, 191	quantitative	210
intron	159–161, 171, 194	péroxysome	38–40
KO (souris)	198–201	phases G1, G2, M, S	134–135
leucine	80, 160, 175	phosphate	90–91, 123, 164–165
liaison hydrogène	82, 113, 116	phospholipide	33–36
ligament	55	plasmide	195–196, 210–211
lipide	29, 33–36	polymérase	
lysine	80	ADN	76, 114–126, 164, 209
lysosome	31, 38, 40	ARN	154–160
maladies liées au mode de vie ..	202–204	polysaccharide	29, 34
maltose	67	procaryote	57–58
médecine personnalisée	202–204	Projet génome humain	94
membrane		prophase	130
cellule	29, 33–38, 42, 58, 76	protéine	17–18, 29, 34–35, 38, 42, 62–66
fusion	35–36, 38	acides aminés	79–86, 173–178
métabolisme	65, 73, 205, 209	actine	77–78
métaphase	131	création ..	62–64, 79–86, 138, 144, 167, 173–178
microtubule	131–132		

enzyme 67–76
 fonctions 62–66, 78
 hémoglobine 78, 81–82, 144
 histone 48–49, 128–129, 150
 myosine 63, 77–78
 structure 79–82, 92, 167, 180
 synthèse 52–53, 171–173, 208
 types 63, 75, 78
 protozoaire 54, 58, 106, 184
 pseudogène 148–149
 reproduction 98–103, 107
 non sexuée 106
 réticulum endoplasmique ... 31, 37–38,
 42, 171, 180
 ribonucléotide 165
 ribose 165
 ribosome ... 37–40, 44, 51, 86, 120, 158
 dans la traduction 171–172,
 176–179
 ribozyme 208
 RISC (Complexe induisant le silence de
 l'ARN) 208
 SE (cellule souche) 199, 214–215
 SELEX méthode 209
 signal de localisation nucléaire 44
 spliceosome 160
 sucre
 ADN vs ARN 164–165
 glucose 29, 39, 67–68, 75

syndrome métabolique 202–203
 système immunitaire 63, 75
 télophase 132
 thérapie génique 202, 204–206
 thymine 91, 113–114, 163–166
 topoisomérase 76
 traduction
 acide aminé 172–179
 ARNm 86, 171–172
 ARNpm (pré-messager) .. 152–153
 codon 172, 174–179
 complexe de pré-initiation 172
 protéine (synthèse) 171–173
 ribosome 171–172, 176–179
 transcription
 alternatif 161
 ARNm 152–153, 159–160
 ARN polymérase 154–160
 chromatine 150–151, 154
 épissage 160
 pseudogène 148–149
 transduction et clonage .. 192, 195–197
 transgène 199
 transgénique (animal) 198–201
 UV (lumière) 143, 197, 200
 vecteur 191, 195–196, 201, 205, 211
 vésicule 32, 37–38

