LES BACTÉRIES FONT DE LA RÉSISTANCE

CHRISTÈLE AUBRY
GILBERT GREUB



EPFL PRESS

Plongez dans l'univers microscopique des bactéries, au cœur de la lutte contre la résistance aux antibiotiques !

Il y a plusieurs milliards d'années, au fond des océans, naît Luca – le Dernier Ancêtre Commun Universel (Last Universal Common Ancestor). Grand-parent de toutes les formes de vie actuelles, il nous raconte comment ses toutes premières descendantes, les bactéries, sont apparues sur Terre... et ne l'ont plus jamais quittée.

Si la plupart des bactéries sont inoffensives – et même indispensables à la vie –, certaines peuvent se révéler redoutables. Luca nous plonge dans cet univers foisonnant où les bactéries se multiplient à toute allure, s'arment pour se défendre, entrent en dormance pendant des siècles ou bâtissent d'impressionnantes forteresses. Il nous révèle comment certaines d'entre elles élaborent des stratégies pour s'infiltrer dans d'autres êtres vivants, provoquant infections et maladies. Pour les contrer, les humains utilisent des armes spécifiques : les antibiotiques. Mais les bactéries apprennent à résister, jusqu'à devenir parfois invincibles...

Cette bande dessinée nous plonge dans une aventure scientifique passionnante, à la découverte de ces êtres minuscules qui ont façonné notre planète et représentent aujourd'hui un enjeu crucial pour l'avenir de l'humanité.



CUV Unil.

9 782889 157457

Christèle Aubry
Gilbert Greub

LES BACTÉRIES FONT DE LA RÉSISTANCE



EPFL PRESS

Projet né d'une discussion entre Christèle Aubry & Gilbert Greub

Scénario et dessin
Christèle Aubry

Comité Scientifique
Christèle Aubry
Gilbert Greub

Financements
Ce projet bénéficie d'un soutien financier grâce aux subsides obtenus et gérés par Gilbert Greub, provenant du NCCR Microbiomes, du programme Spearhead, d'ERADIAMR ainsi que de l'Institut de microbiologie (CHUV–Unil).

Édition
EPFL PRESS
Direction générale: Lucas Giossi
Directions éditoriale et commerciale: Sylvain Collette et May Yang
Responsable de production: Christophe Borlat
Éditorial: Alice-Micheau-Thiébaud et Jean Rime
Graphisme: Kim Nanette
Promotion et diffusion: Manon Reber
Comptabilité: Daniela Castan

Première édition française, 2026
© EPFL Press
EPFL Press est une maison d'édition de la fondation
des Presses polytechniques et universitaires romandes
ISBN 978-2-88915-745-7, version imprimée
ISBN 978-2-8323-2334-2, version ebook (pdf), doi.org/10.55430/1119BFRAG

www.epflpress.org

Imprimé en Tchéquie

Ce livre est sous licence



elle vous oblige, si vous utilisez cette œuvre, à en citer l'auteur, la source et l'éditeur original. Les modifications ou adaptations sont autorisées sous réserve d'une diffusion sous la même licence. L'œuvre et ses adaptations ne peuvent pas être utilisées à des fins commerciales.

Merci à Fabien pour son soutien, ses précieux conseils
et son talent pour glisser de l'humour là où je mettais
trop de science.

Merci également à ma famille, à mes amis
et à mes collègues pour leur relecture attentive
et leurs encouragements.

LES AUTEURS



Depuis toujours, **Christèle Aubry** aime comprendre le vivant et le raconter. Biologiste de formation, elle s'est plongée dans le monde fascinant des bactéries dès son master, avant de poursuivre avec un doctorat au Centre Hospitalier Universitaire Vaudois (CHUV) consacré à la tolérance aux antibiotiques. Mais ce qu'elle aime par-dessus tout, c'est faire voyager les autres dans cet univers invisible, avec curiosité et humour.

Au fil des années, elle a animé des ateliers de médiation scientifique, imaginé des façons originales de parler de science et relevé des défis tels que celui de « Ma thèse en 180 secondes », prouvant qu'on peut parler de microbes sans perdre personne en route. Pour elle, partager la science, c'est avant tout transmettre une émotion — celle de la découverte.



Gilbert Greub vit entouré de microbes — à l'université, dans ses recherches et parfois même dans ses jeux de société ! Professeur à l'Université de Lausanne, directeur de l'Institut de microbiologie et chef du service de microbiologie médicale du CHUV, il étudie depuis des années les bactéries qui aiment se cacher à l'intérieur de nos cellules. De plus, il est médecin chef au CHUV, spécialiste des infections que causent les microbes.

Curieux, passionné et pédagogue dans l'âme, il adore raconter comment ces minuscules êtres façonnent notre monde, avec un enthousiasme contagieux.



Le commencement 9

Une bouffée d'air frais 13

Bactérie : Qui es-tu ? 19

Elle a fait un bébé toute seule ! 29

Lutter pour survivre 35

La Belle au Bois dormant 43

Une forteresse imprenable 49

Allô Docteure ? J'ai attrapé un virus ! 55

La maladie frappe 61

Les antibiotiques ripostent 73

La résistance s'organise 81

Les virus... nos sauveurs ? 89

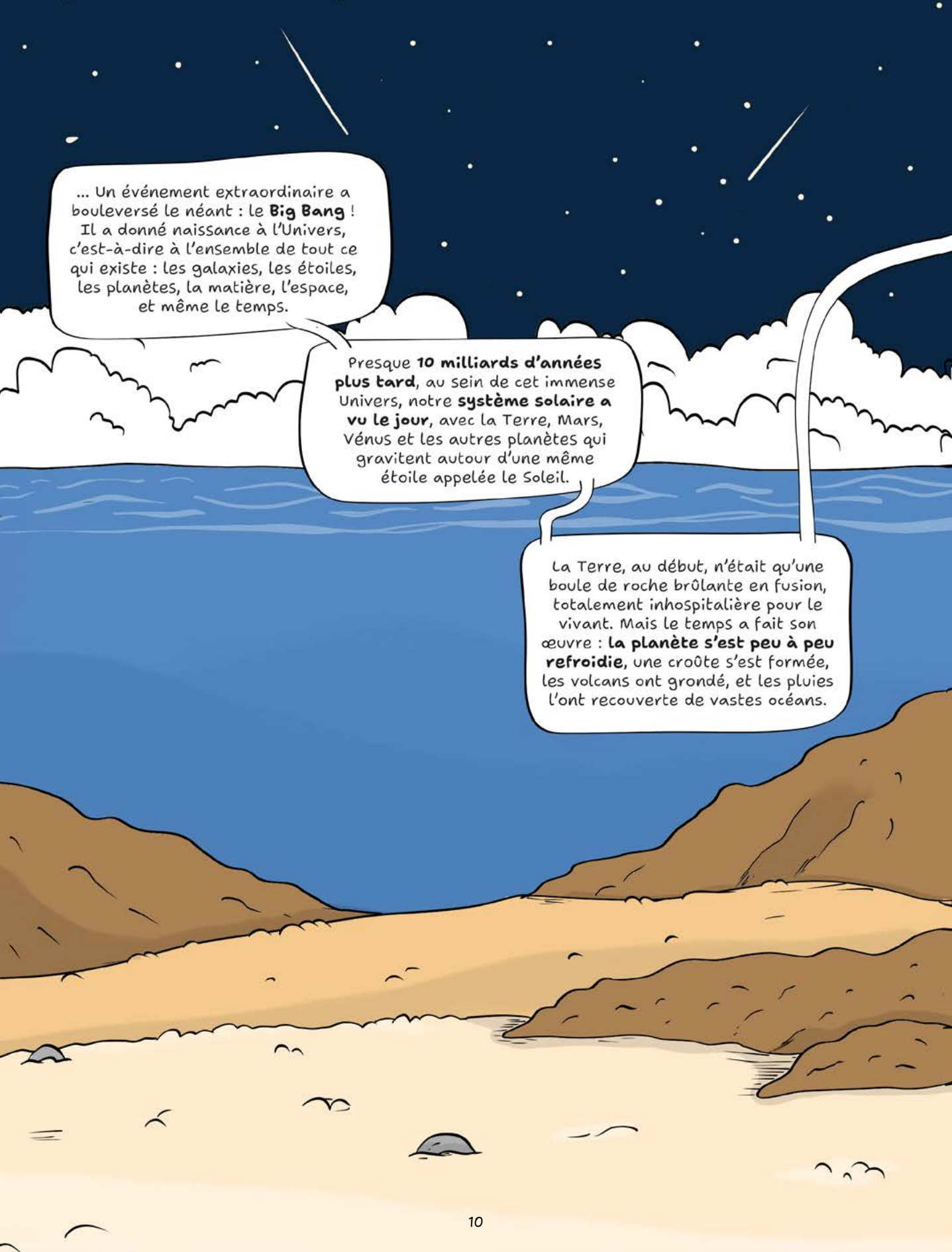
L'équilibre du vivant 93

Glossaire 97

Bibliographie 102

LE COMMENCEMENT



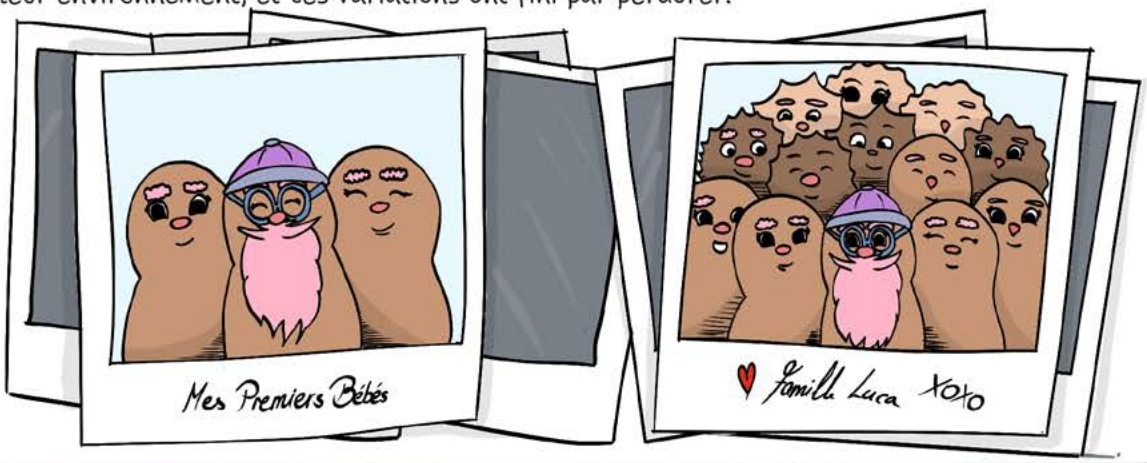

... Un événement extraordinaire a bouleversé le néant : le **Big Bang** ! Il a donné naissance à l'Univers, c'est-à-dire à l'ensemble de tout ce qui existe : les galaxies, les étoiles, les planètes, la matière, l'espace, et même le temps.
Presque **10 milliards d'années plus tard**, au sein de cet immense Univers, notre **système solaire a vu le jour**, avec la Terre, Mars, Vénus et les autres planètes qui gravitent autour d'une même étoile appelée le Soleil.
La Terre, au début, n'était qu'une boule de roche brûlante en fusion, totalement inhospitalière pour le vivant. Mais le temps a fait son œuvre : **la planète s'est peu à peu refroidie**, une croûte s'est formée, les volcans ont grondé, et les pluies l'ont recouverte de vastes océans.


C'est dans ces eaux profondes, il y a presque **4 milliards d'années**, que quelque chose d'impensable s'est produit : **la vie a commencé**.
C'est là que j'entre en scène. Mon nom est **Luca**, pour *Last Universal Common Ancestor*, ce qui veut dire **« Dernier Ancêtre Commun Universel »**. Je ne suis pas le tout premier être vivant sur Terre. Avant moi, d'autres formes de vie ont existé, mais elles ont disparu sans laisser de traces.
Moi, j'ai eu plus de chance : **toutes les formes de vie de ces derniers milliards d'années** viennent de moi, des bactéries minuscules aux dinosaures... jusqu'à vous, les êtres humains.
Aujourd'hui, je vais vous raconter l'histoire fascinante de mes toutes premières descendantes : **les bactéries**. La plupart d'entre elles sont des alliées précieuses. Elles vous aident à digérer, protègent votre peau, recyclent la matière... et font bien d'autres choses utiles !
Mais attention, d'autres bactéries provoquent quant à elles **des infections ou résistent aux médicaments**. Comment ces petites ingénieuses s'y sont-elles prises pour trouver leur place dans ce monde ? **Laissez-moi vous révéler quelques-uns de leurs secrets !**

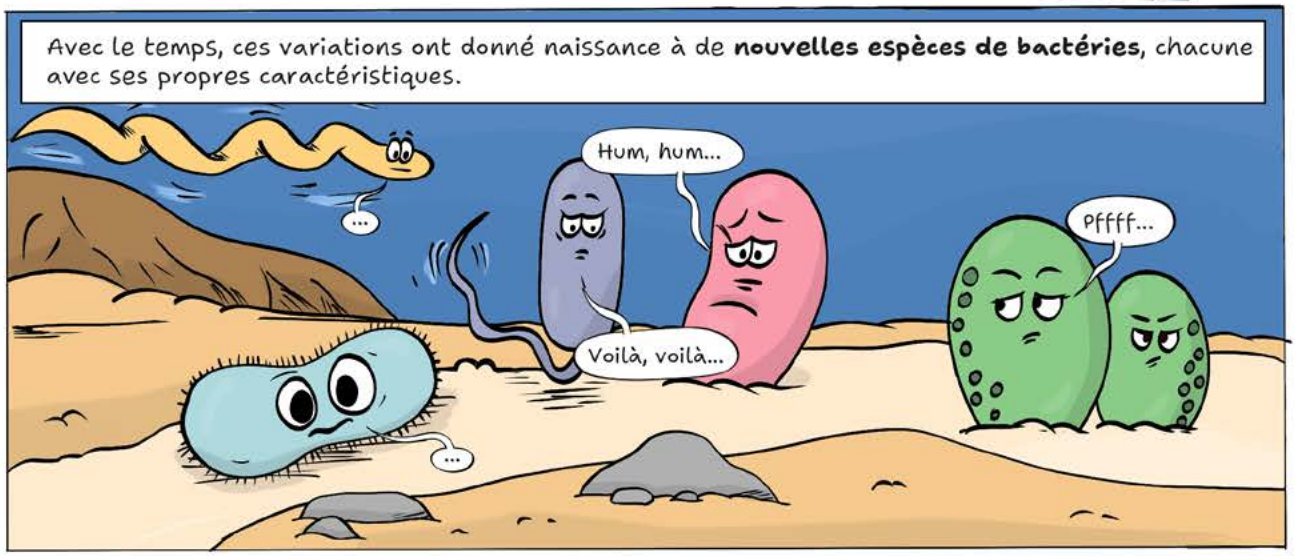
UNE BOUFFÉE D'AIR FRAIS



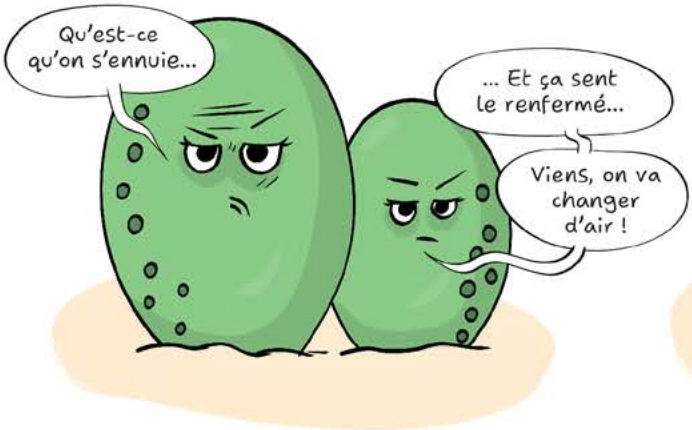
Pendant ma jeunesse, je me suis multiplié, donnant naissance à des copies de moi-même. Ces dernières ont fait la même chose, encore et encore... mais parfois, **de petites différences se glissaient**. Certaines permettaient à mes descendantes de mieux survivre, se nourrir ou s'adapter à leur environnement, et ces variations ont fini par perdurer.



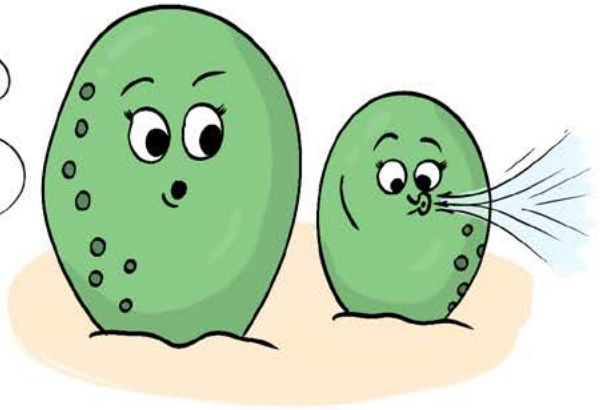
Avec le temps, ces variations ont donné naissance à de **nouvelles espèces de bactéries**, chacune avec ses propres caractéristiques.



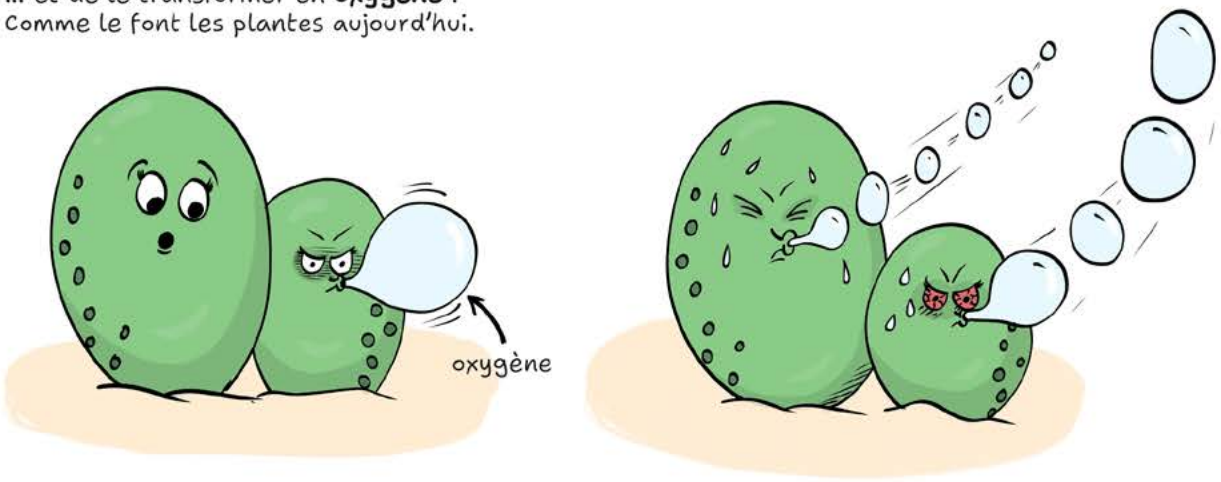
Mais cette diversité a été bouleversée il y a 2,5 milliards d'années, avec l'émergence des **cyanobactéries**...

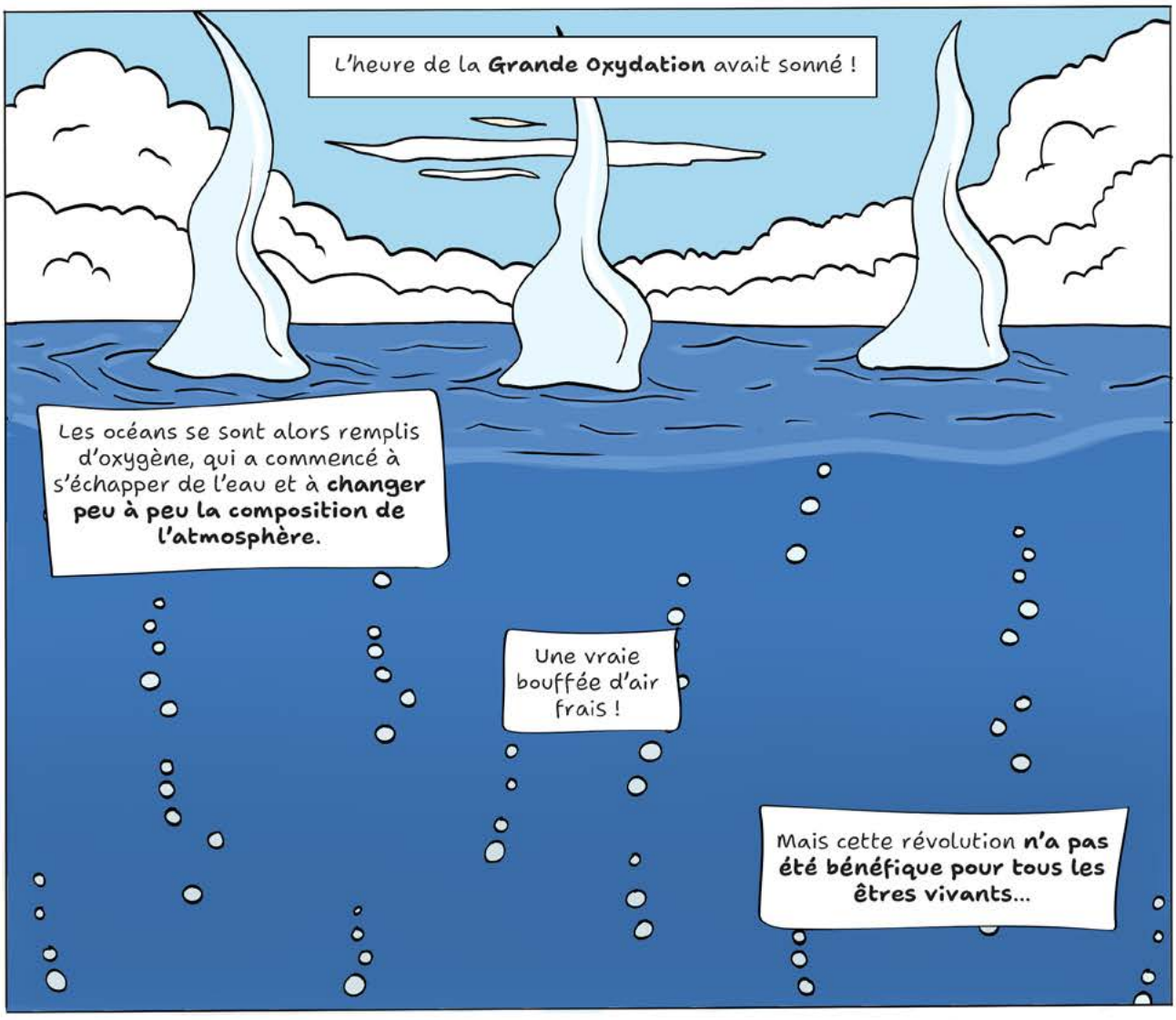


Ces génies ont découvert la **photosynthèse**, un pouvoir permettant de capter le **gaz carbonique (CO_2)**, très présent dans l'atmosphère de l'époque...



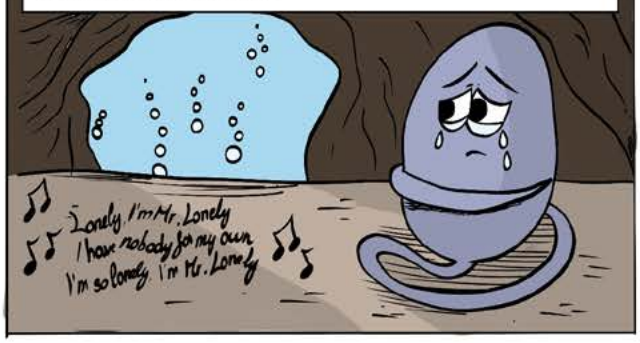
... et de le transformer en **oxygène** !
Comme le font les plantes aujourd'hui.



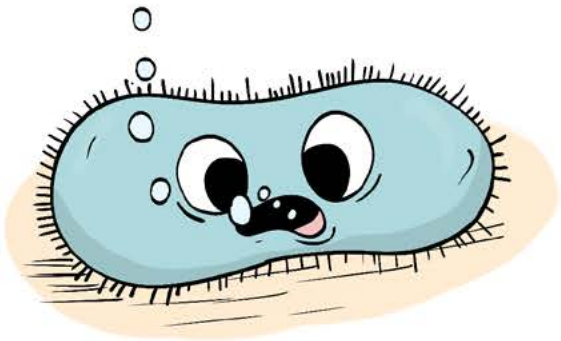


Pour les bactéries de l'époque, **l'oxygène était très toxique**. Son apparition a provoqué une grande catastrophe écologique, **la première extinction de masse**, qui a éliminé de nombreuses espèces.

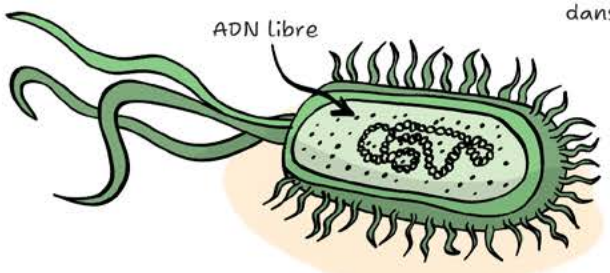
Heureusement, certaines ont survécu en se réfugiant dans des endroits inaccessibles pour l'oxygène, comme le fond des océans, des lacs ou des marais. Leurs descendants y vivent encore aujourd'hui.



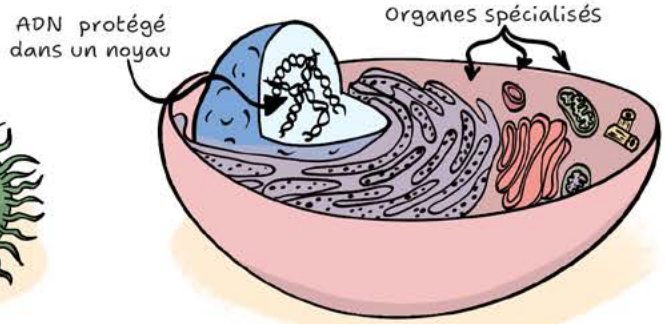
Pour d'autres, cette nouvelle atmosphère a été une véritable aubaine : elles ont appris à **respirer l'oxygène et à s'en servir** pour grandir et se développer, donnant naissance à de nouveaux organismes.



Au fil du temps, certaines de ces cellules[1] **ont gagné en complexité** et développé des structures internes pour protéger leur ADN[2] et organiser leurs activités. C'est ainsi que sont apparus les eucaryotes, des cellules plus grandes et mieux équipées que leurs cousines bactéries, qui sont des procaryotes. Cette nouveauté a permis à la vie de devenir **plus riche et plus variée**, ouvrant la voie à des organismes toujours plus complexes.



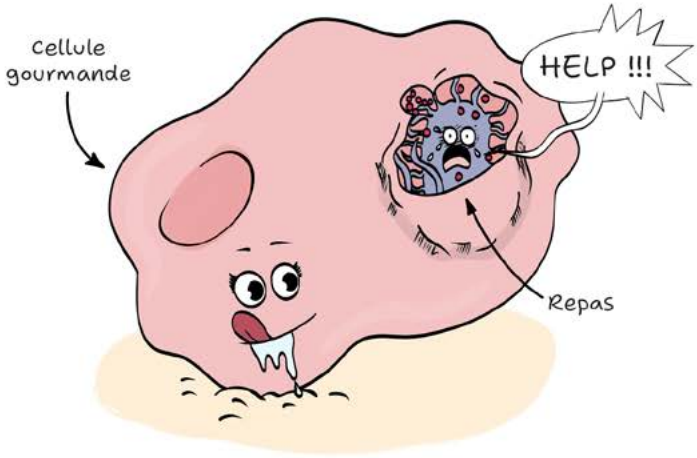
Procaryotes
(dont les bactéries)



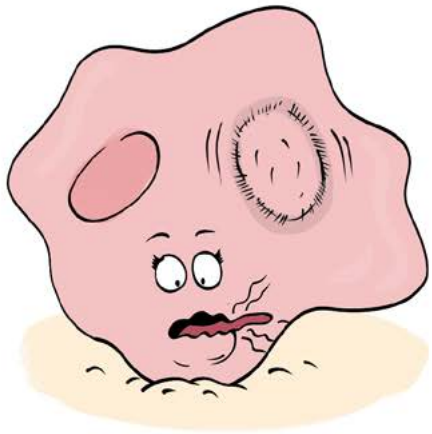
Eucaryotes
(animaux, végétaux et champignons)

[1] La cellule est la plus petite unité du vivant. Certains êtres vivants ne sont composés que d'une cellule, comme les bactéries, d'autres, comme les humains, en comptent des milliards.
[2] L'ADN est le code génétique contenant les informations pour la construction et le fonctionnement d'un organisme.

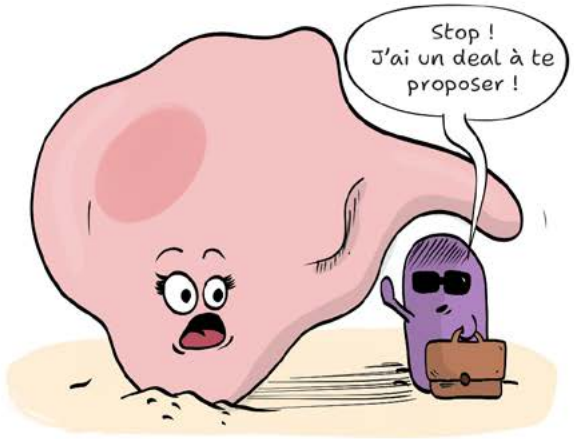
Les scientifiques pensent que certains eucaryotes ont évolué grâce à une **collaboration** avec des bactéries. Il semble qu'une cellule gourmande...

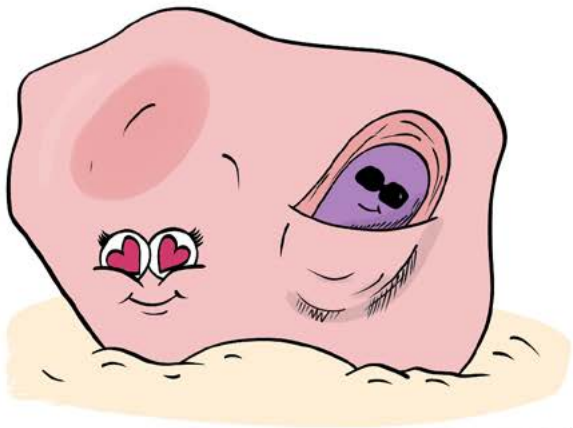


... ait commencé à manger des bactéries.

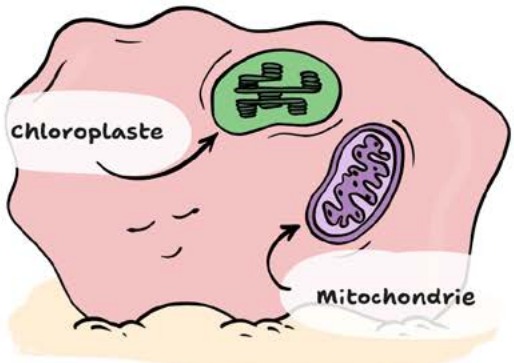


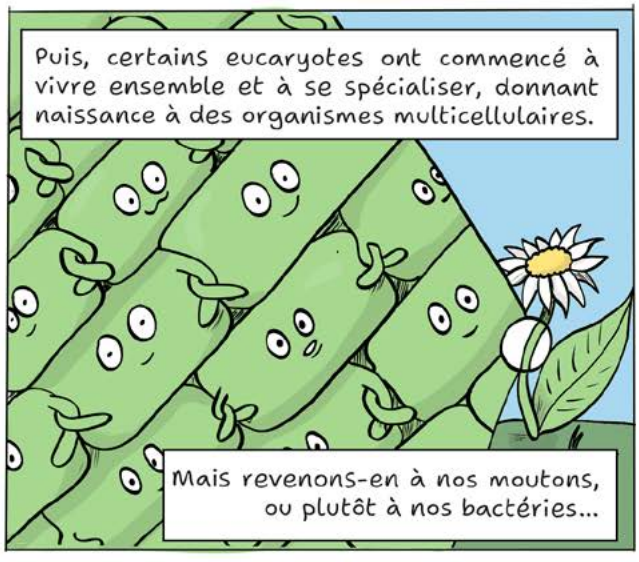
Il est toutefois possible qu'une cellule ait un jour avalé une bactérie sans la digérer.



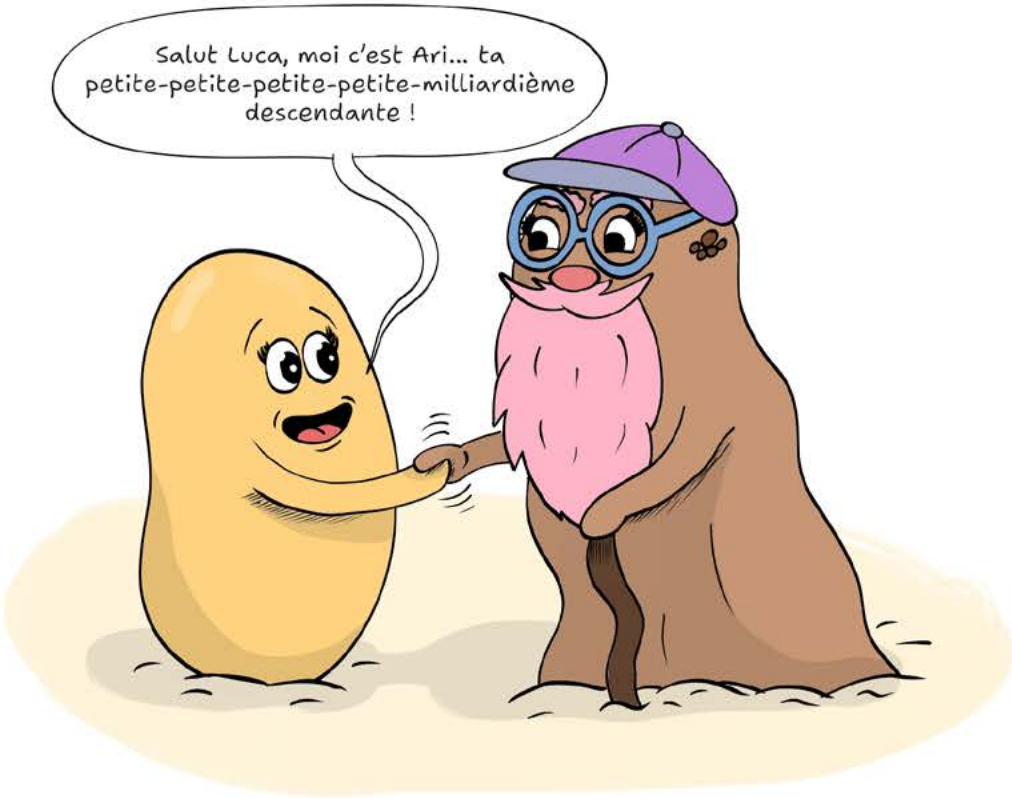


De cette rencontre improbable est née une alliance : la bactérie a évolué en un organe essentiel, la **mitochondrie**, cœur énergétique de la cellule. Plus tard, une autre union a donné vie aux **chloroplastes**, maîtres de la photosynthèse.





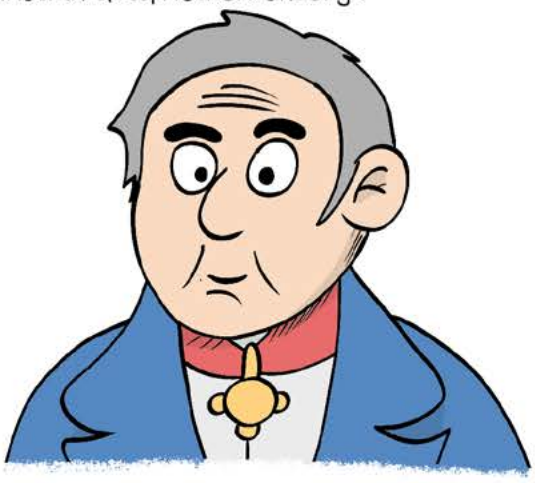
BACTÉRIE : QUI ES-TU ?







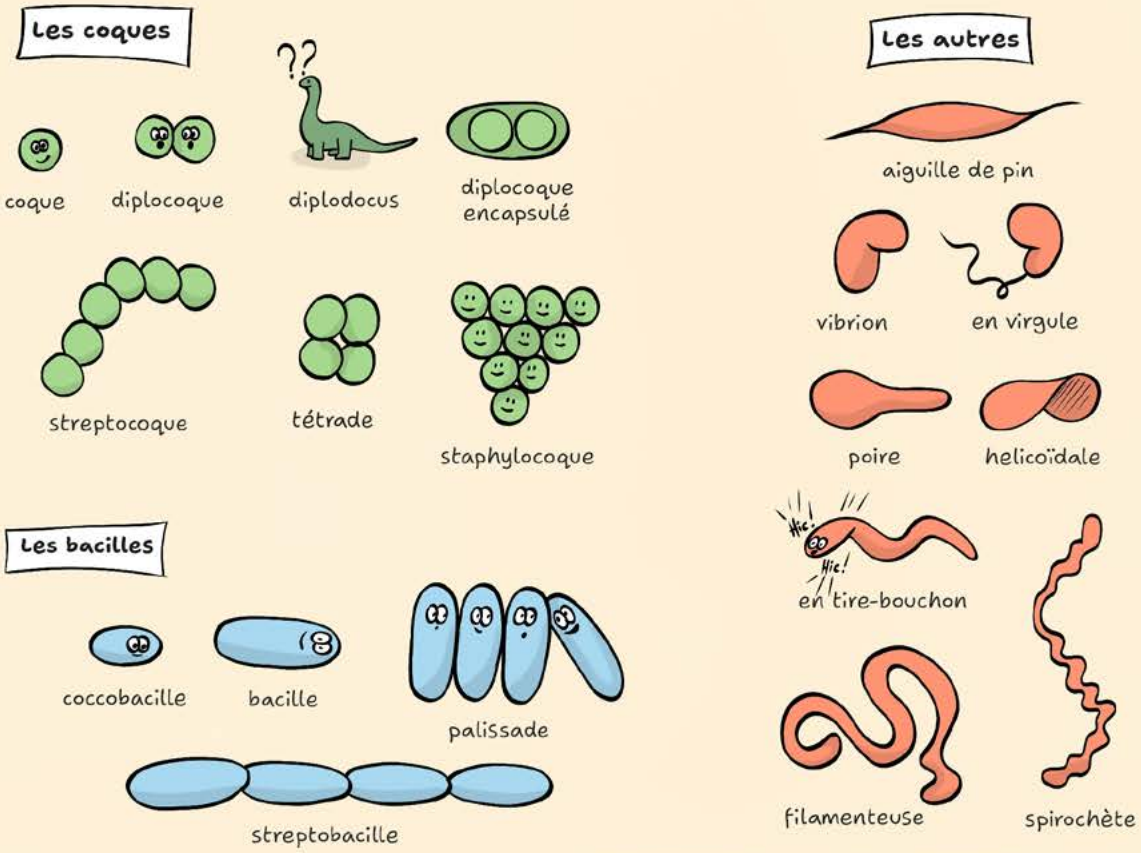
Puis, il a fallu attendre 150 ans avant qu'elles reçoivent le nom **« *Bacterium* »**, inventé par Christian Gottfried Ehrenberg !



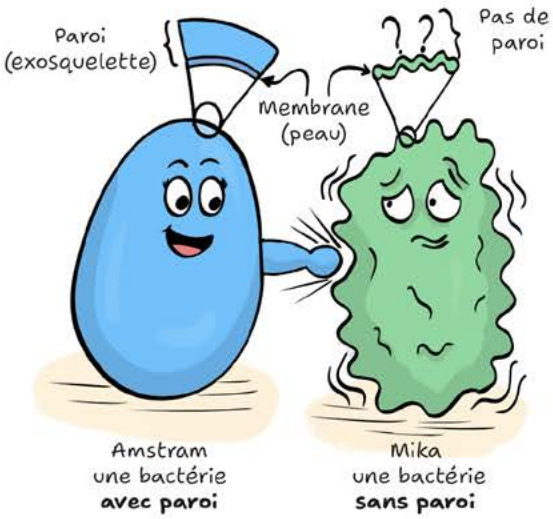
Il s'est inspiré de leur forme en bâtonnet pour les nommer ainsi, en reprenant le mot grec *bakterion* (βακτήριον), qui signifie « *petit bâton* ».



Pourtant, toutes les bactéries ne ressemblent pas à des bâtonnets. Leur forme varie énormément.

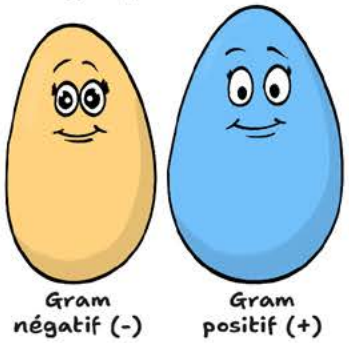


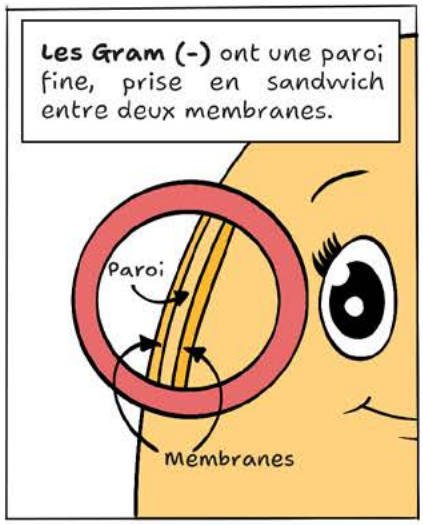
La forme est maintenue par **une paroi rigide** qui agit comme un exosquelette. Certaines bactéries, comme les mycoplasmes, n'en possèdent pas et adoptent alors une structure plus souple et modulable.



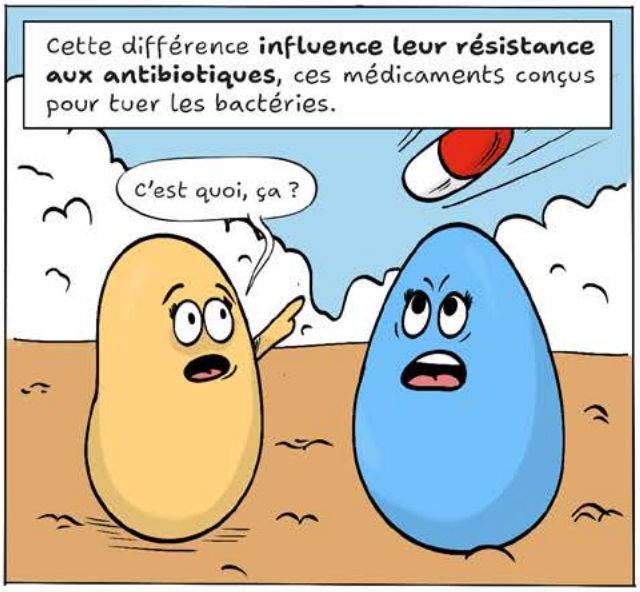


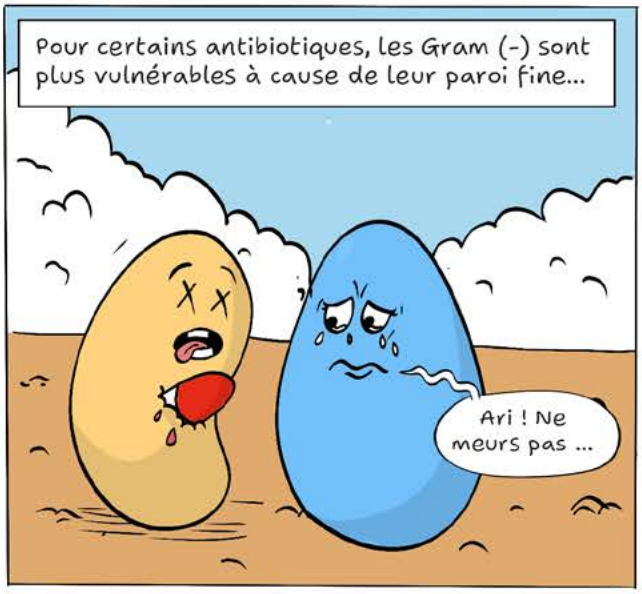
Comprendre la paroi est essentiel, car parmi les bactéries qui en ont une, sa structure permet de les **classer en deux grands groupes**.











Alors que les Gram (+) y sont insensibles grâce à leur paroi épaisse. Pour d'autres types d'antibiotiques, cela peut être l'inverse.

Ploc !

Le terme « **Gram** » vient de la **coloration** mise au point par Hans Christian Gram en 1884, qui permet de distinguer ces deux grands types de bactéries.

Regarde, Amstram !

Ari ? T'es en vie ?

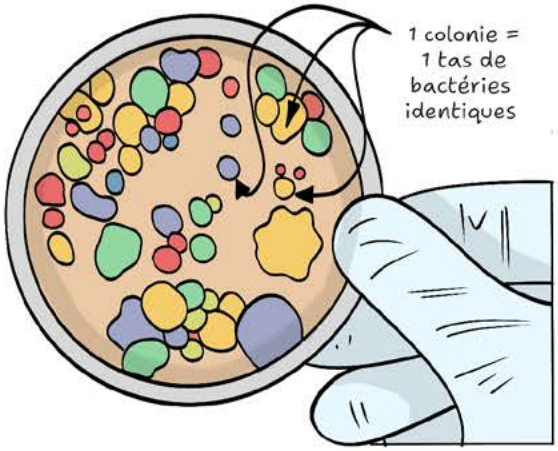
Lorsqu'elles sont imprégnées de cette coloration, les **Gram (+)** retiennent le colorant **violet**, tandis que les **Gram (-)** ne l'absorbent pas et apparaissent **roses**.

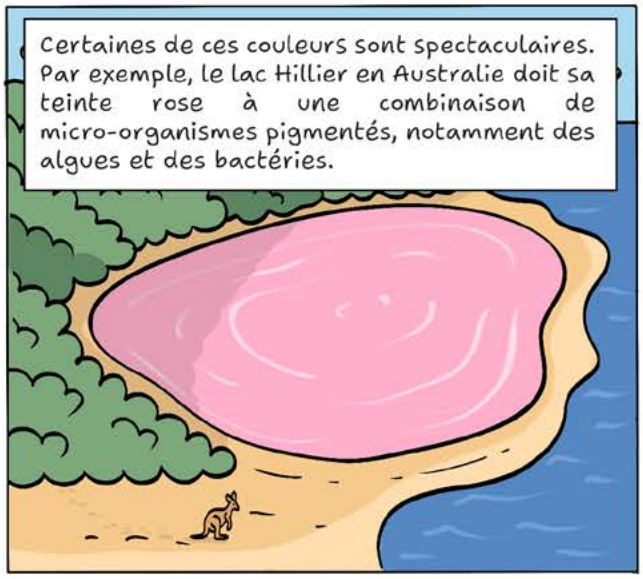
On en aura vu de toutes les couleurs aujourd'hui !

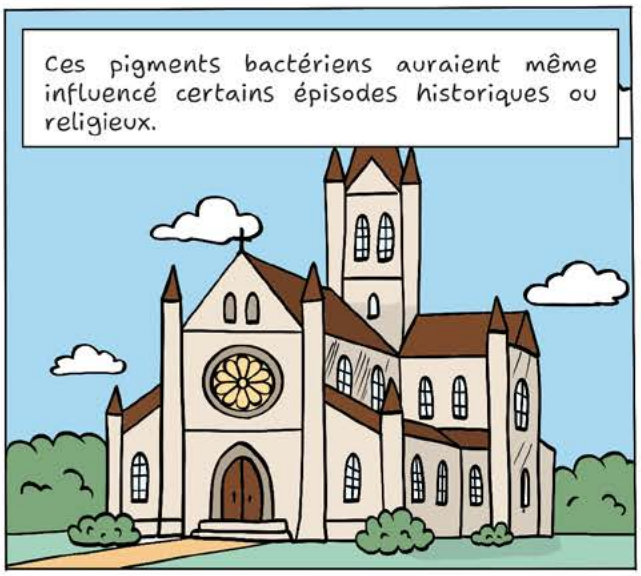
Sans coloration, les bactéries sont quasiment transparentes au microscope.

T'as l'air un peu pâlotte.

En revanche, lorsqu'elles se regroupent en **colonies**, elles peuvent adopter une palette de couleurs variées, observable à l'œil nu.





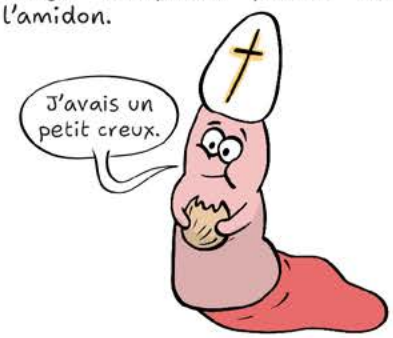




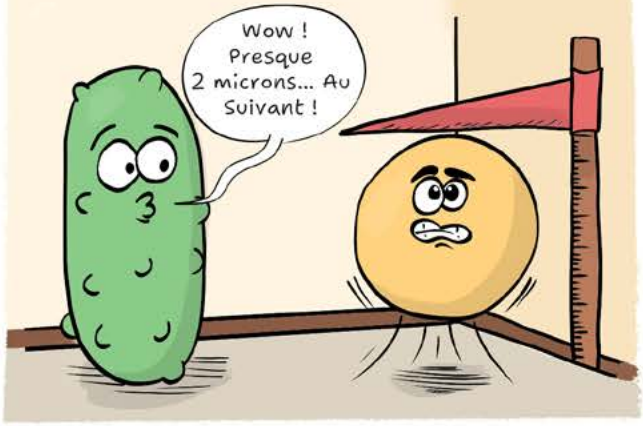




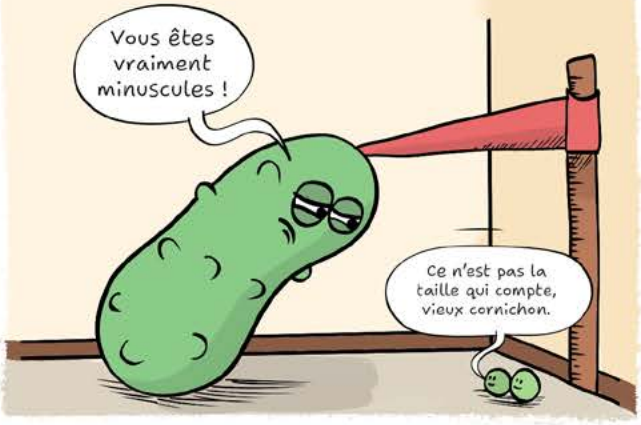
Ce miracle serait l'œuvre de *Serratia marcescens*, une bactérie produisant un pigment rouge lorsqu'elle pousse sur l'amidon.



La taille des bactéries est également variable. La plupart mesurent entre **1 et 3 microns**[1]...



À quelques exceptions près... Comme les *Chlamydias*, qui font partie des plus petites avec une taille d'environ 0,3 micron.



À l'autre extrême, des bactéries géantes sortent du lot, comme *Thiomargarita magnifica*, qui peut atteindre **2 cm**, et *Epulopiscium fishelsoni* qui **frôle le centimètre** !

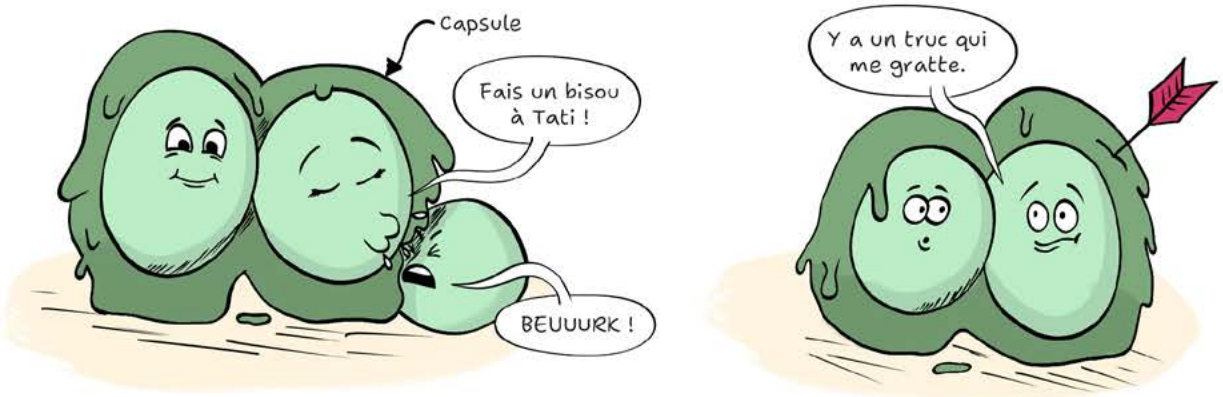


Pour se rendre compte de l'exploit, c'est comme si, à l'échelle humaine, une personne faisait la taille du mont Everest.

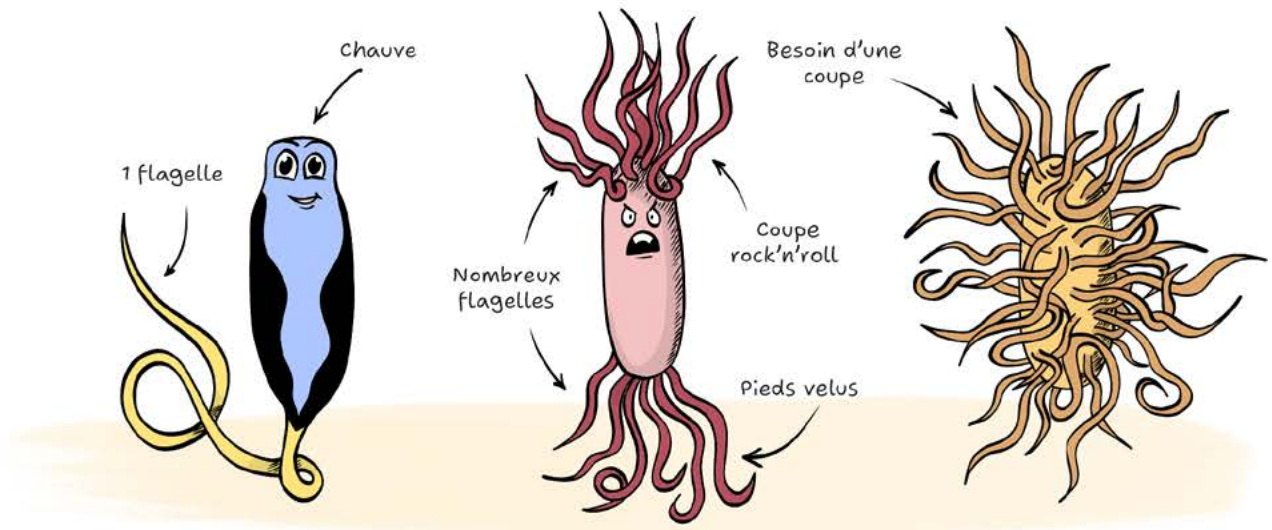


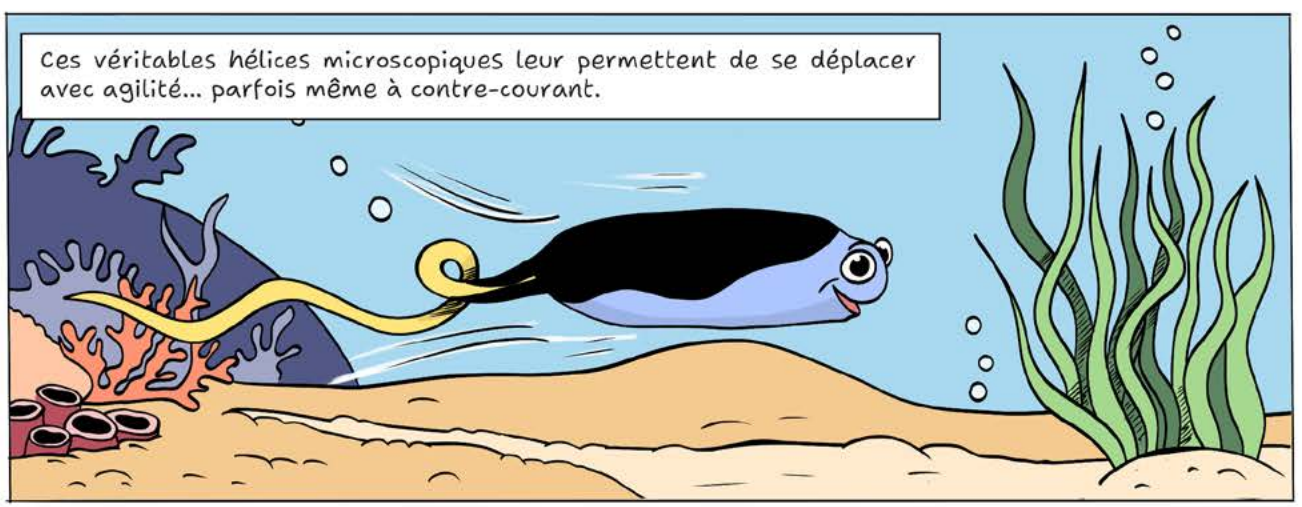
[1] 1 micron (1 µm) = 0,001 millimètre (mm)

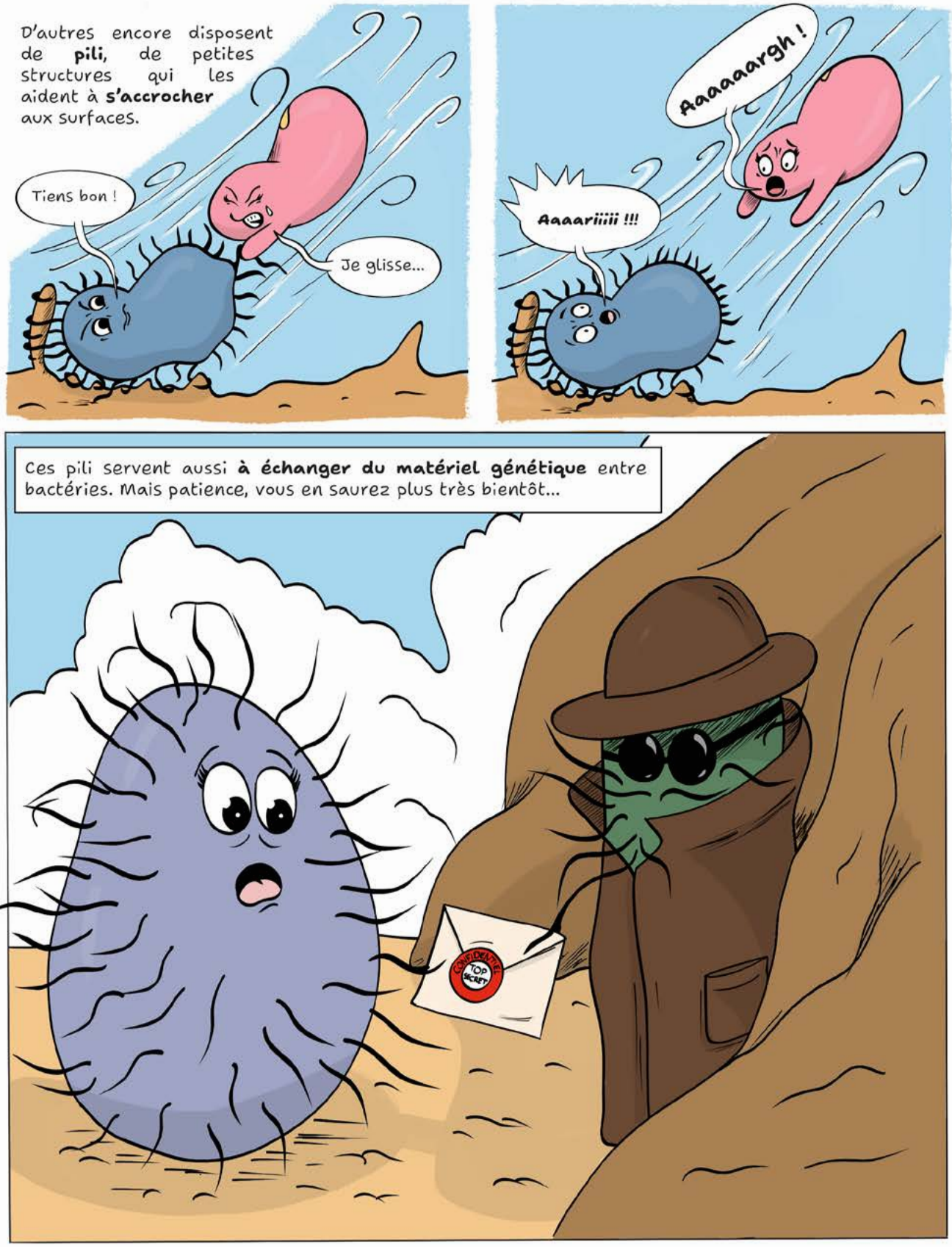
Les bactéries présentent également de nombreuses particularités. Certaines sont recouvertes d'une couche gluante appelée **capsule**, qui les aide à se protéger des agressions extérieures.



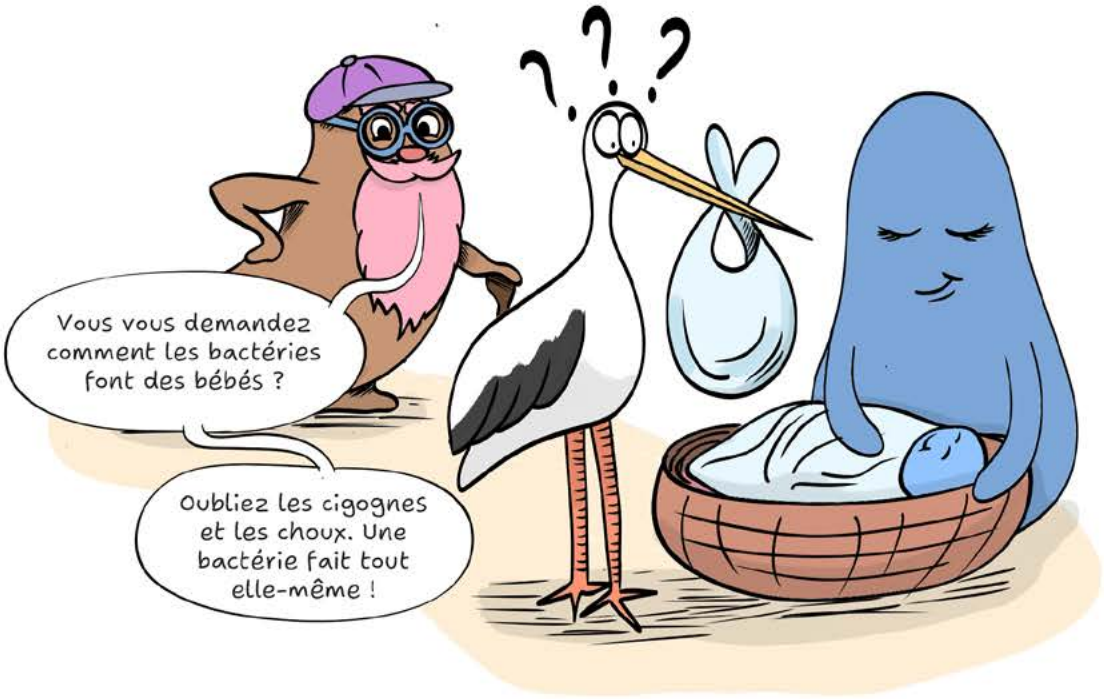
D'autres sont dotées de **flagelles**, de longues excroissances de leur membrane.






D'autres encore disposent de **pili**, de petites structures qui les aident à **s'accrocher** aux surfaces.
Tiens bon !
Je glisse...
Aaaaaargh !
Aaaariiiii !!!
Ces pili servent aussi **à échanger du matériel génétique** entre bactéries. Mais patience, vous en saurez plus très bientôt...
CONFIDENTIEL
TOP SECRET

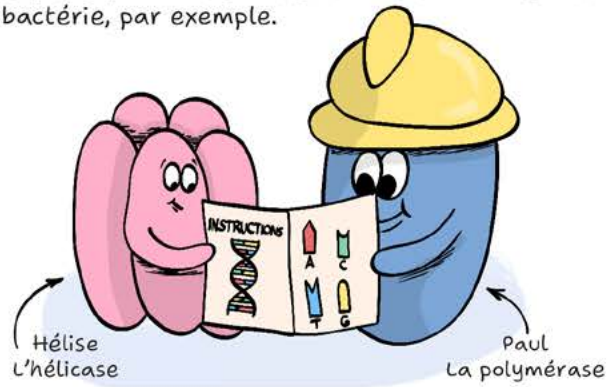
ELLE A FAIT UN BÉBÉ TOUTE SEULE !



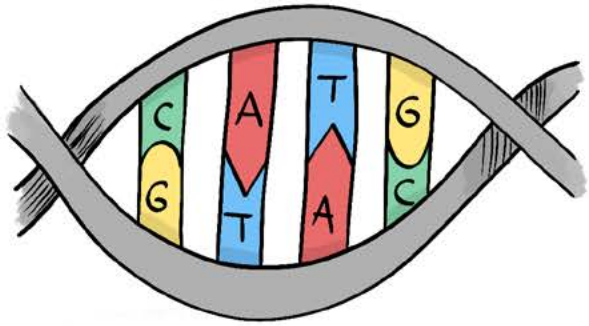
Alors que de nombreux organismes ont besoin d'un partenaire pour se reproduire, les bactéries se multiplient en solo !

Mais avant de se lancer, elles vérifient que tout est parfait : **assez de nourriture, de place et une température idéale**.

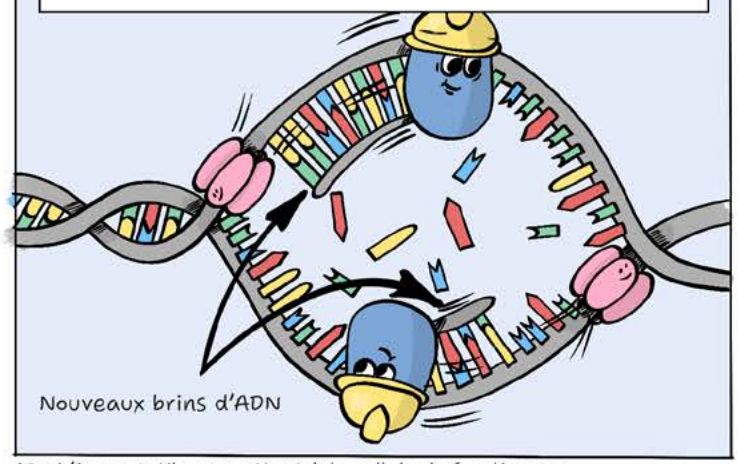
Quand tout est prêt, une équipe de protéines[1] entre en action. Leur mission ? **Copier l'ADN**, le mode d'emploi qui explique comment fabriquer et faire fonctionner un être vivant... comme une bactérie, par exemple.



L'ADN est formé de deux brins torsadés reliés par des paires de blocs appelés nucléotides. Il en existe quatre : **A, T, C et G**. Ensemble, ces lettres forment un **langage universel** qui code toute l'information génétique du vivant !



Pour être copiés, les brins d'ADN sont séparés, un peu comme une fermeture éclair, grâce à la protéine *hélicase*. Ensuite, une autre protéine, la *polymérase*, lit chaque lettre et y assemble sa paire, créant ainsi **deux copies fidèles de l'ADN**.



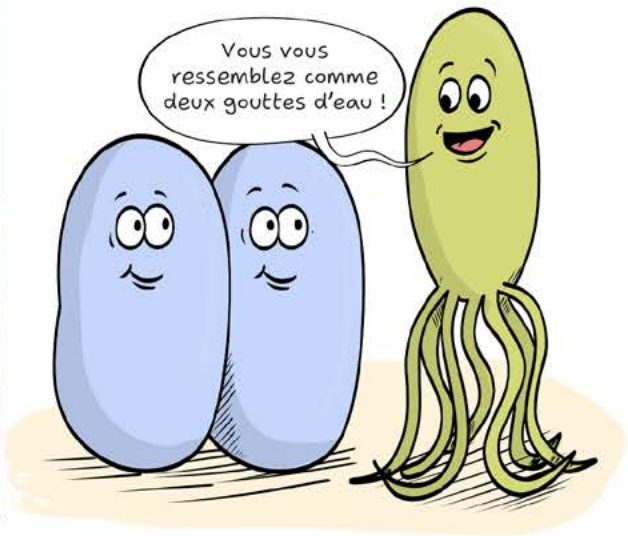
Pendant ce temps, la bactérie s'allonge et sa membrane se tire progressivement vers le centre, prête à se diviser en deux.



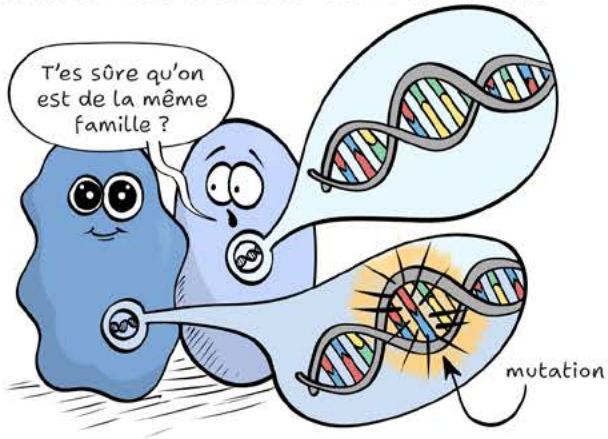
[1]Protéines : Outils permettant à la cellule de fonctionner.



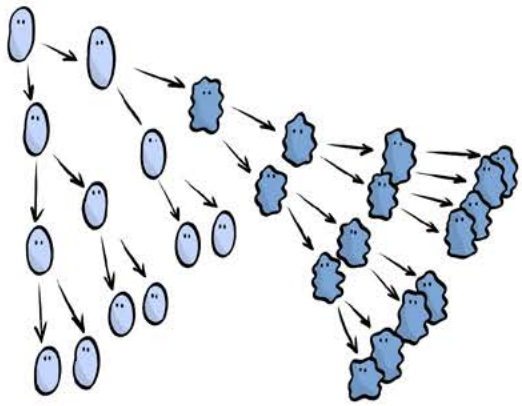
Deux nouvelles bactéries identiques apparaissent.



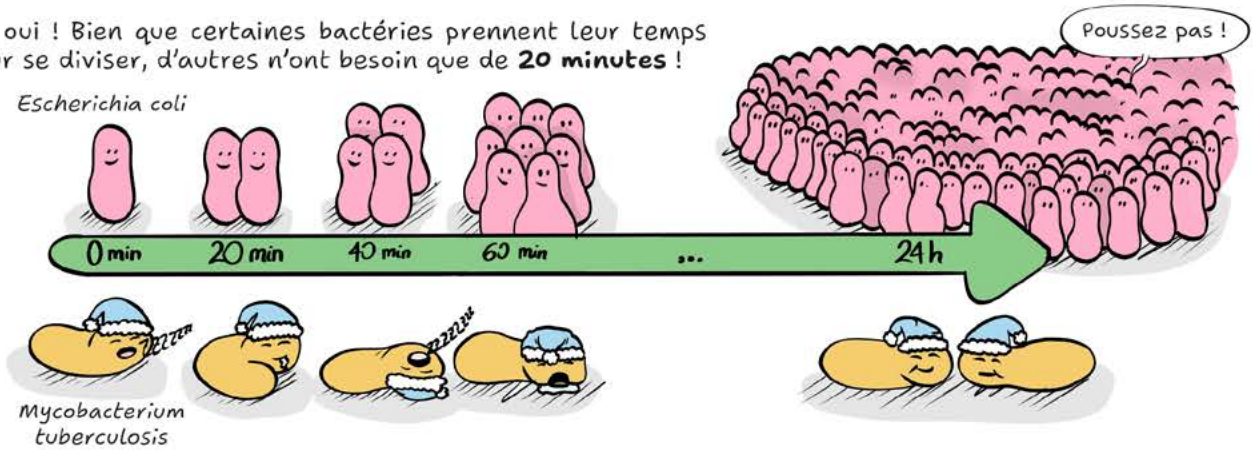
Mais tout n'est pas toujours parfait. Des erreurs peuvent survenir pendant la copie de l'ADN, créant des **mutations** qui peuvent changer l'apparence ou le fonctionnement de la bactérie.



Si une mutation aide la bactérie à mieux s'adapter à son environnement, elle sera transmise à sa descendance. Et ça peut aller très (très) vite !

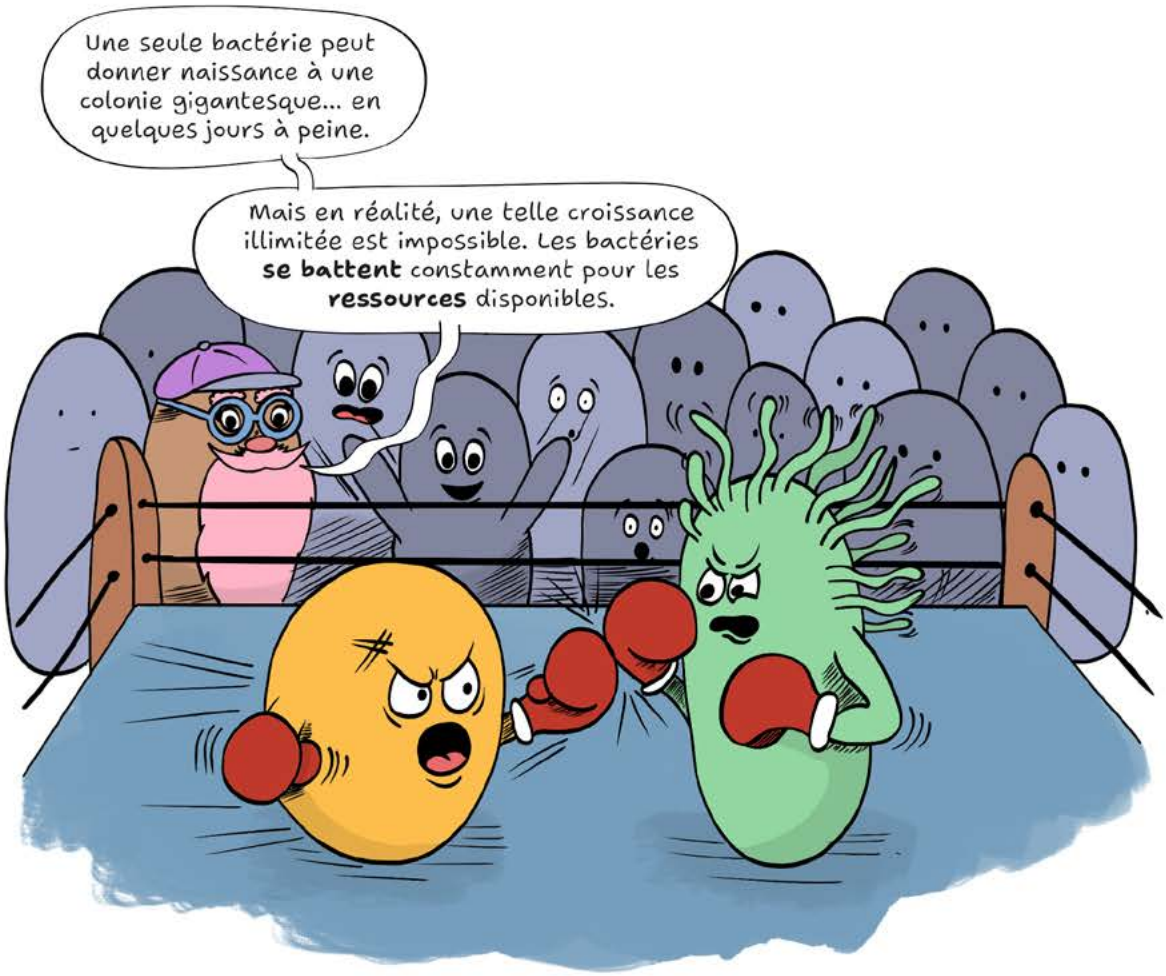


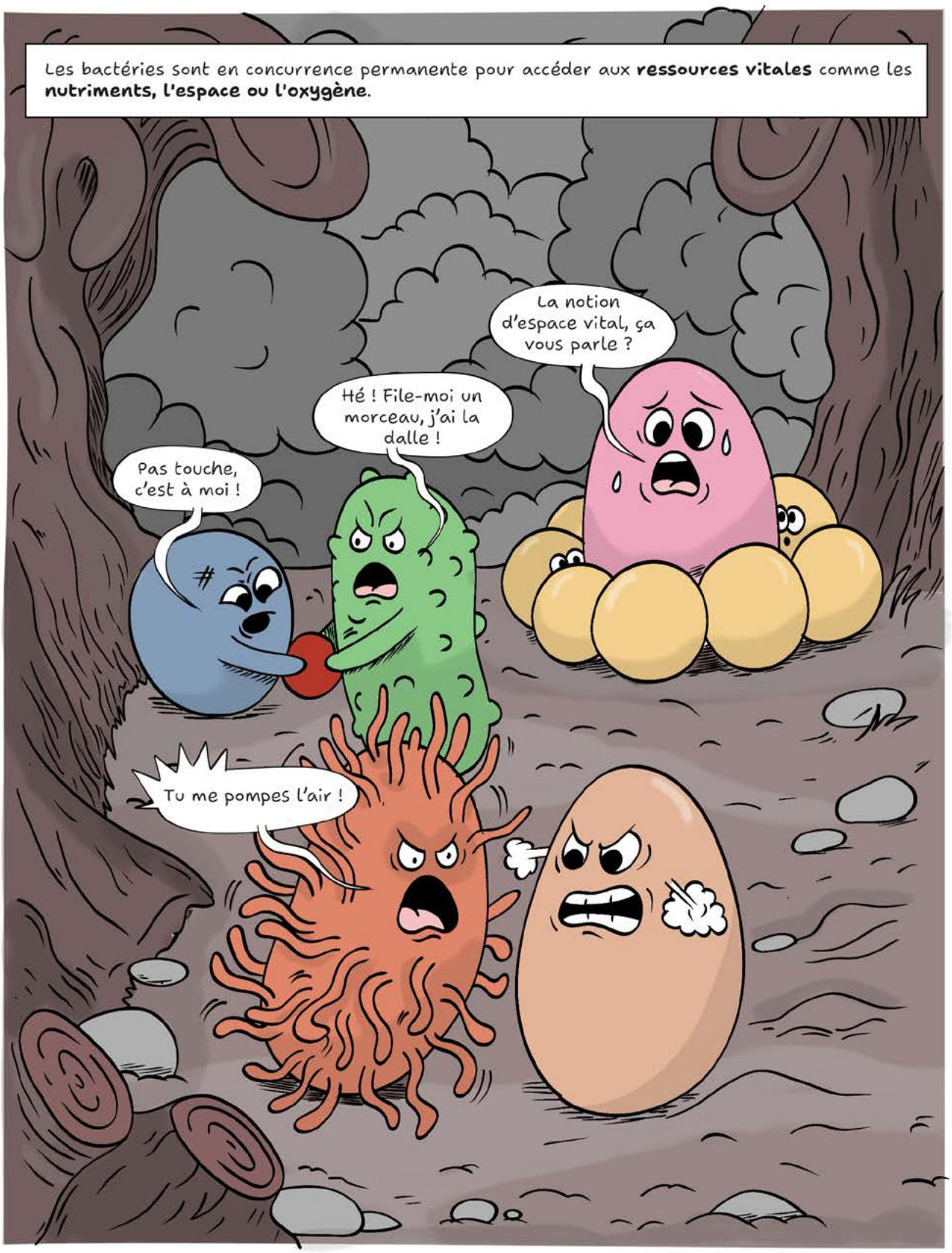
Eh oui ! Bien que certaines bactéries prennent leur temps pour se diviser, d'autres n'ont besoin que de **20 minutes** !

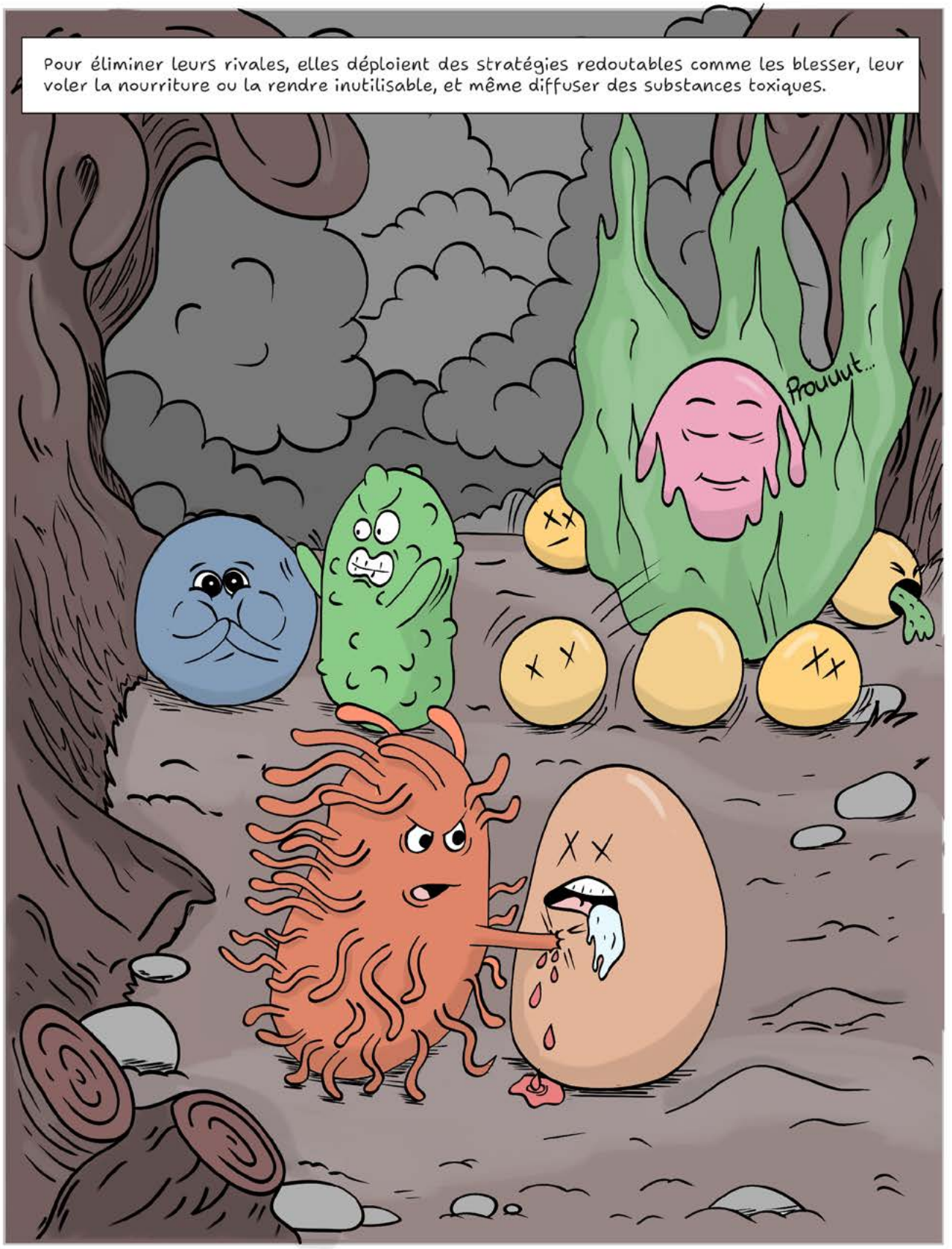


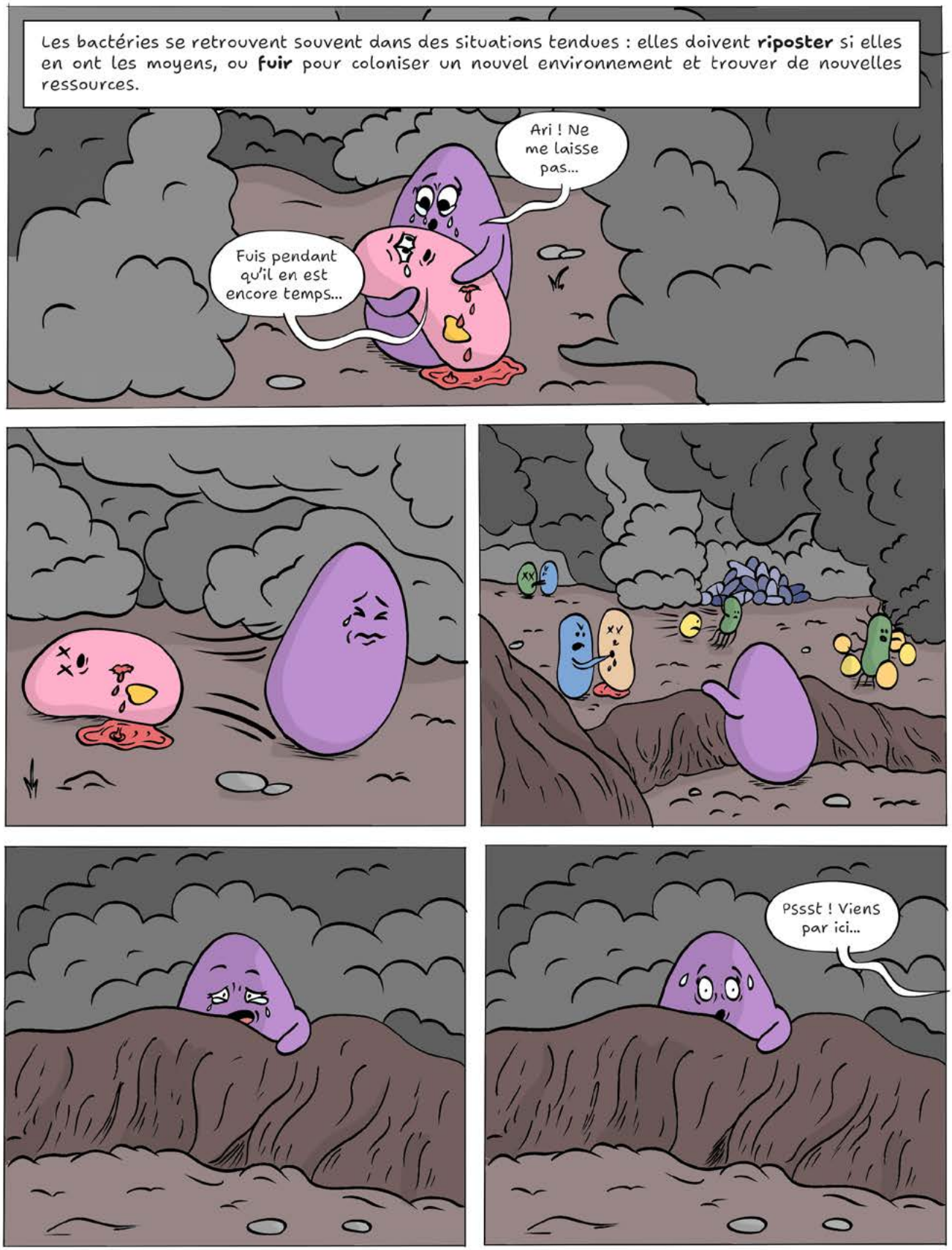

Maman ! J'ai faim !
Ça pue par ici !
Dégage !
%$@&!!!
En seulement **3 jours**, une bactérie qui se multiplie toutes les 20 minutes pourrait créer une colonie plus lourde que la Terre !

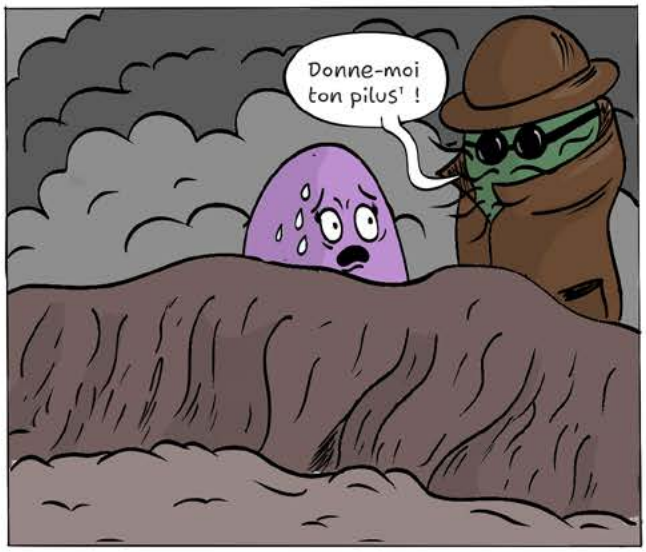
LUTTER POUR SURVIVRE



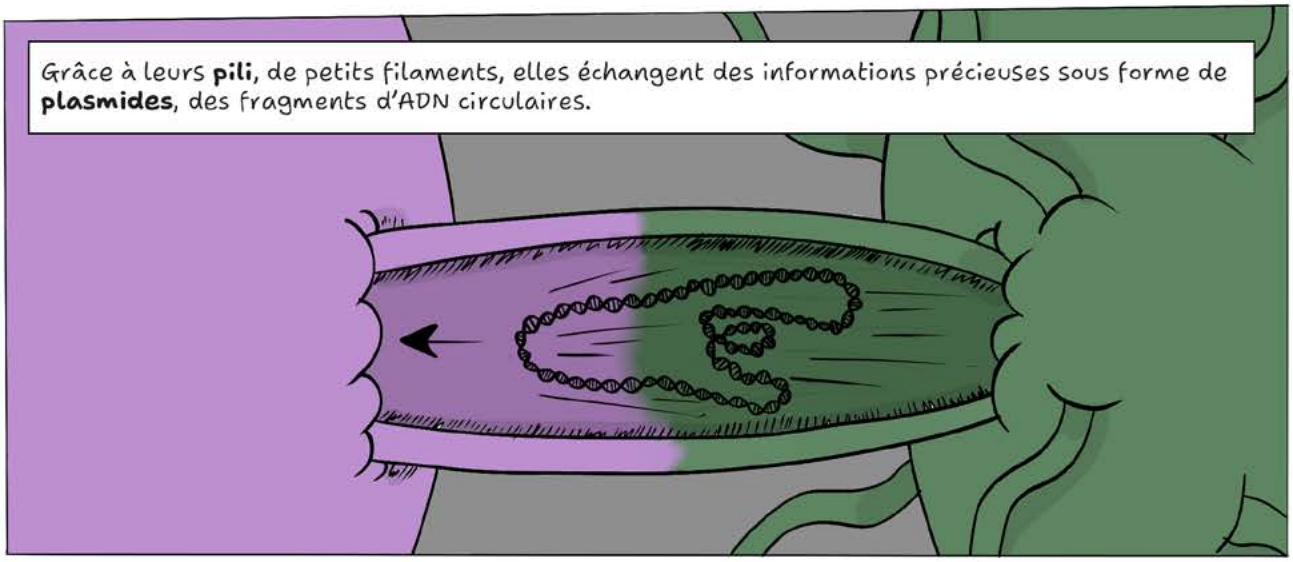

Les bactéries sont en concurrence permanente pour accéder aux **ressources vitales** comme les **nutriments, l'espace ou l'oxygène**.
La notion d'espace vital, ça vous parle ?
Hé ! File-moi un morceau, j'ai la dalle !
Pas touche, c'est à moi !
Tu me pompes l'air !


Pour éliminer leurs rivales, elles déploient des stratégies redoutables comme les blesser, leur voler la nourriture ou la rendre inutilisable, et même diffuser des substances toxiques.
Prouuut...


Les bactéries se retrouvent souvent dans des situations tendues : elles doivent **riposter** si elles en ont les moyens, ou **fuir** pour coloniser un nouvel environnement et trouver de nouvelles ressources.
Ari ! Ne me laisse pas...
Fuis pendant qu'il en est encore temps...
XX
XY
Pssst ! Viens par ici...





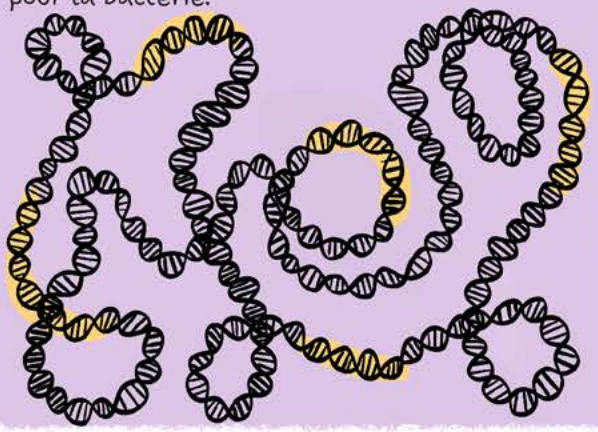




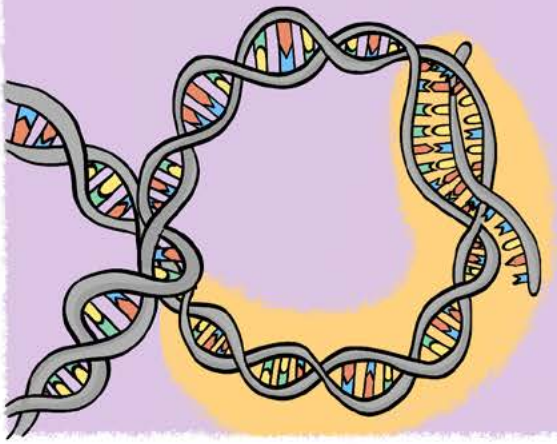


[1] Pilus : Singulier de pili.

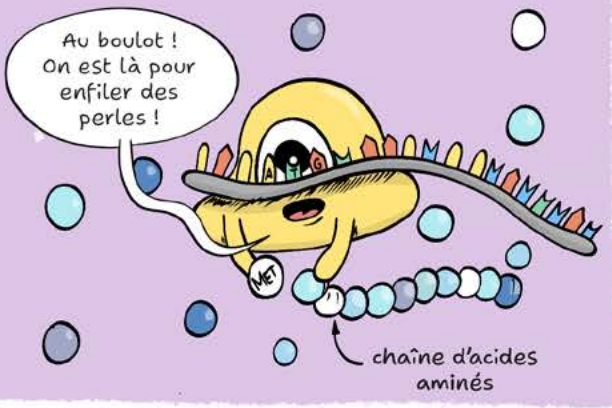
Cet ADN peut contenir des **gènes**, des segments qui donnent les instructions pour fabriquer des **protéines**, de précieux outils pour la bactérie.



Pour exploiter ces informations, la bactérie doit d'abord **recopier** le gène d'intérêt, car l'ADN ne peut pas être utilisé directement.

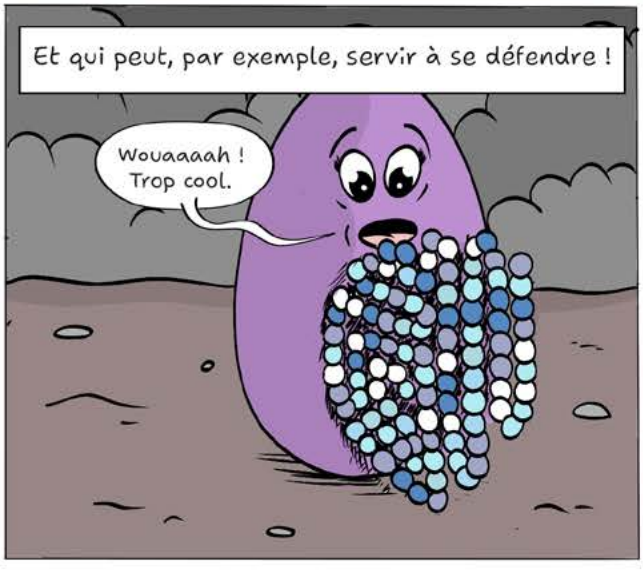


Cette copie du gène est ensuite **décodée par un ribosome**, un traducteur qui lit les lettres de l'ADN et les réécrit en une suite de perles appelées **acides aminés**.

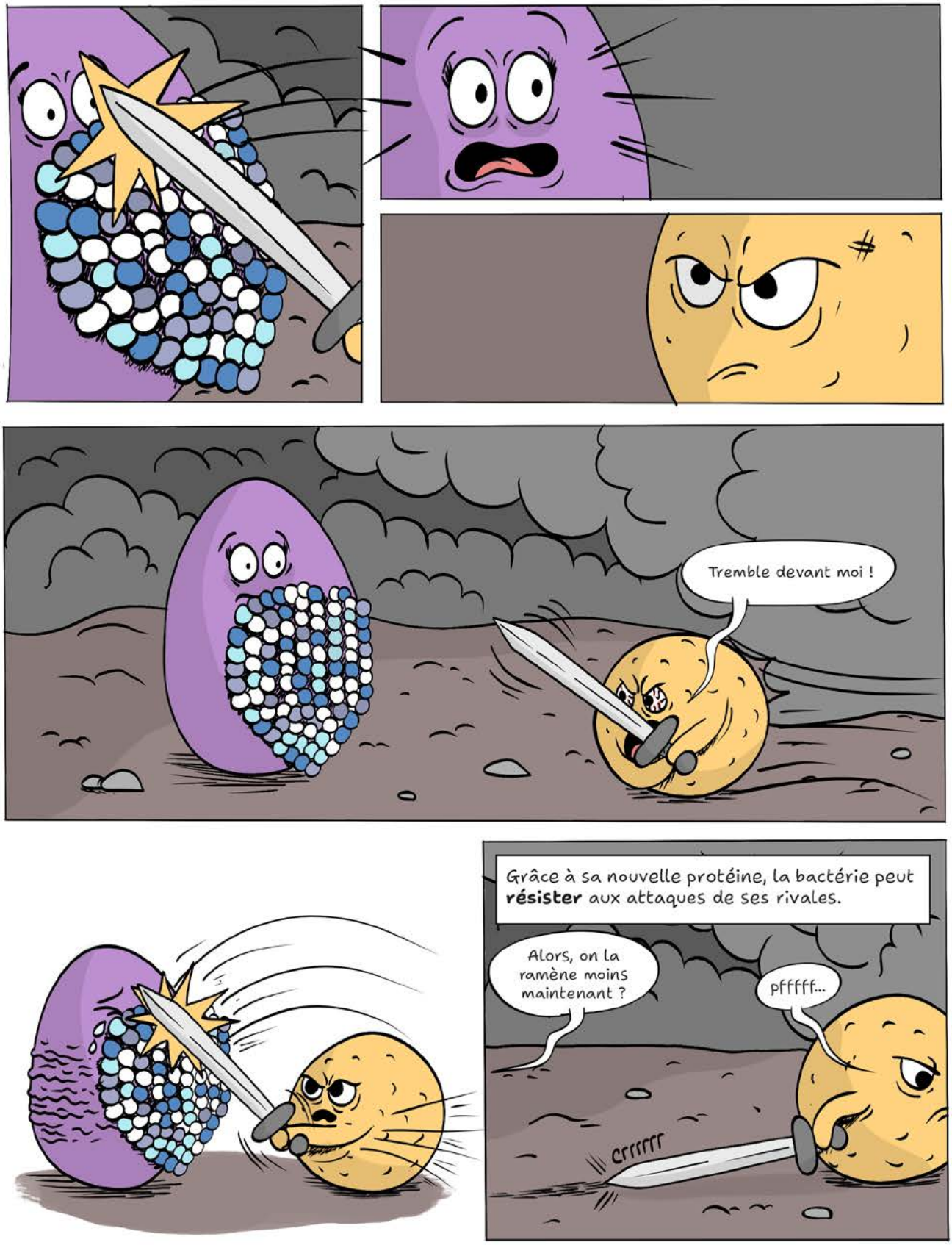


La chaîne se plie alors sur elle-même et devient une **protéine**, un outil microscopique dont la fonction dépend de l'enchaînement des perles et de la façon dont elle se replie...







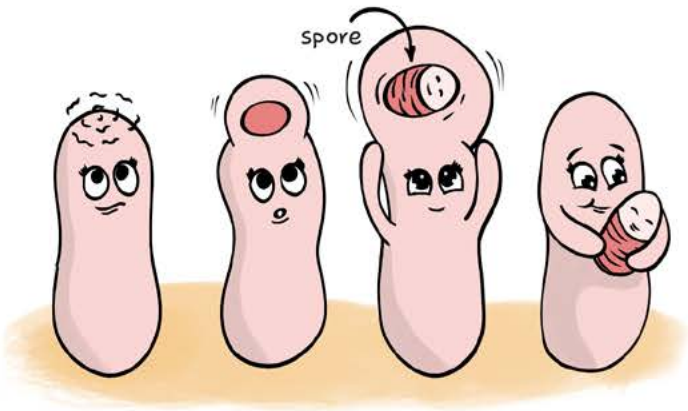

Tremble devant moi !
Grâce à sa nouvelle protéine, la bactérie peut **résister** aux attaques de ses rivales.
Alors, on la ramène moins maintenant ?
pfffff...
crrrrrr

LA BELLE AU BOIS DORMANT



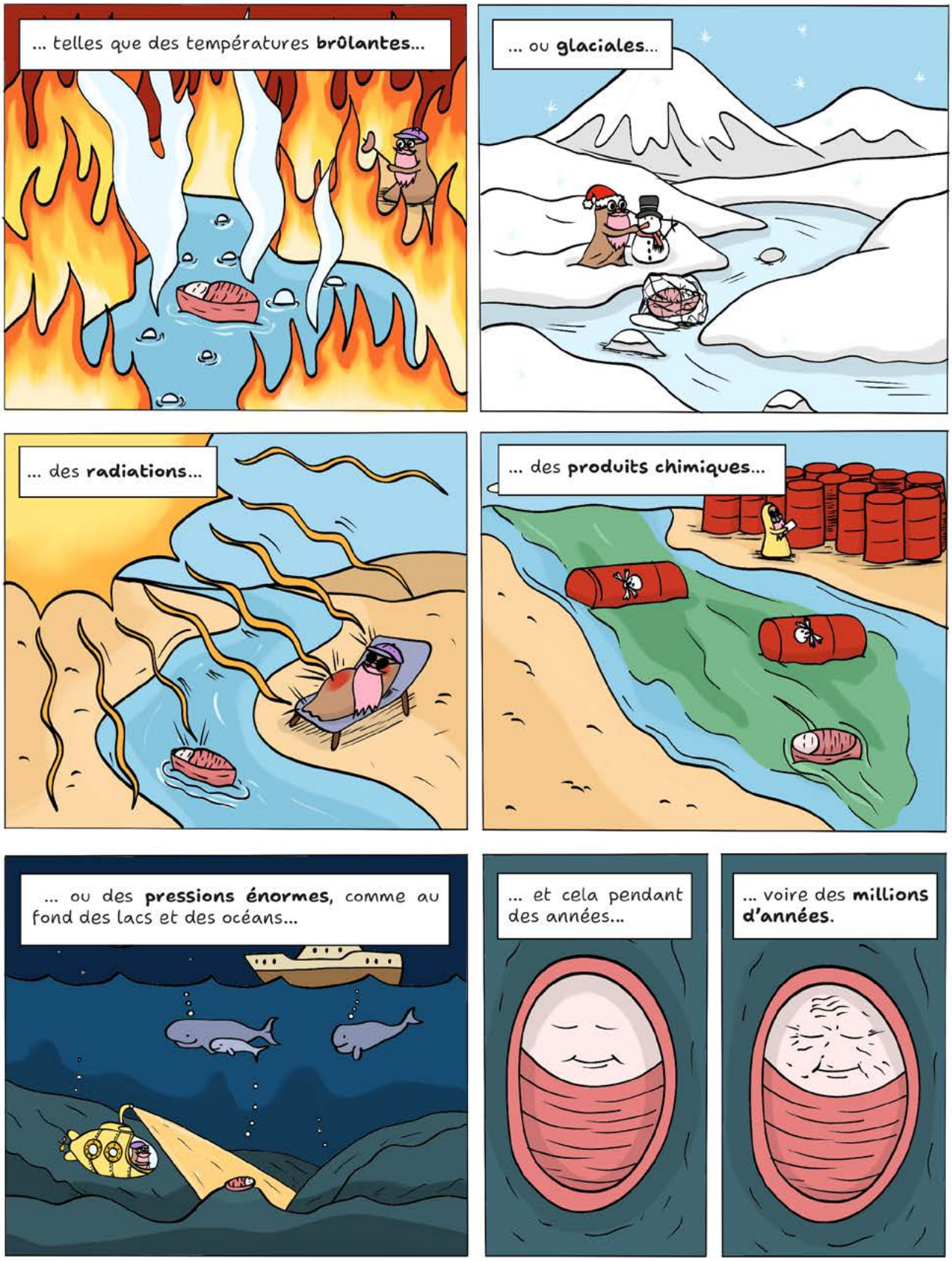
Lorsque les conditions deviennent **hostiles**, comme du fait du manque de nourriture, des températures élevées, de la sécheresse ou encore la présence de produits chimiques...

Certaines bactéries produisent des **spores**, une forme dormante capable de résister à presque tout.

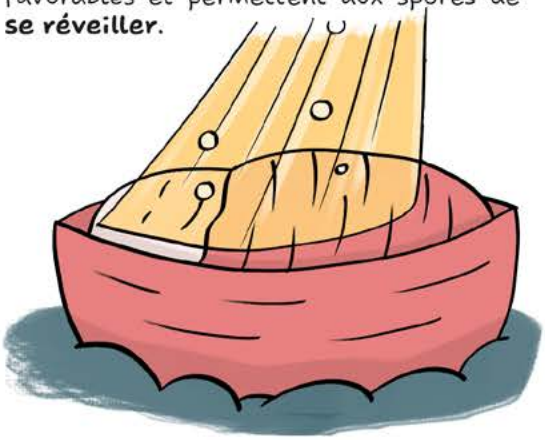


Ces spores peuvent **être transportées très loin**...

... et **survivre dans des environnements extrêmes**...

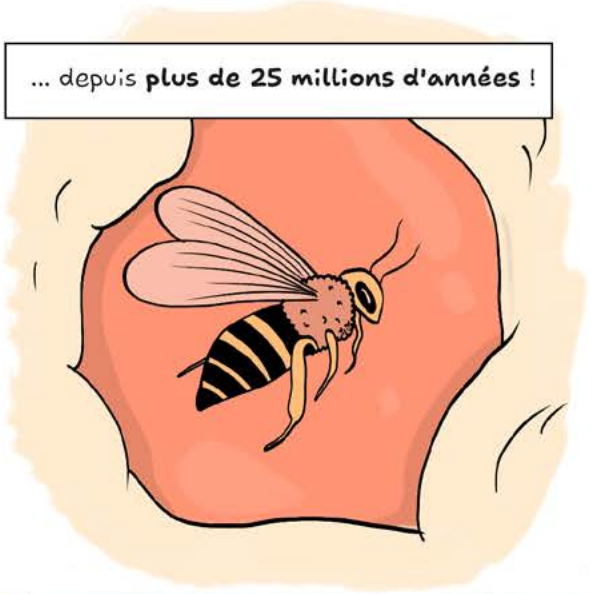

... telles que des températures **brûlantes**...
... ou **glaciales**...
... des **radiations**...
... des **produits chimiques**...
... ou des **pressions énormes**, comme au fond des lacs et des océans...
... et cela pendant des années...
... voire des **millions d'années**.

Jusqu'à ce que les conditions redeviennent favorables et permettent aux spores de **se réveiller**.

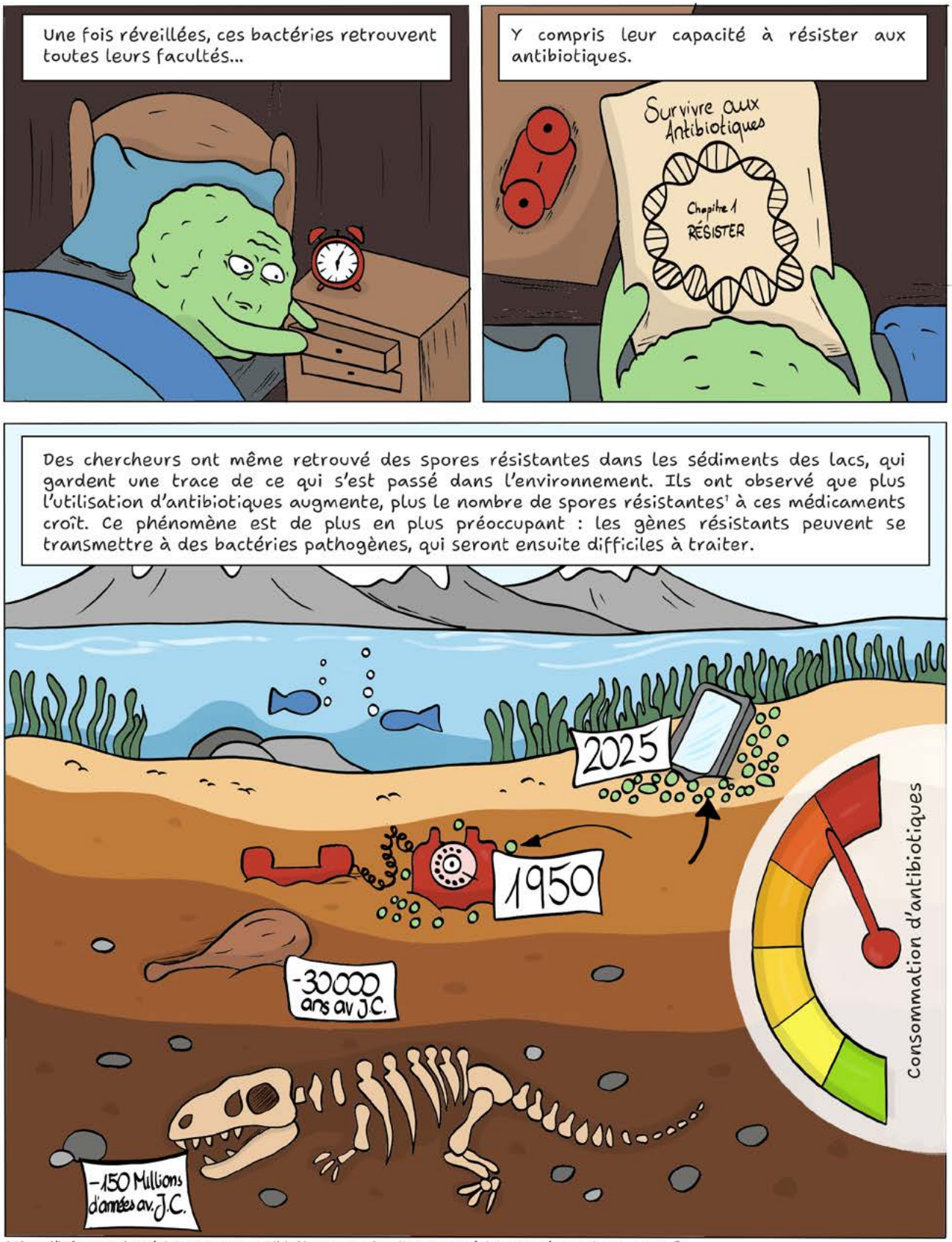








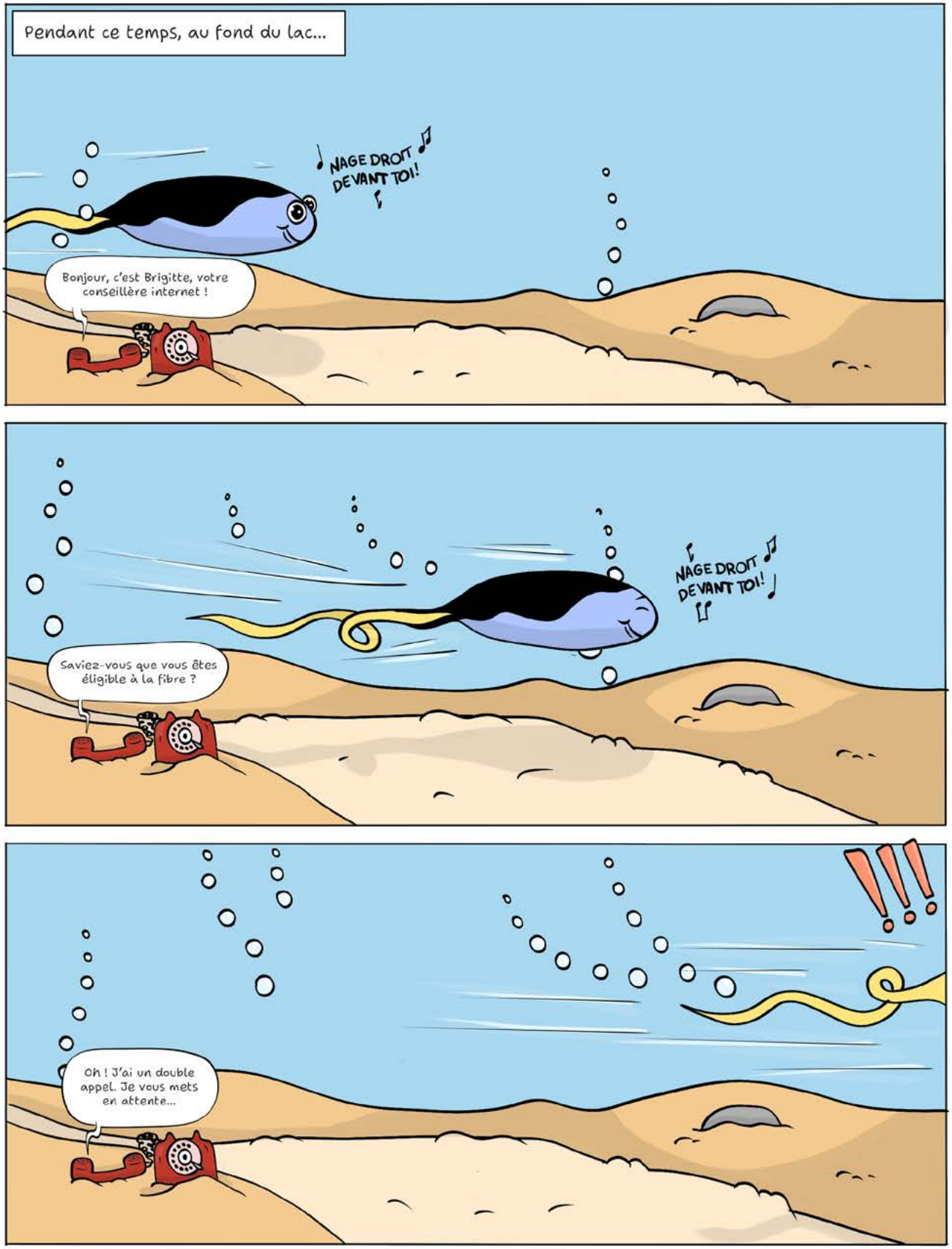


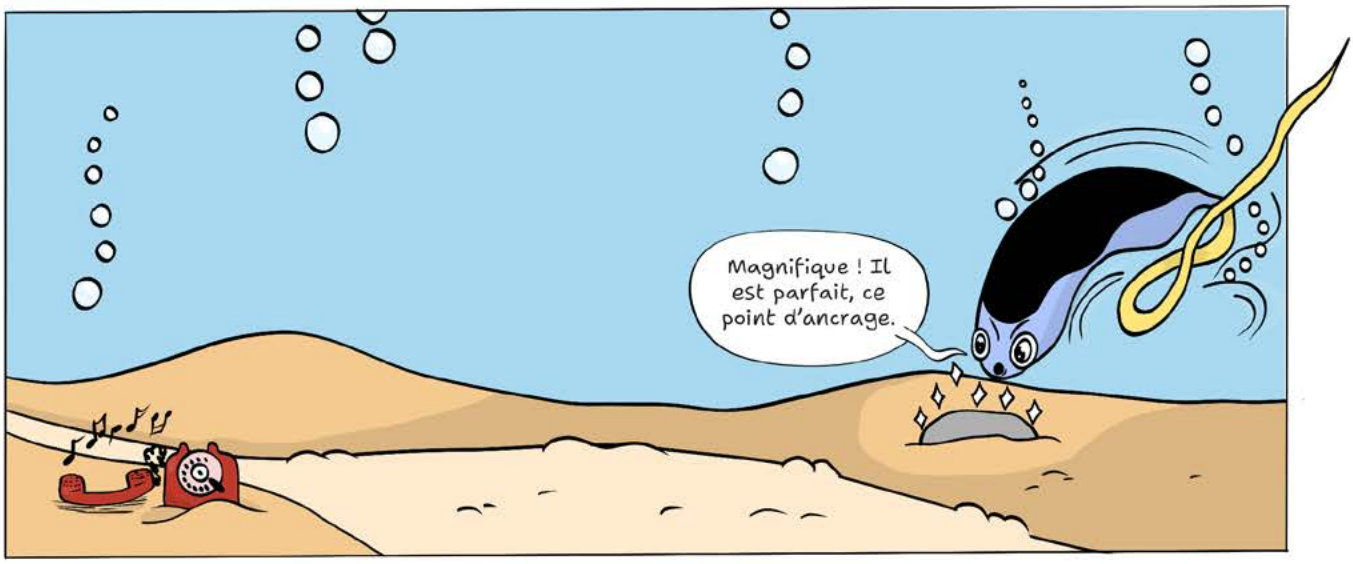


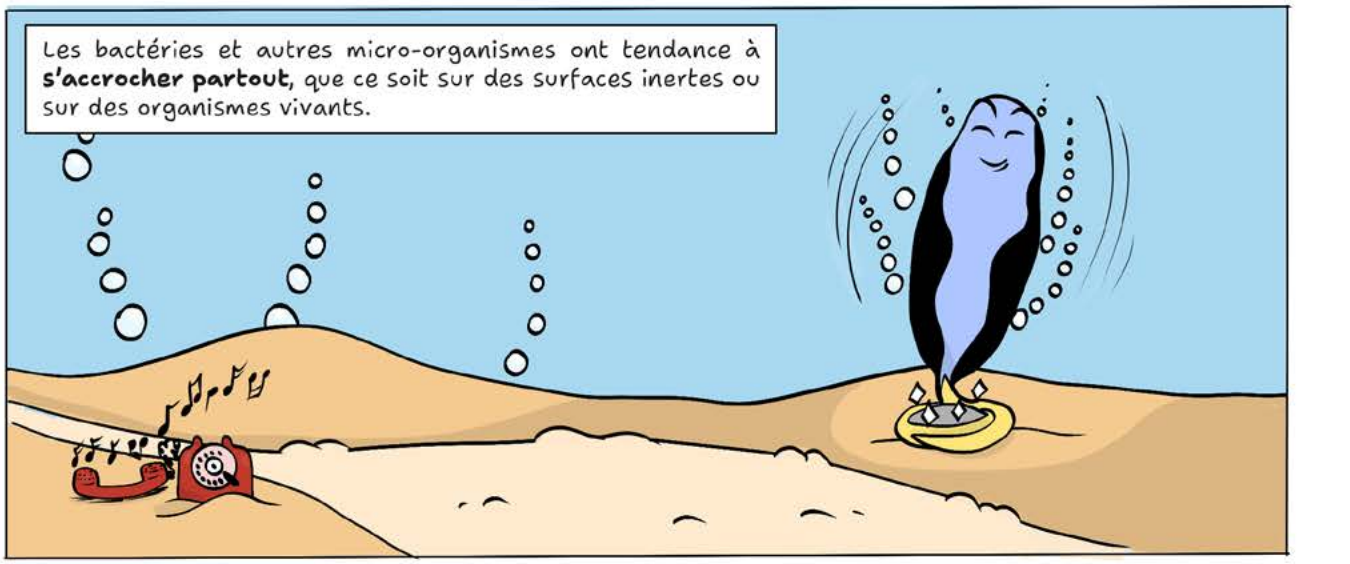
[1] Plus d'infos sur la résistance aux antibiotiques au chapitre « La résistance s'organise », page 81.

UNE FORTERESSE IMPRENABLE




Pendant ce temps, au fond du lac...
NAGE DROIT DEVANT TOI!
Bonjour, c'est Brigitte, votre conseillère internet !
NAGE DROIT DEVANT TOI!
Saviez-vous que vous êtes éligible à la fibre ?
!!!
Oh ! J'ai un double appel. Je vous mets en attente...

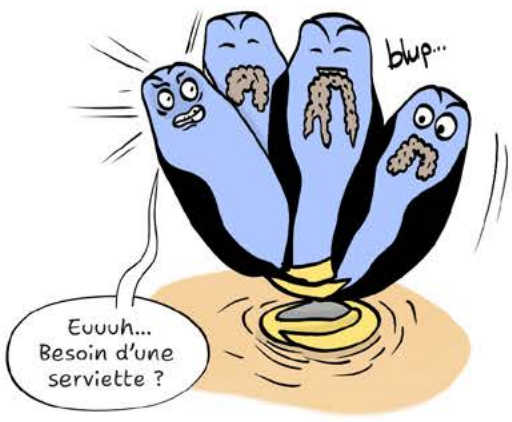




Une fois installées, **elles se multiplient**...



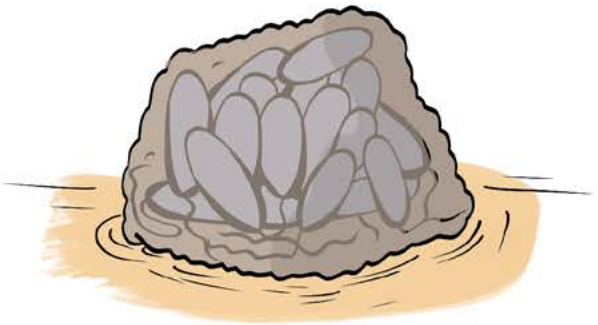
... et produisent une substance collante appelée « *matrice extracellulaire* ».



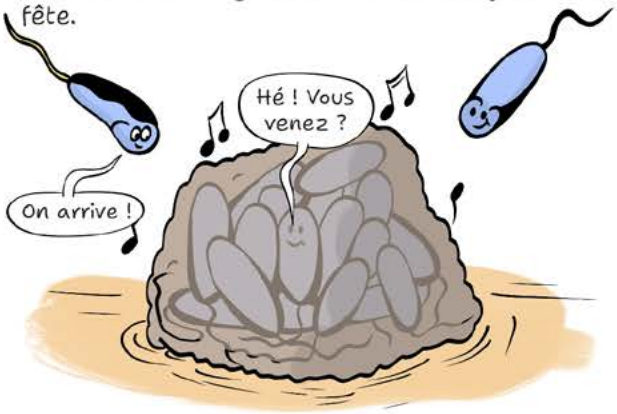
Cette substance collante les maintient serrées les unes contre les autres.



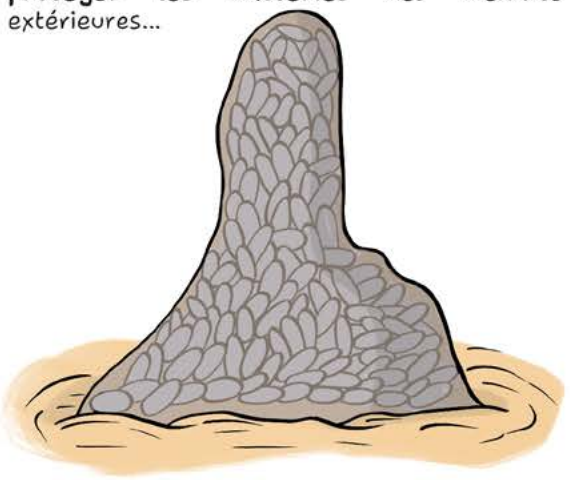
Ensemble, les bactéries et la matrice forment ce qu'on appelle un **biofilm**.



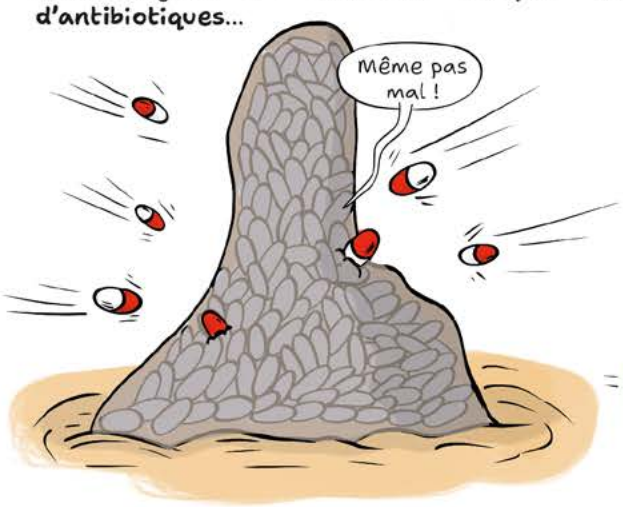
Au fil du temps, ce biofilm s'agrandit, soit parce que les bactéries se multiplient, soit parce que d'autres micro-organismes viennent rejoindre la fête.



Il devient alors une forteresse, capable de **protéger les bactéries** des menaces extérieures...



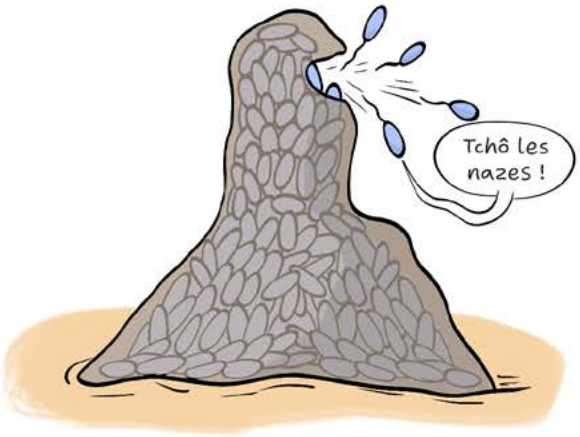
Qu'il s'agisse de molécules toxiques ou **d'antibiotiques**...



Ou de **globules blancs**, ces cellules du système immunitaire **chargées d'éliminer les intrus** présents dans le corps.



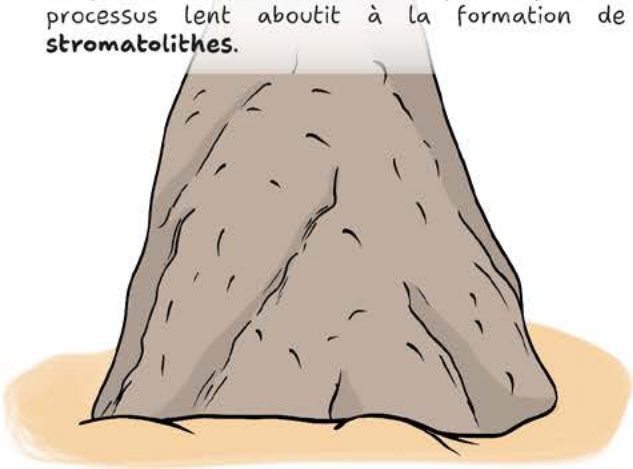
Mais le biofilm n'est pas une structure figée. Certaines bactéries peuvent s'en détacher pour coloniser d'autres endroits...



Si le biofilm reste en place, il continue à **accumuler de nouvelles couches** de bactéries et de matrice extracellulaire.

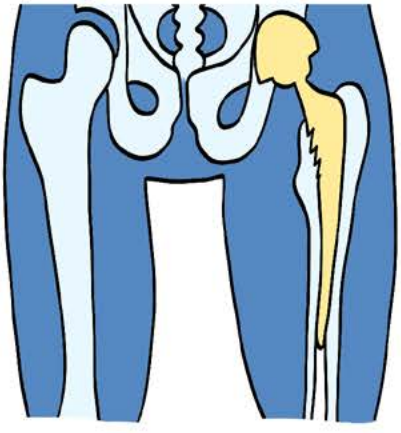


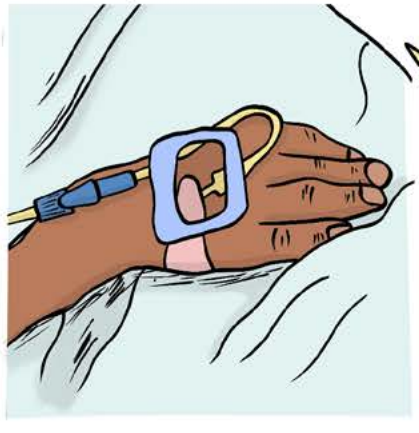
Au fil du temps, ces couches successives se compactent et se minéralisent peu à peu. Ce processus lent aboutit à la formation de **stromatolithes**.





Mais cette ténacité pose problème pour les humains. Les biofilms peuvent se former sur les **implants médicaux, les cathéters, ou même sur les dents**, sous forme de plaque dentaire. Une fois installés, ils sont très difficiles à éliminer et peuvent provoquer des **infections chroniques ou des caries**. C'est pourquoi une bonne hygiène et des soins adaptés sont essentiels.



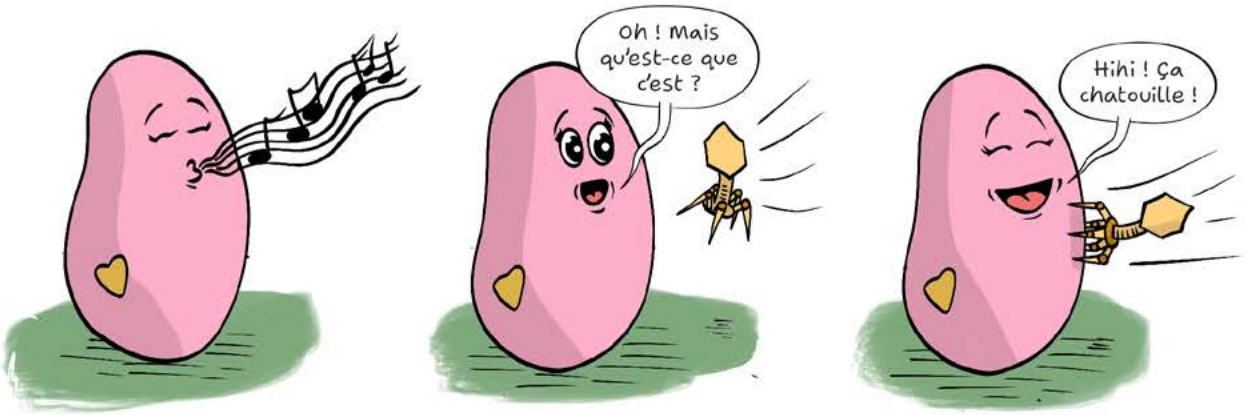


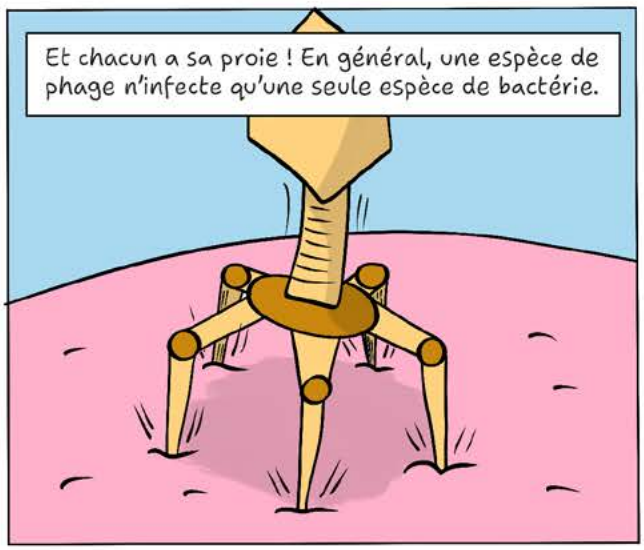


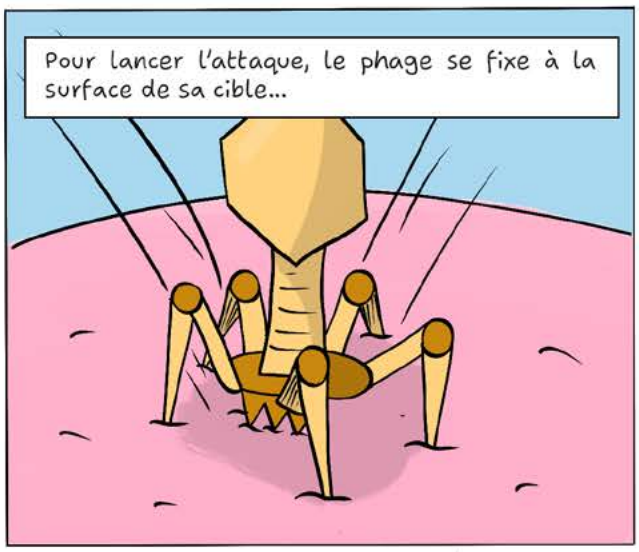
ALLÔ DOCTEURE ?
J'AI ATTRAPÉ UN VIRUS !



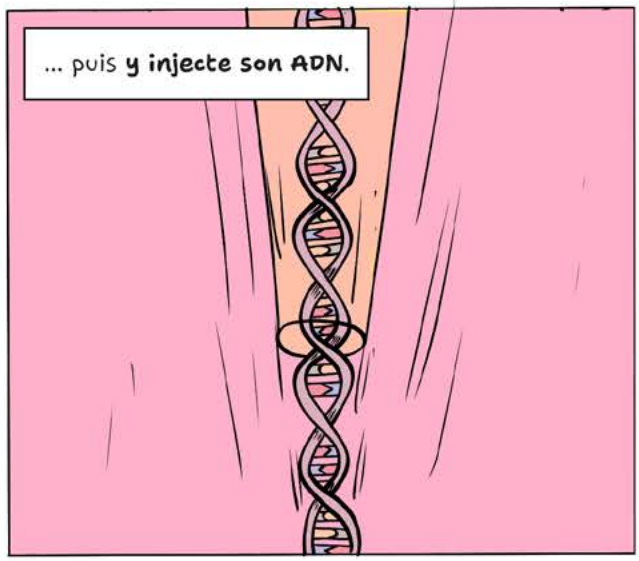
Les phages sont des virus **spécialisés**. Ils ne s'attaquent qu'aux bactéries.





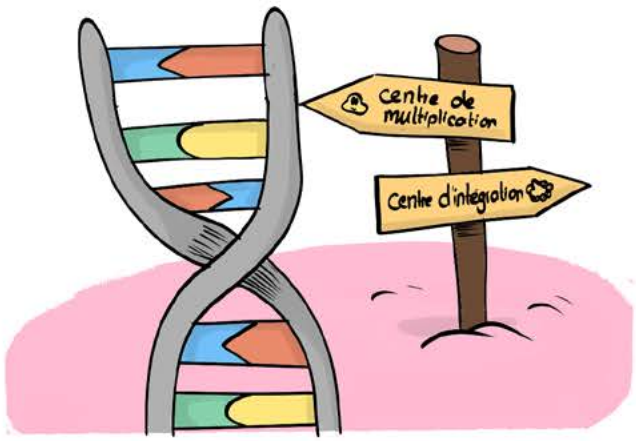






Ça fait mal !

Une fois à l'intérieur, cet ADN peut suivre deux chemins différents.

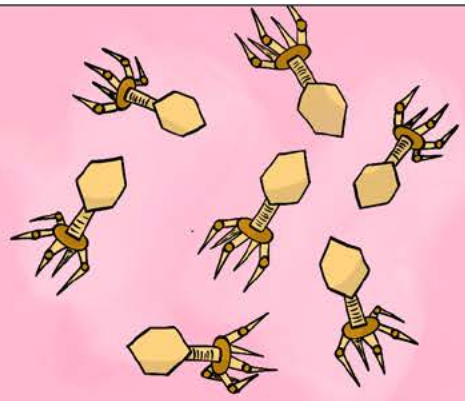


Dans le premier cas, il peut utiliser les protéines de la bactérie pour se multiplier...

Il est nouveau ce code, non ?

Ouais ! C'est sympa un peu de variété au travail !

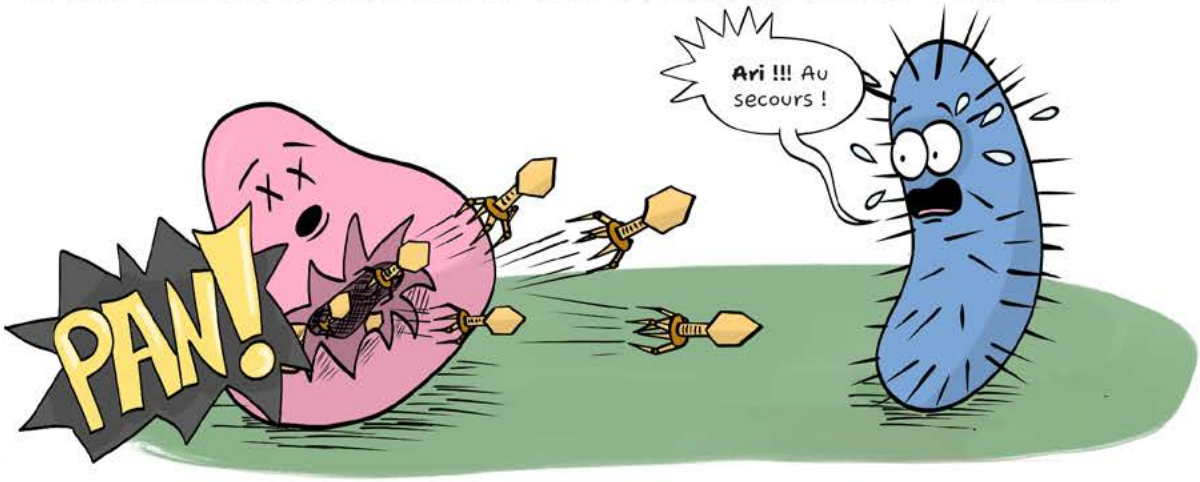
... et fabriquer plein de nouveaux phages.

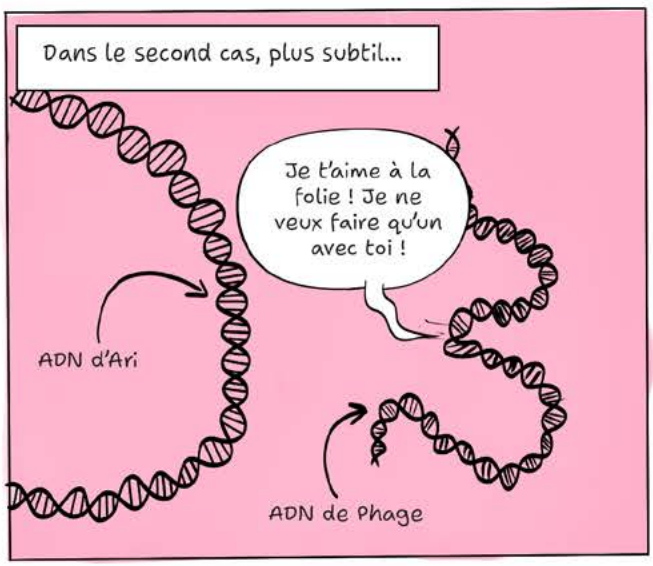


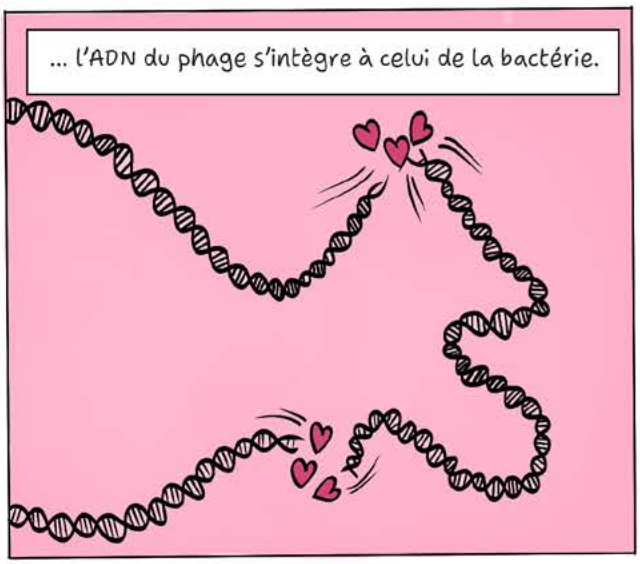
Je me sens ballonnée...

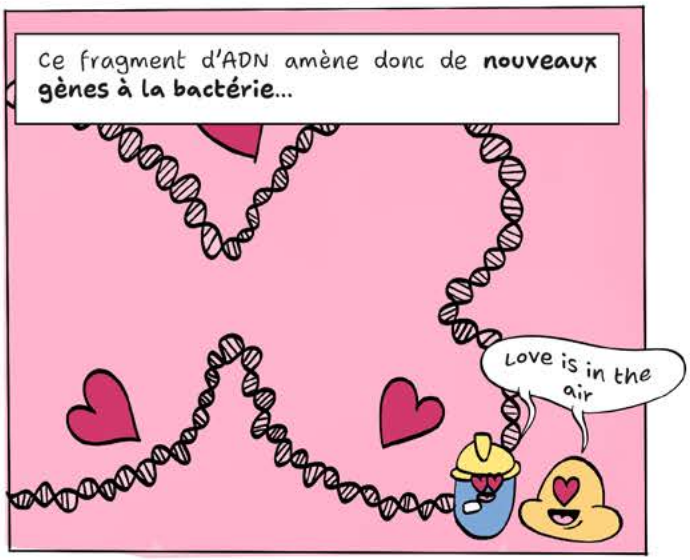
Qu'est-ce qui t'arrives Ari ? Tu gonfles à vue d'œil !

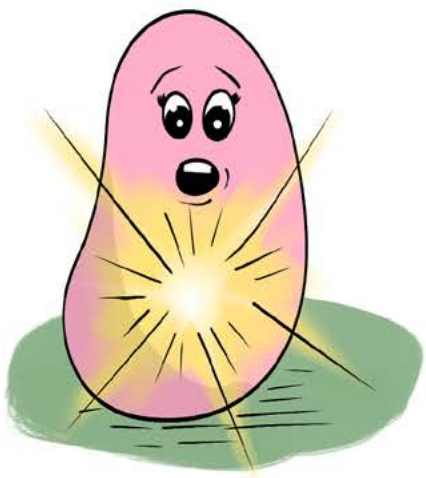
Une fois leur multiplication terminée, les nouveaux phages quittent la bactérie... en la faisant exploser ! La cellule se déchire littéralement, libérant une armée de phages prêts à infecter d'autres bactéries.





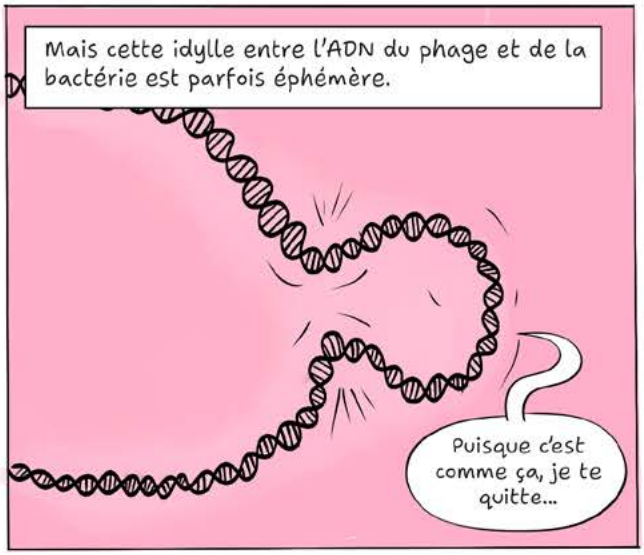


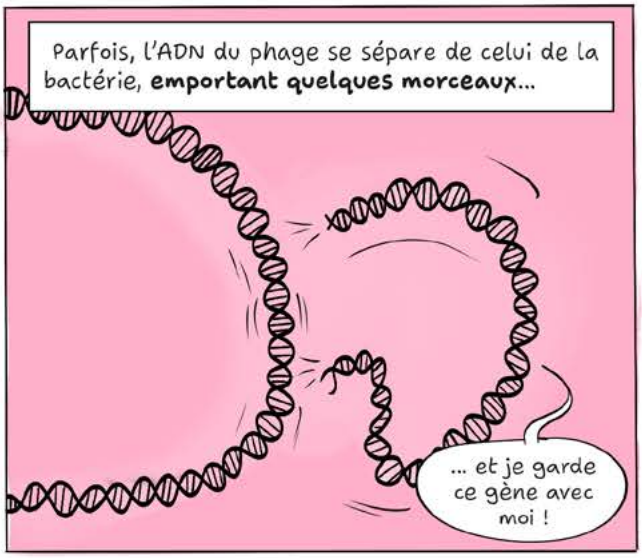


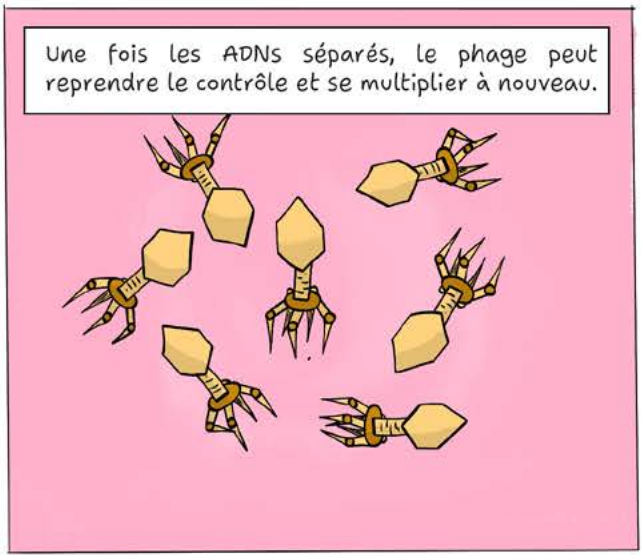


Et il peut arriver que certains gènes fournissent de précieux outils à la bactérie.

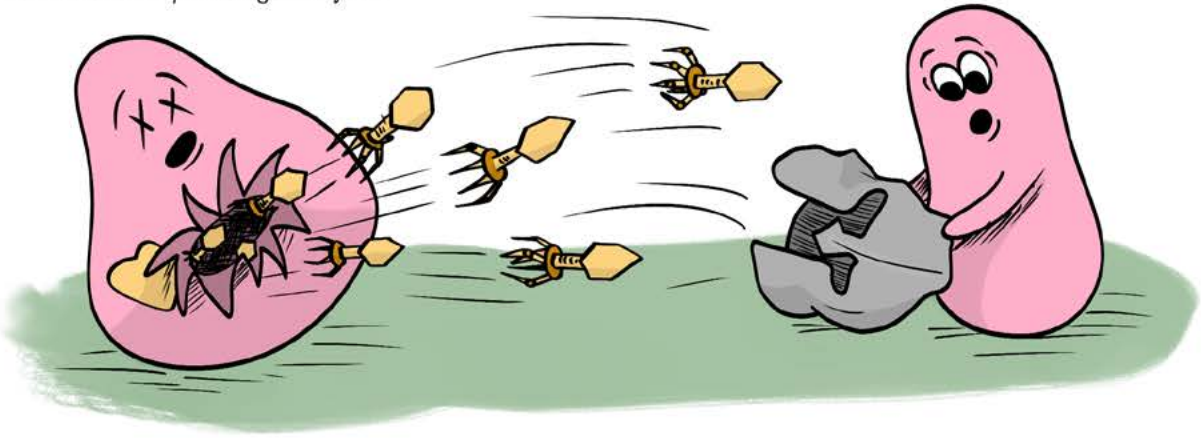






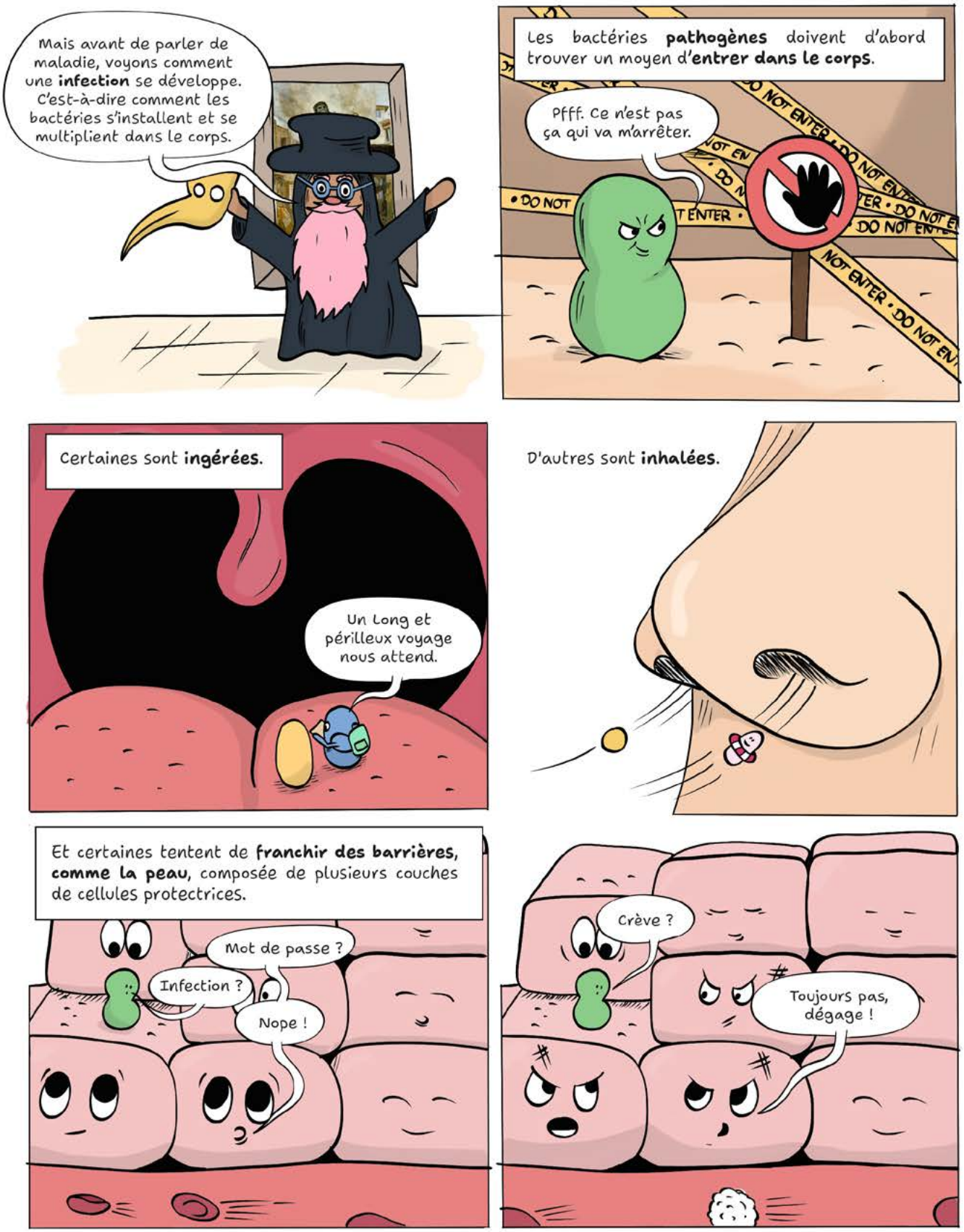


Aussitôt libérés, les phages repartent infecter de nouvelles bactéries, et le cycle recommence. Si un phage emporte quelques gènes, il peut les transmettre à sa prochaine victime, offrant ainsi à cette nouvelle bactérie de nouvelles capacités génétiques !



LA MALADIE FRAPPE




Mais avant de parler de maladie, voyons comment une **infection** se développe. C'est-à-dire comment les bactéries s'installent et se multiplient dans le corps.
Les bactéries **pathogènes** doivent d'abord trouver un moyen d'**entrer dans le corps**.
Pfff. Ce n'est pas ça qui va m'arrêter.
DO NOT ENTER
Certaines sont **ingérées**.
Un long et périlleux voyage nous attend.
D'autres sont **inhalées**.
Et certaines tentent de **franchir des barrières, comme la peau**, composée de plusieurs couches de cellules protectrices.
Mot de passe ?
Infection ?
Nope !
Crève ?
Toujours pas, dégage !

Mais ces barrières peuvent être contournées en cas de **blessure** ou de **morsure**.

Tu disais ?

Les insectes et les tiques peuvent aussi transmettre des bactéries par leur **piqûre**.

Merci l'ami !

Un autre obstacle est le **microbiote** : des bactéries qui cohabitent avec leur hôte[1] sur la peau, dans la bouche ou encore dans le tube digestif.

Poussez-vous. Laissez-moi passer.

Hé ! Attends ton tour !

Encore de la salade. Il est au régime ?

Moi j'aime bien la laitue.

Une fois dans le corps, les bactéries vont chercher des endroits confortables, où elles pourront se nourrir et se multiplier.

Sympa la déco !

Tout ce rouge, c'est quand même un peu agressif.

Mais avant de s'installer, elles doivent d'abord faire face aux défenses du corps, appelées **« système immunitaire »**. En particulier les **globules blancs**, véritables policiers en patrouille.

Halte ! Qui va là ?

Bonjour ! Nous sommes en route pour explorer les environs.

Le rôle des globules blancs est de **repérer** les intrus...

Vous n'avez rien à faire là !

Mais on venait juste visiter...

Gardes ! Arrêtez-les!

[1] Un hôte est un organisme abritant en lui d'autres êtres vivants.

... et de les **éliminer** pour éviter qu'ils ne se propagent dans le corps. Alors, pour leur échapper, mieux vaut rester discret et passer inaperçu !



Certaines se cachent dans des **biofilms** ou se couvrent d'une **capsule** protectrice, qui agit comme une cape d'invisibilité.



D'autres **se réfugient à l'intérieur des cellules** du corps, à l'abri des globules blancs.



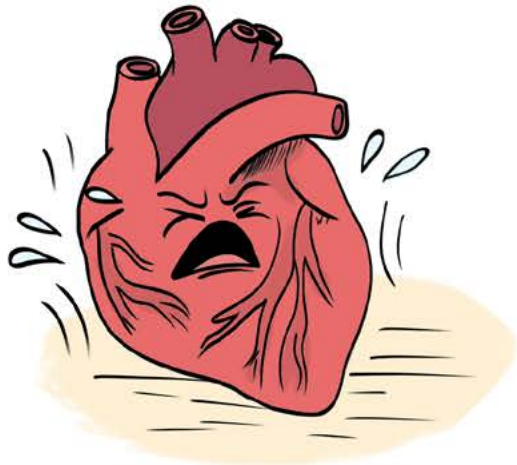
En échappant au système immunitaire, les bactéries peuvent s'installer dans le corps et **provoquer une maladie**. Parfois, c'est la production de **toxines** qui cause les premiers symptômes.



Par exemple, *Clostridium tetani*, la bactérie du **tétanos**, produit une toxine qui induit de violentes contractions musculaires, notamment dans le dos et dans la mâchoire.

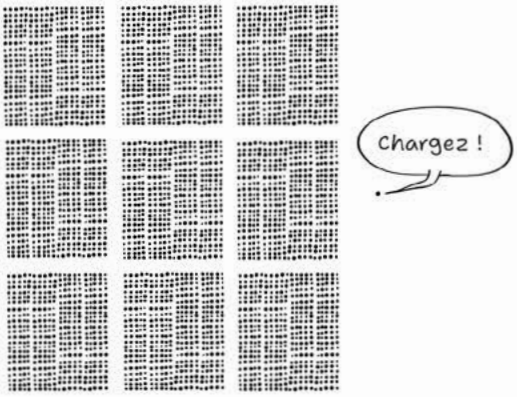


La toxine de la **diphtérie**, elle, peut atteindre le cœur... et parfois entraîner la mort.

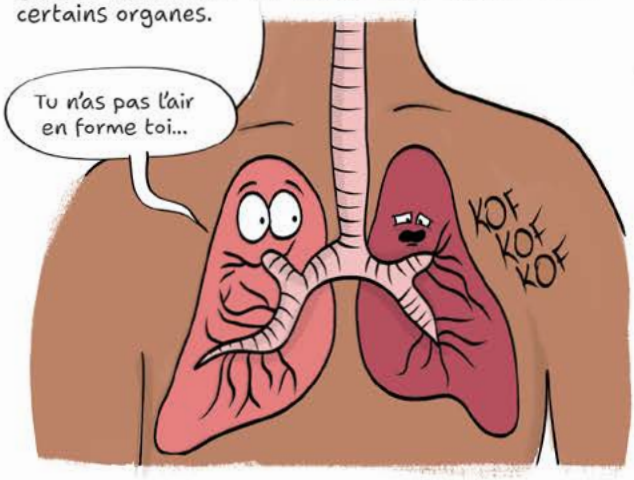


Une autre cause de maladie survient quand les bactéries **envahissent** directement les organes du corps.





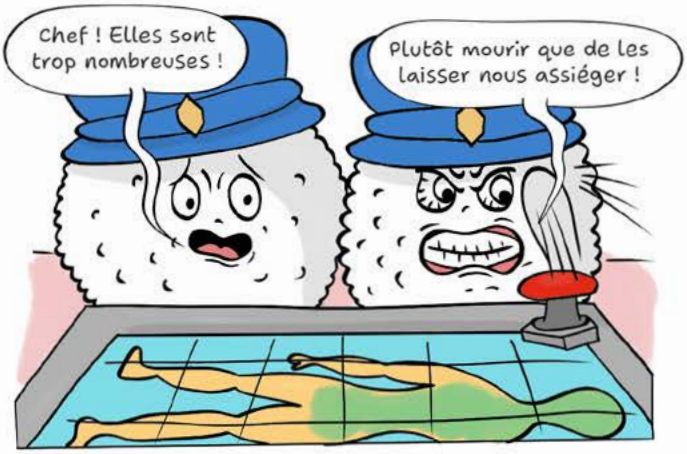
En se propageant ainsi, elles peuvent provoquer de graves symptômes et même faire dysfonctionner certains organes.



Cette riposte excessive du système immunitaire déclenche **une forte inflammation**[1], qui peut endommager les tissus sains et provoquer une **défaillance de plusieurs organes**...



Mais parfois, ce n'est pas seulement la bactérie qui fait des dégâts... C'est le corps lui-même qui réagit trop violemment !

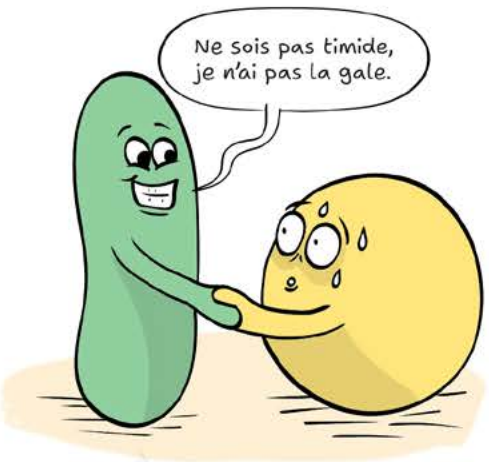




[1] L'inflammation est une réaction du corps à une infection ou une blessure. Elle aide le système immunitaire à agir rapidement et peut provoquer chaleur, rougeur, gonflement ou douleur.

Le décor étant posé, revenons à la **peste**, qui est causée par une bactérie appelée *Yersinia pestis*.

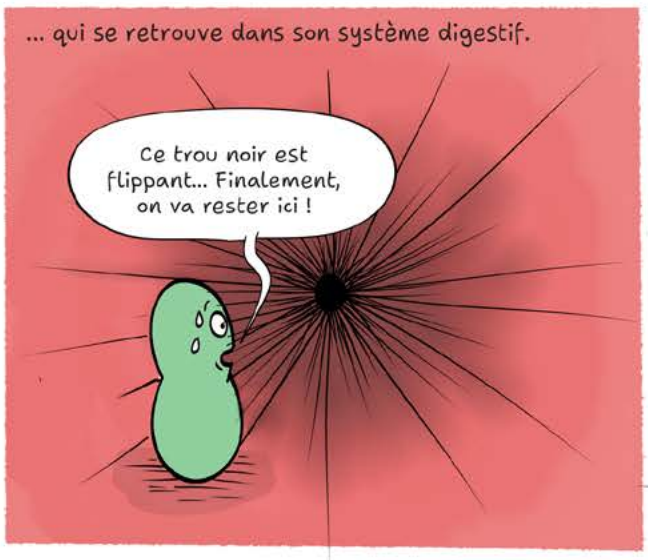
Cette bactérie vit surtout dans les puces qui parasitent **les rongeurs**.













À cause de ce blocage, la puce ne peut plus digérer le sang : son estomac reste désespérément vide.

Il est à croquer lui !

Oui, en plus j'ai la dalle.

Affamée, elle multiplie les tentatives de repas, espérant enfin se nourrir.

MIAM !

Mais lorsqu'elle pique une nouvelle proie, son estomac, déjà bouché, se remplit trop vite.

Délicieux !

Je... je ne me sens pas très bien...

Incapable de digérer, elle finit par régurgiter son repas directement dans la plaie...

Bleuuurk !

... y compris les bactéries *Yersinia pestis*, qui pénètrent alors dans le corps de la nouvelle proie.

Tiens, voilà une nouvelle maison ! On aura plus de place.

Une fois entrées, les bactéries se faufilent dans le corps en empruntant les grands réseaux de circulation : la **lymphe**[1] et le **sang**. Elles s'y multiplient rapidement... et parfois, certaines trouvent même le chemin jusqu'aux **poumons** !

Nos chemins se séparent ici !

SANG

LYMPHE

POUMONS

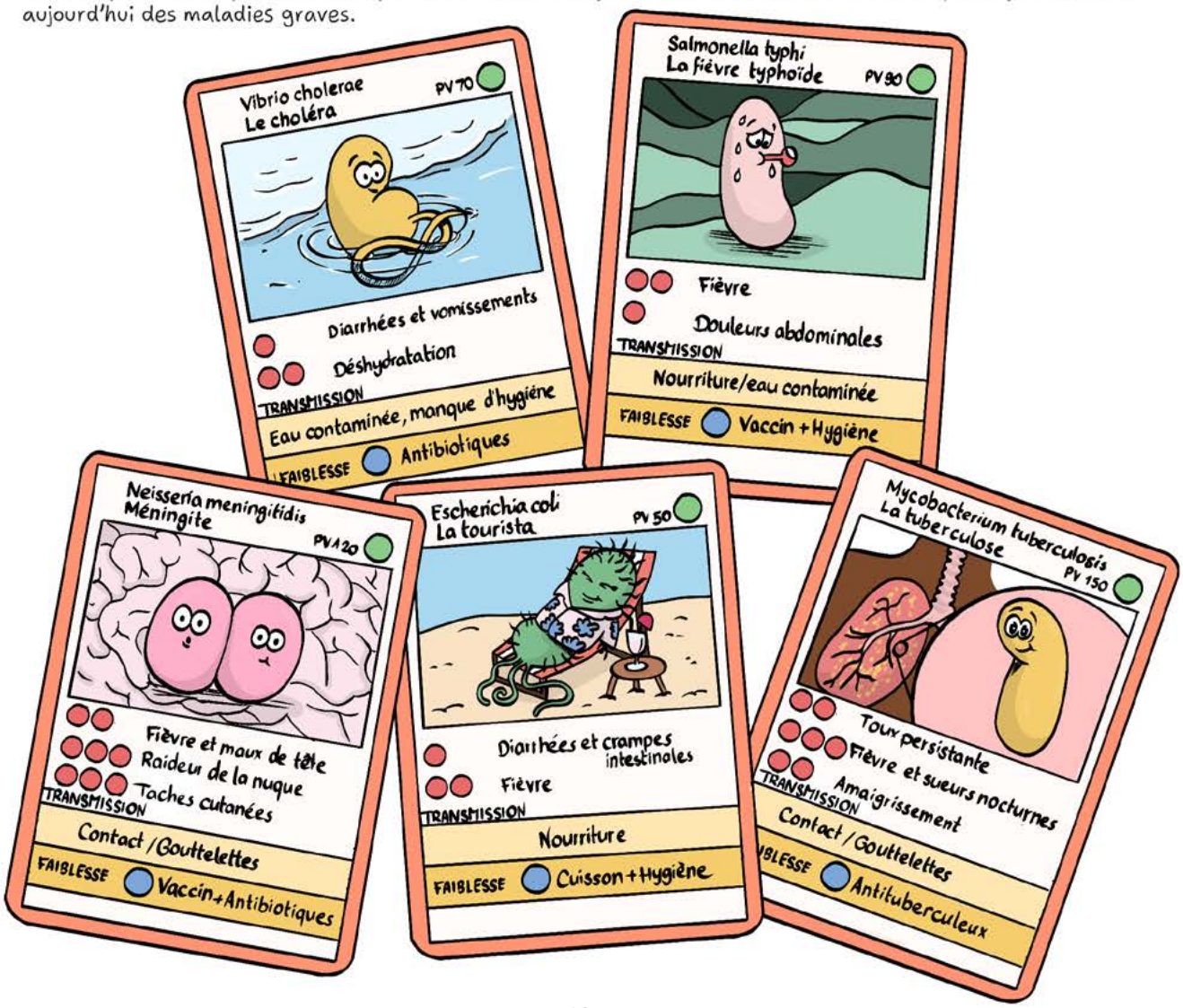
[1] La lymphe est un liquide clair circulant dans les vaisseaux lymphatiques. Elle transporte des cellules immunitaires et aide à défendre l'organisme contre les infections.

Quand elles atteignent les poumons, les bactéries déclenchent **la peste pulmonaire** : une forme très contagieuse... et souvent mortelle.



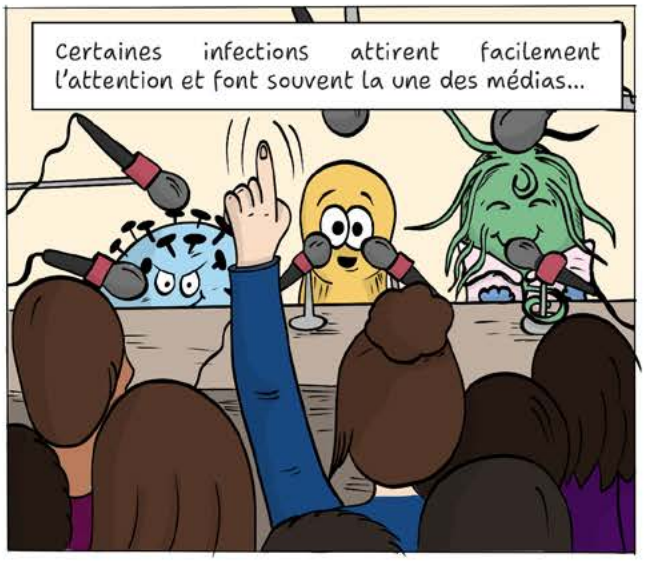


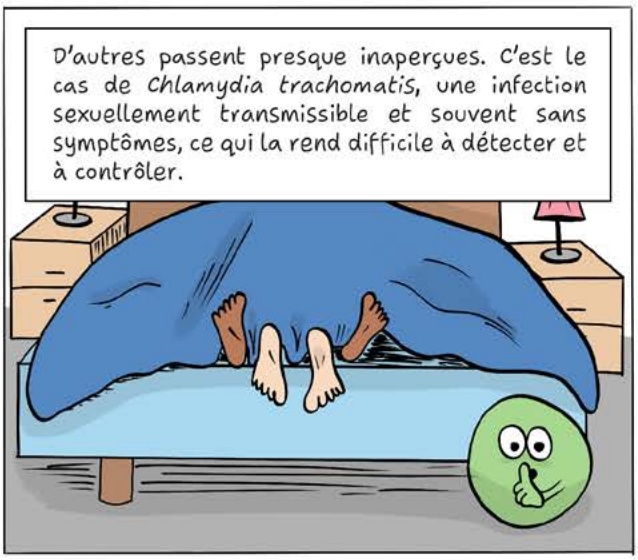
Mais la peste n'est pas la seule épidémie à avoir marqué l'histoire... D'autres bactéries provoquent encore aujourd'hui des maladies graves.



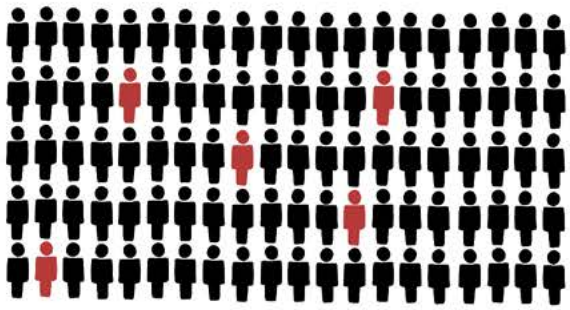
Ces bactéries ne se propagent pas partout de la même manière. Elles se multiplient plus facilement là où les conditions de vie sont précaires et l'accès aux soins limité.



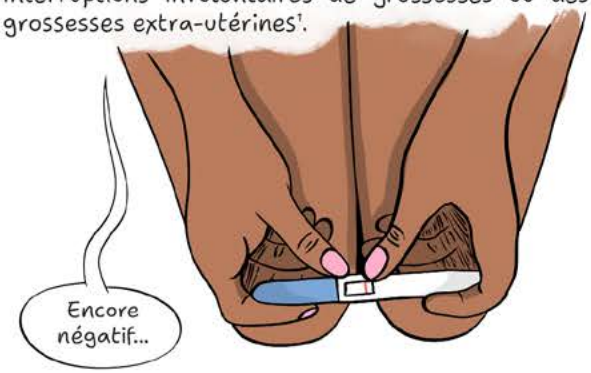


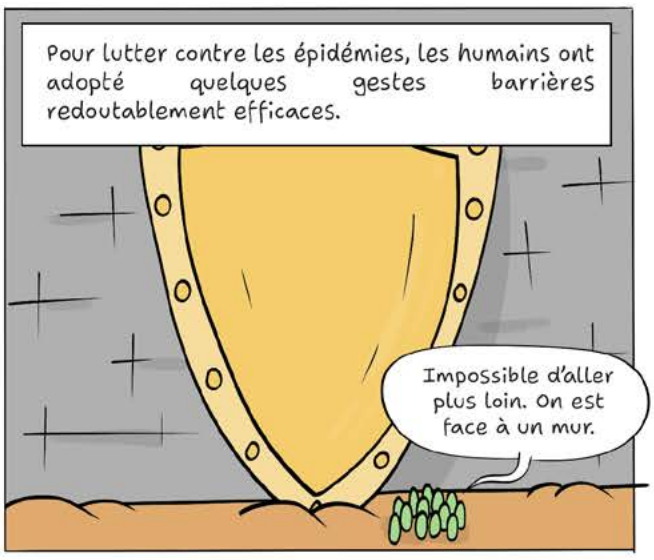


On estime qu'environ 5 % de la population mondiale est actuellement infectée.



Sans traitement, cette bactérie peut entraîner des complications graves telles que l'infertilité, des interruptions involontaires de grossesses ou des grossesses extra-utérines[1].

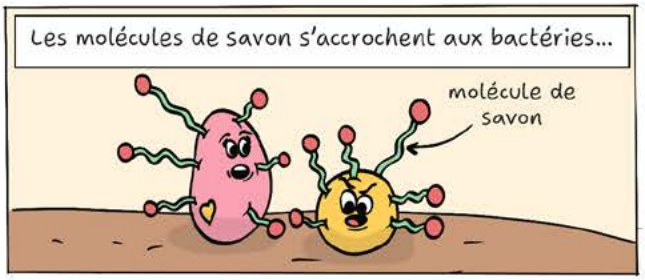




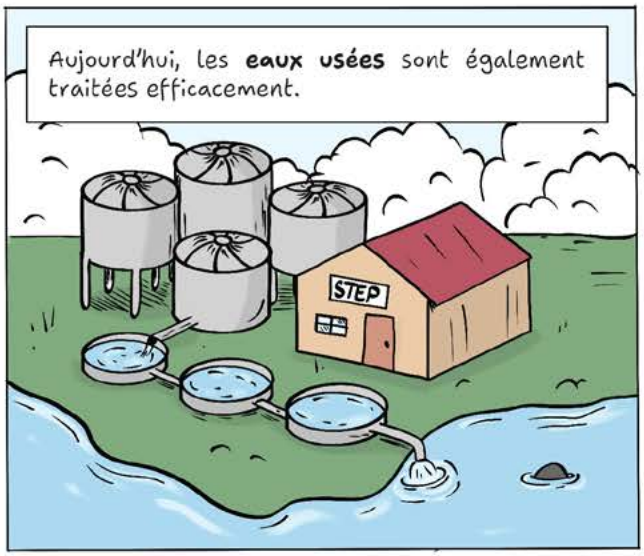
[1] Une grossesse extra-utérine survient lorsque l'embryon s'implante hors de l'utérus. Elle ne peut pas se poursuivre et met en danger la santé de la mère.

Par exemple, l'hygiène s'est nettement améliorée avec le temps, grâce à des gestes simples comme **se laver régulièrement les mains avec du savon**.









Et la production d'aliments est mieux contrôlée, limitant les risques de contamination.



En cas de doute, il suffit de **bien cuire** les aliments ou de faire **bouillir l'eau** avant de la consommer.





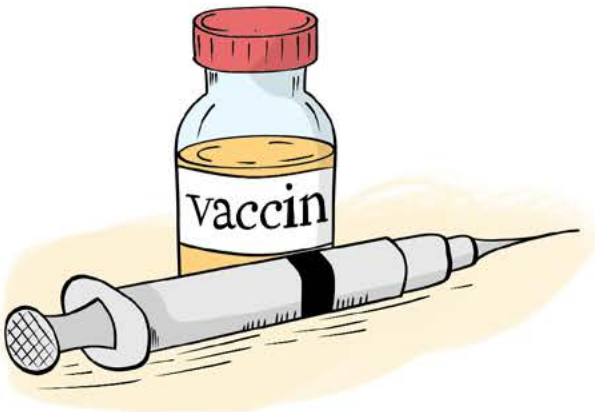
Pour limiter la propagation des maladies respiratoires, **porter un masque** peut être très efficace.

De même, utiliser des **préservatifs** réduit considérablement le risque de maladies sexuellement transmissibles.

C'est pas aujourd'hui qu'on va infecter...

C'est pas aujourd'hui qu'on va féconder...

Mais surtout, **la vaccination** a largement contribué à protéger la population contre de nombreuses épidémies...



... en renforçant le système immunitaire. La vaccination transmet au corps des informations sur l'identité des microbes.

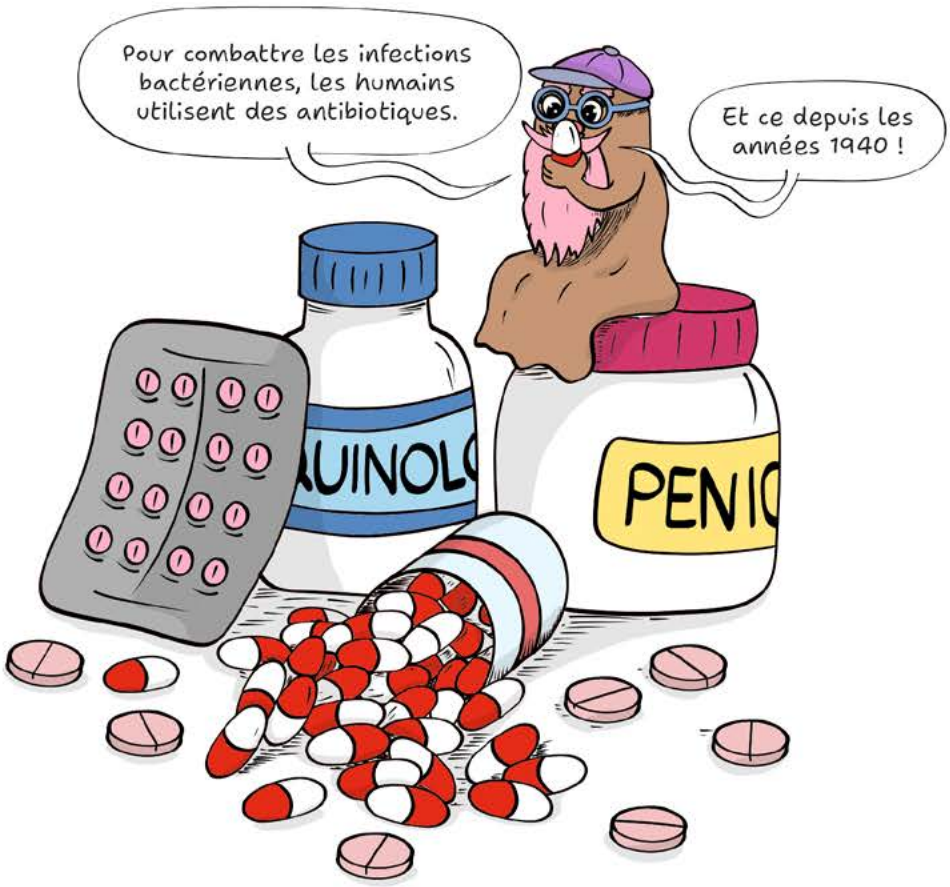
Ce matin, nous avons reçu une information capitale !

Cela permet au système immunitaire de **reconnaître rapidement** les agents pathogènes et de les éliminer avant qu'ils ne causent une infection.

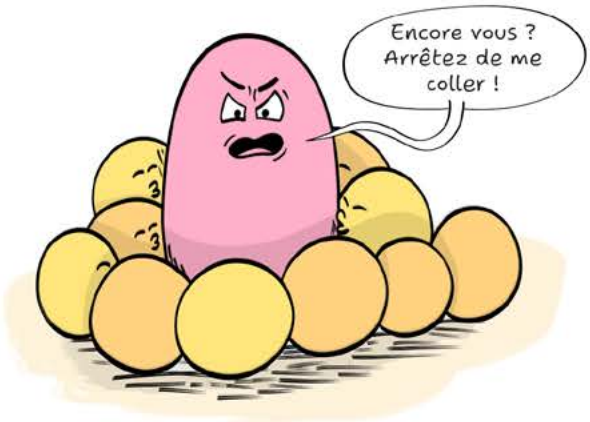
Voilà à quoi ressemble notre ennemi.

Si vous le voyez, **éliminez-le** sur-le-champ !

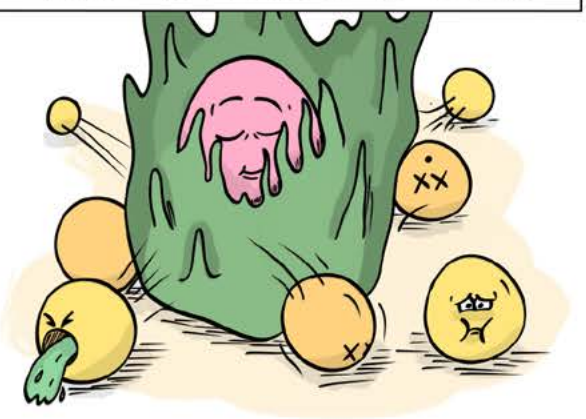
LES ANTIBIOTIQUES RIPOSTENT



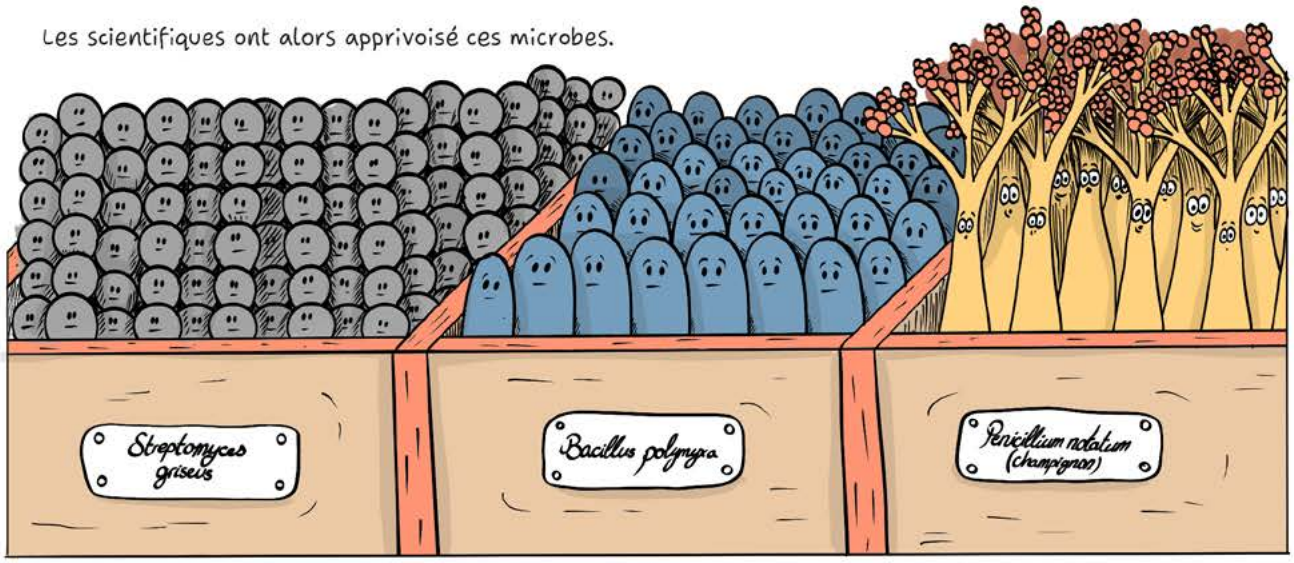
Mais les humains ne les ont pas inventés ! Souvenez-vous...



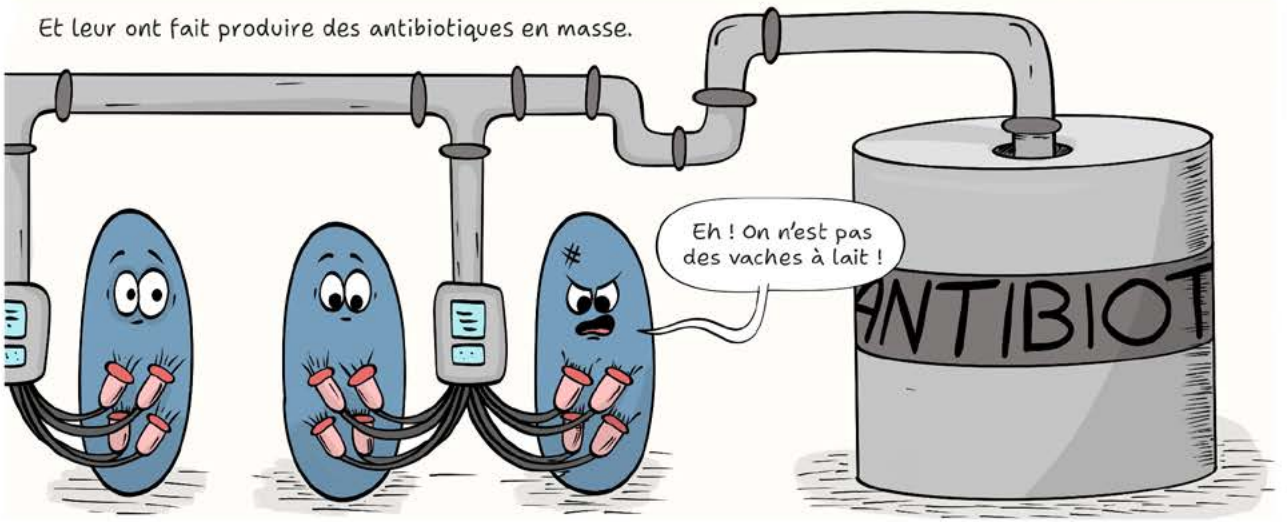
Certaines bactéries et autres microbes[1] sécrètent naturellement des substances qui empêchent la croissance de leurs voisins : **les antibiotiques** !



Les scientifiques ont alors apprivoisé ces microbes.

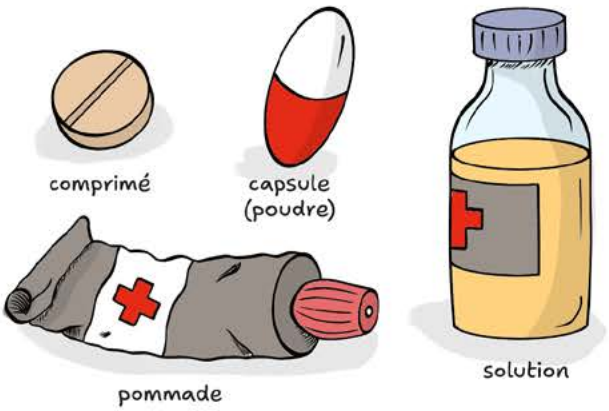


Et leur ont fait produire des antibiotiques en masse.

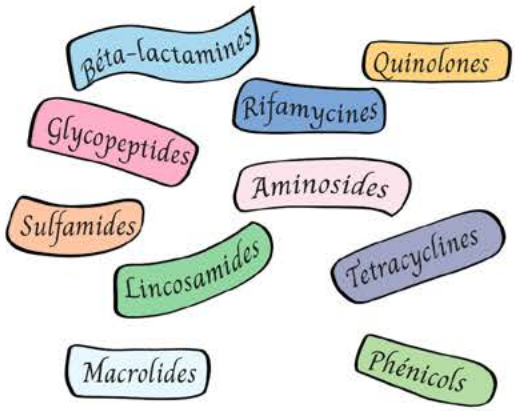


[1] Un microbe est un organisme vivant microscopique, invisible à l'œil nu, qui peut être une bactérie, un virus ou même un champignon.

Les antibiotiques sont ensuite purifiés et transformés en une forme utilisable par les médecins.



Mais savez-vous qu'il existe plusieurs familles d'antibiotiques ?

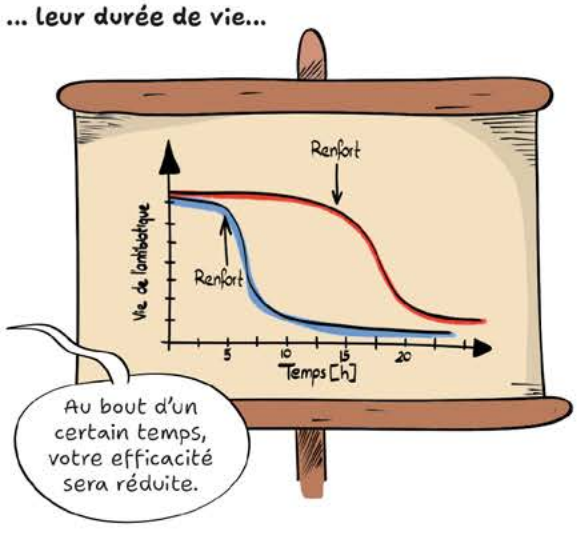


Les antibiotiques d'une même famille ont les mêmes propriétés antibactériennes, et donc la même **cible**.

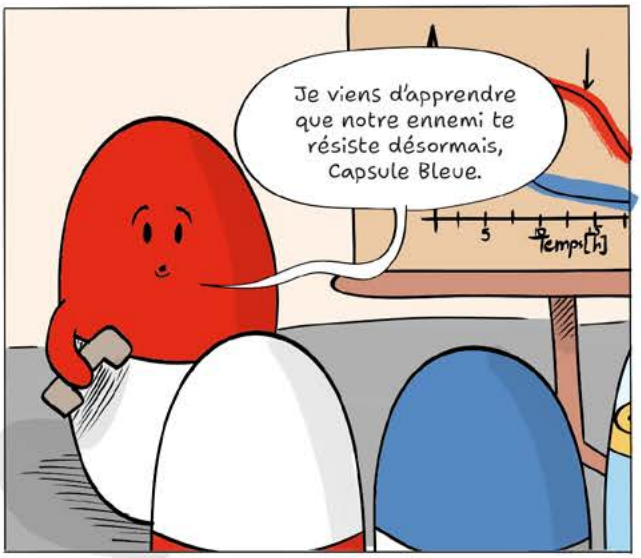


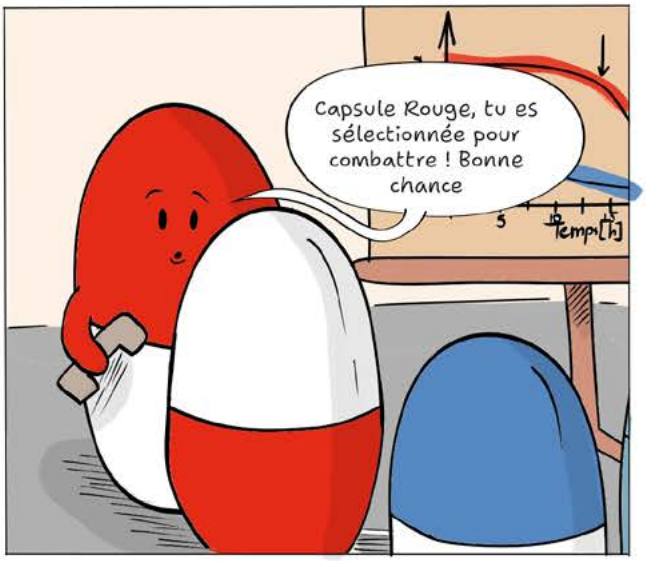


... leur durée de vie...

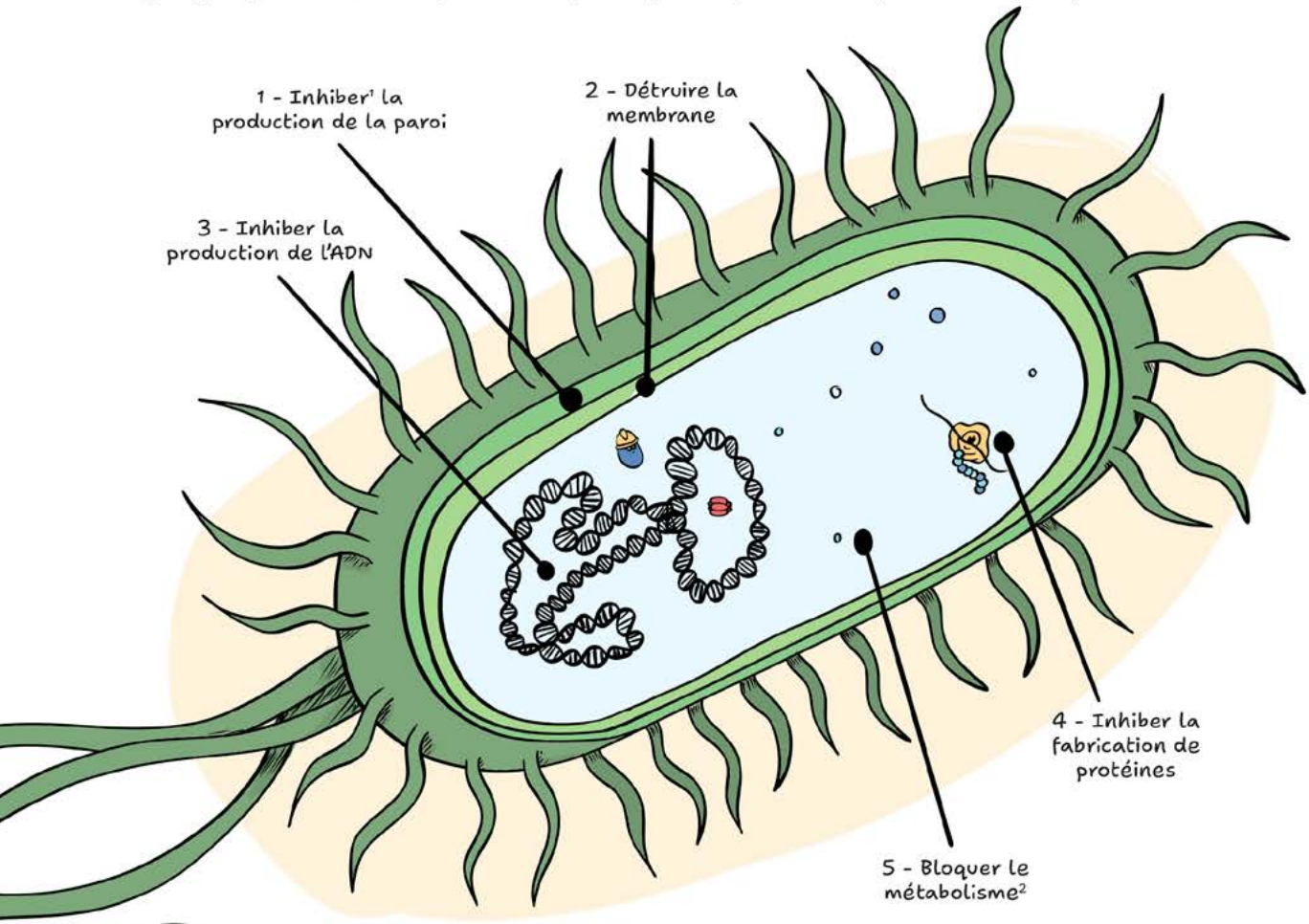






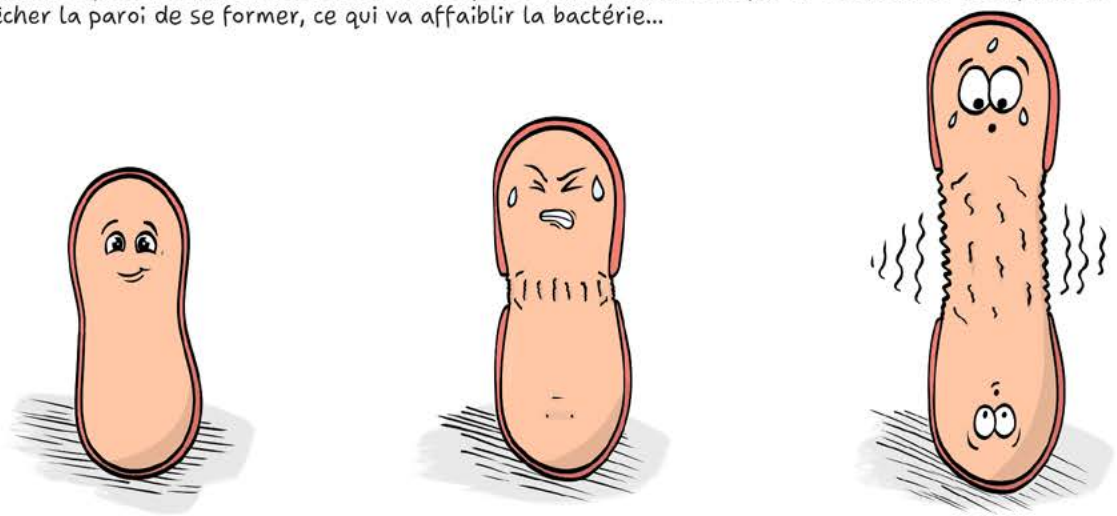


Bien qu'il y ait plusieurs familles, il n'existe que **cinq cibles potentielles** pour les antibiotiques.



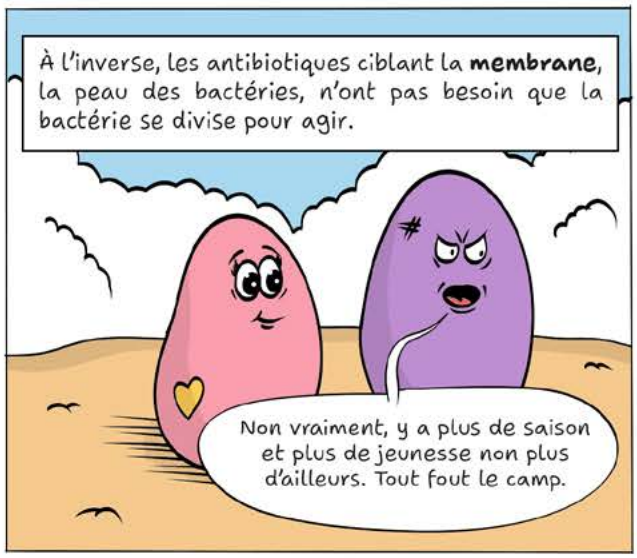
[1] Inhiber signifie empêcher, ralentir ou freiner le fonctionnement d'un processus biologique, d'une réaction chimique ou l'activité d'une cellule ou d'un organisme.
[2] Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques qui permettent aux organismes de transformer l'énergie pour survivre et pour se reproduire.

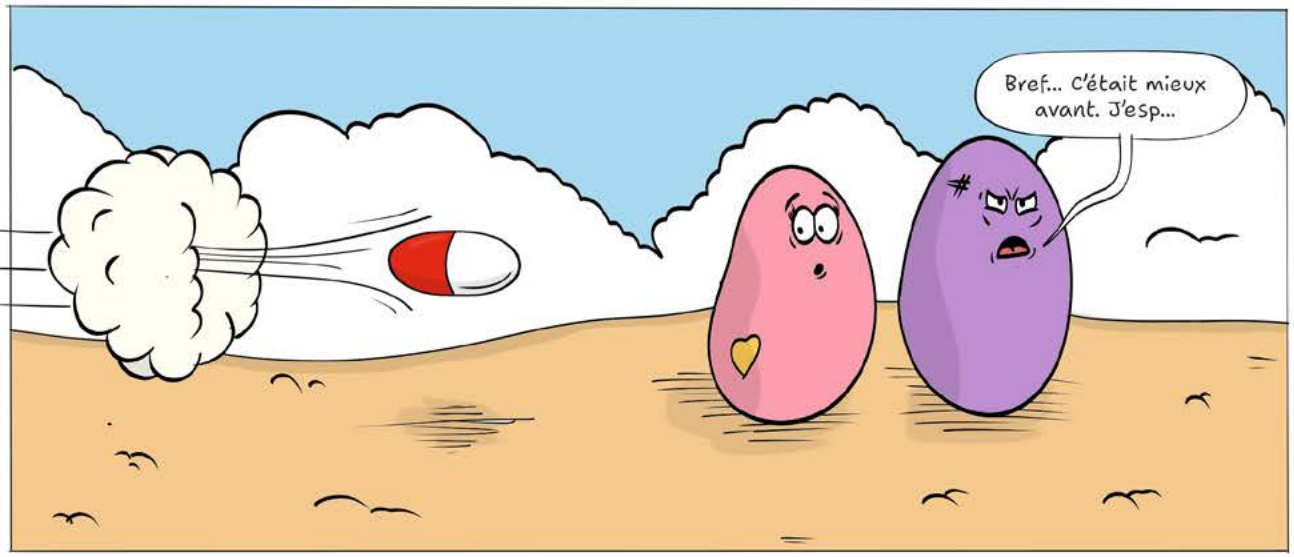
Les antibiotiques ciblant la **formation de la paroi** fonctionnent lorsque la bactérie se multiplie. Ils vont empêcher la paroi de se former, ce qui va affaiblir la bactérie...

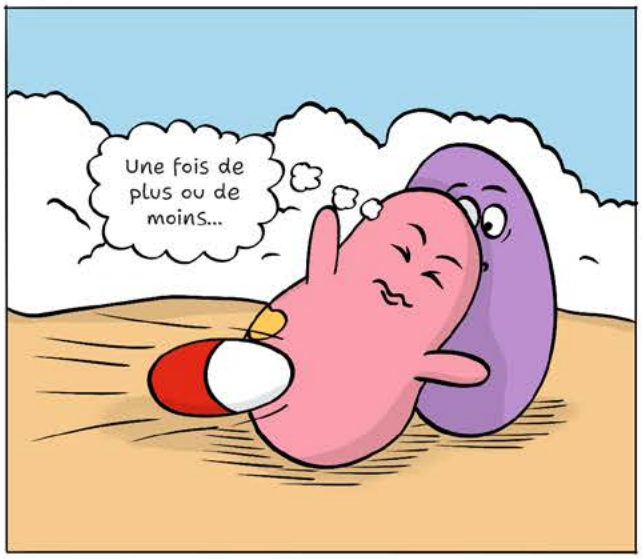


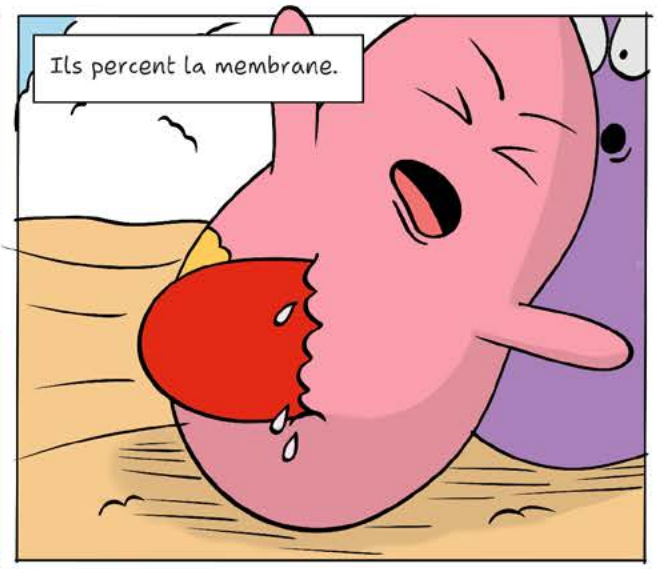
... qui va ensuite mourir.

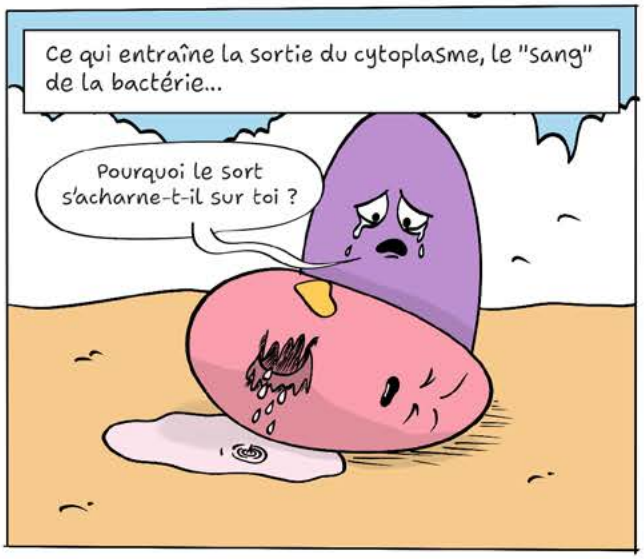




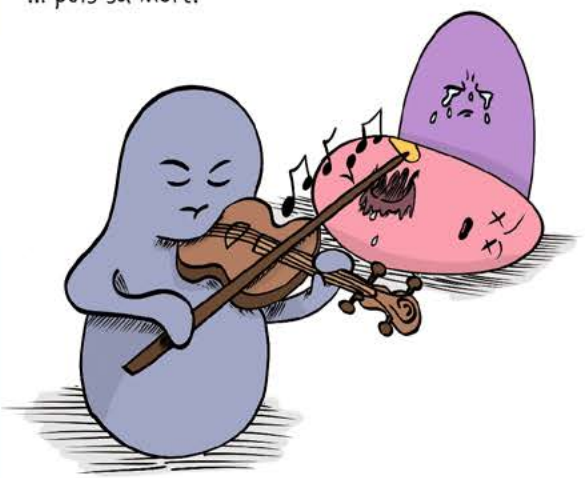


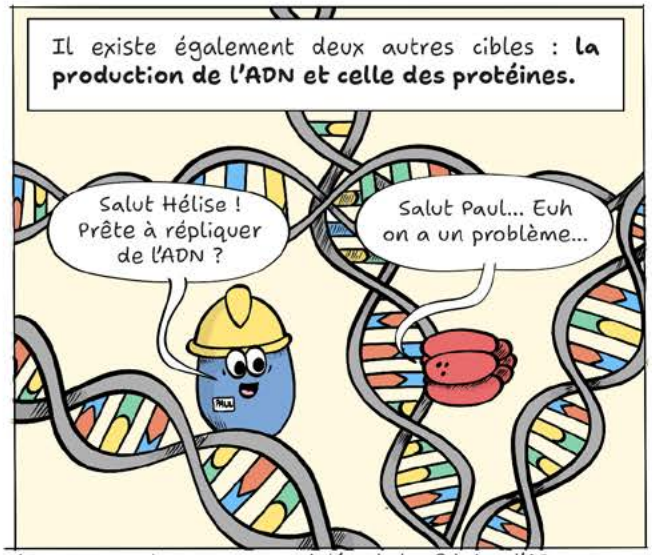


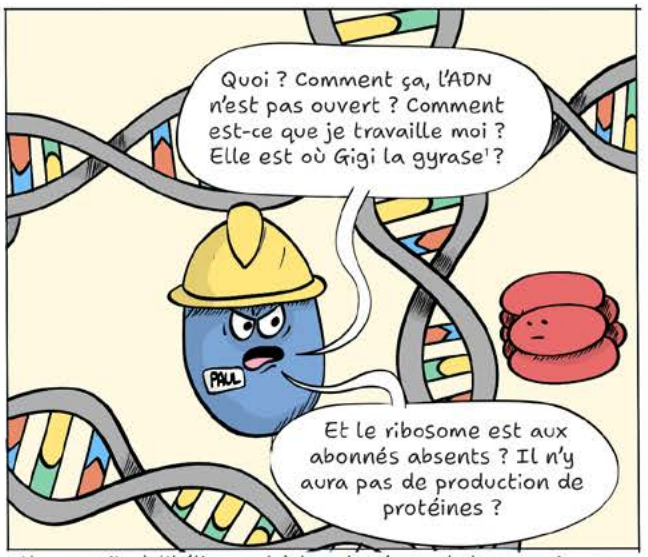




... puis sa mort.

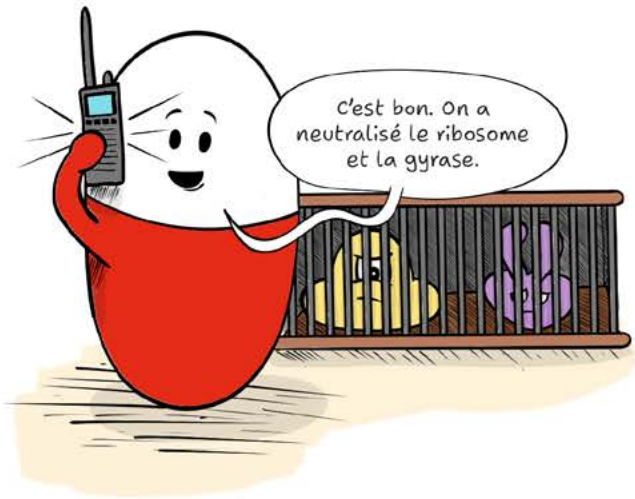




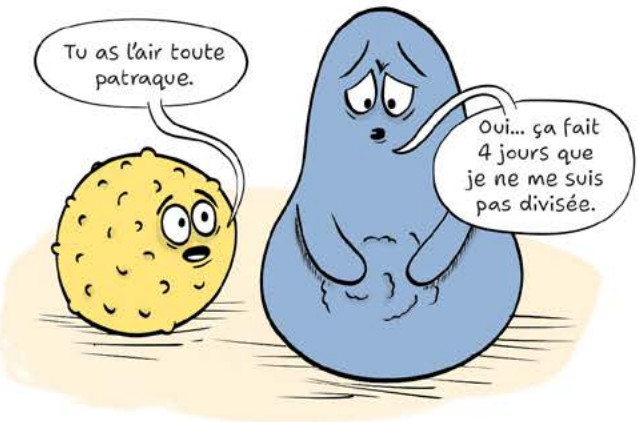


[1] La gyrase est une enzyme qui déroule les 2 brins d'ADN pour permettre ensuite à l'hélicase et à la polymérase de les recopier.



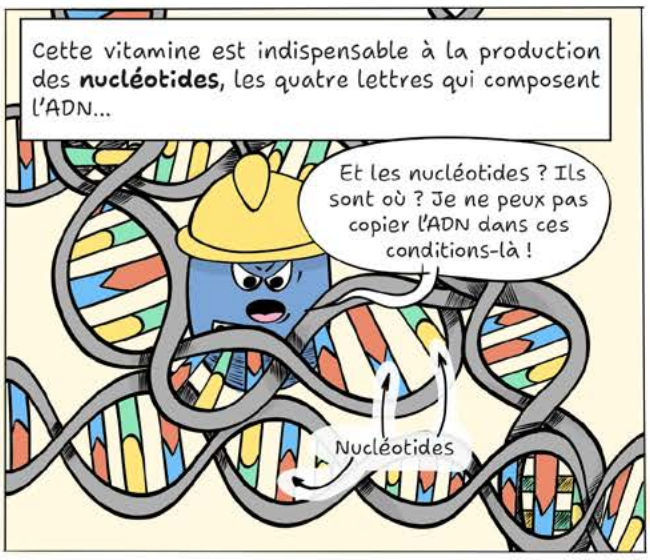


En bloquant la production de l'ADN ou des protéines, **la bactérie ne peut pas se reproduire** et se propager correctement.

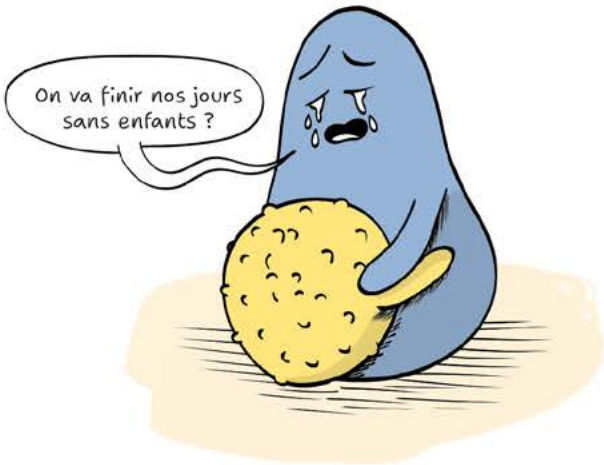


Finalement, les dernières cibles des antibiotiques sont **les voies métaboliques**, comme la production de la vitamine B9.





... et donc à la **division** bactérienne.

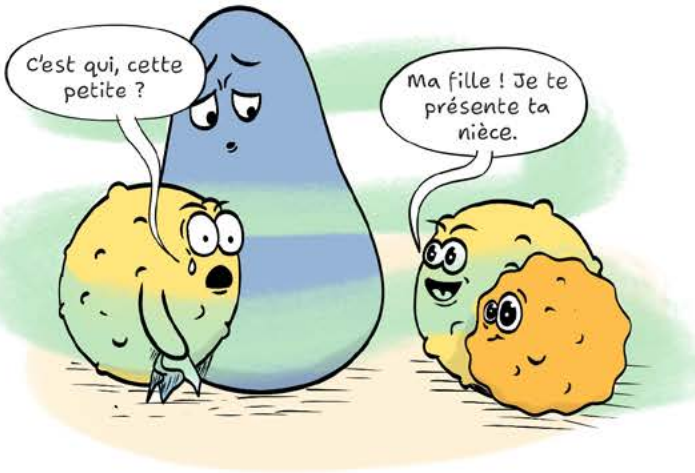


LA RÉSISTANCE S'ORGANISE

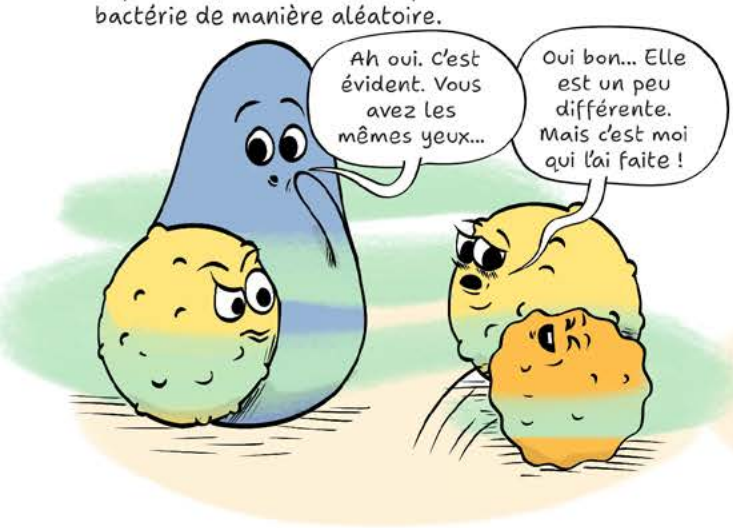


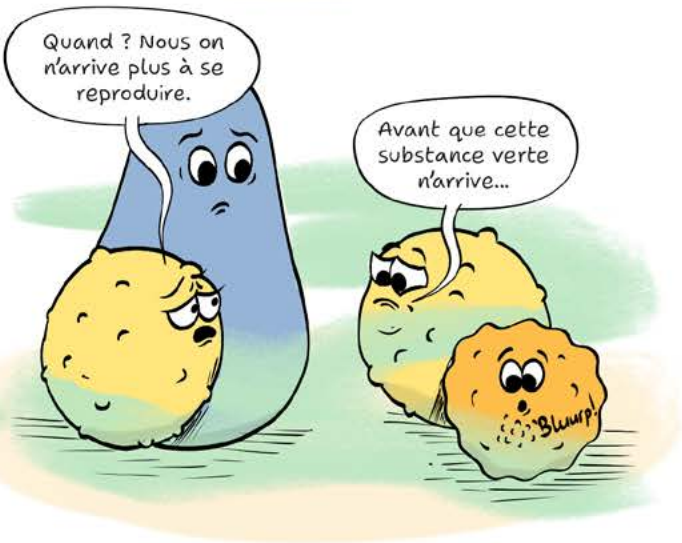
Si un antibiotique est bien utilisé, il y a peu de chances que les bactéries développent une résistance.

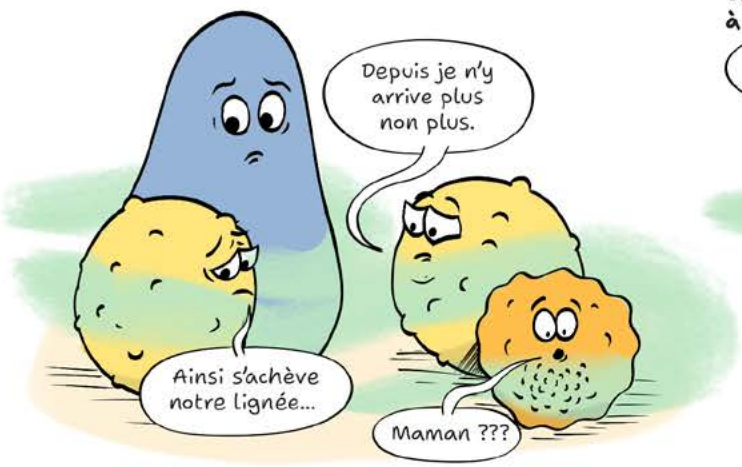




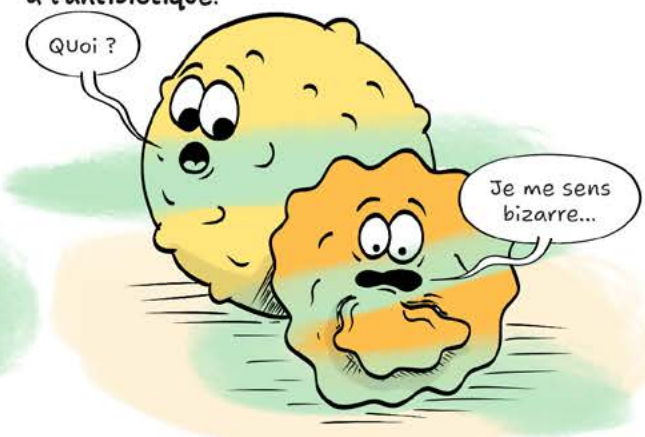
Cependant, une **mutation** peut survenir chez une bactérie de manière aléatoire.

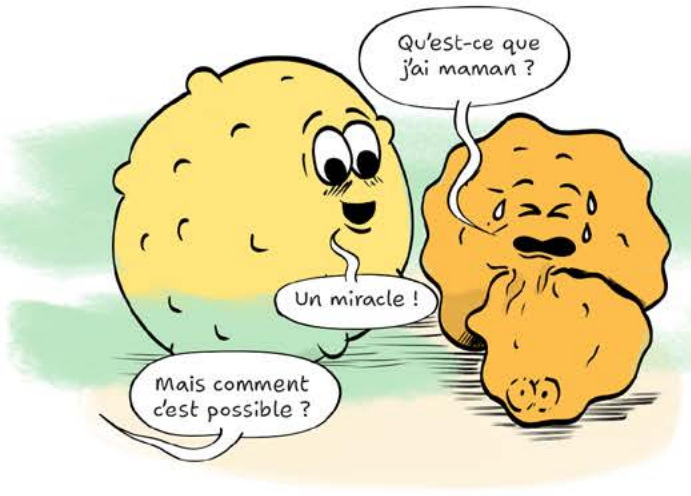


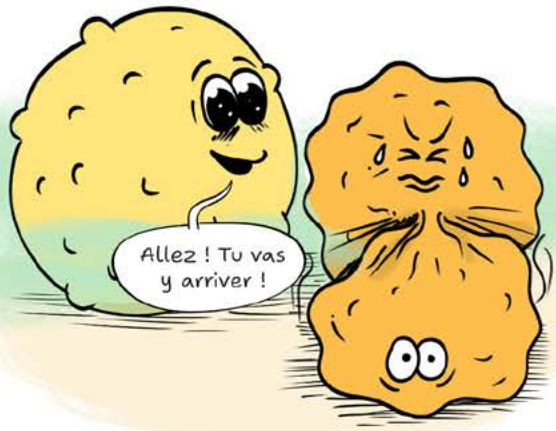


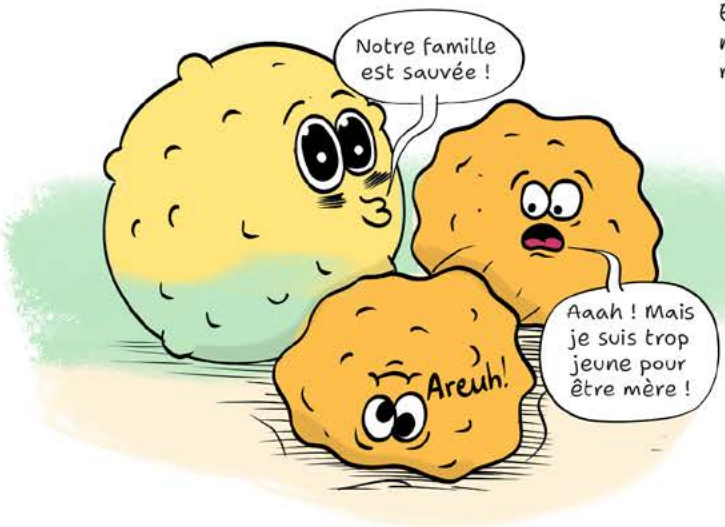


Cette mutation peut rendre la **bactérie résistante à l'antibiotique**.

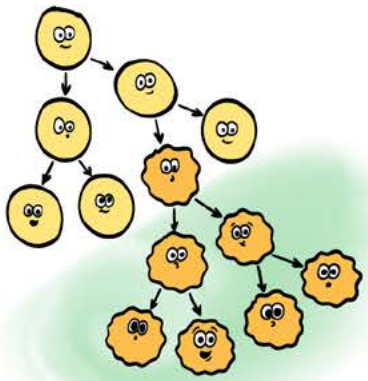




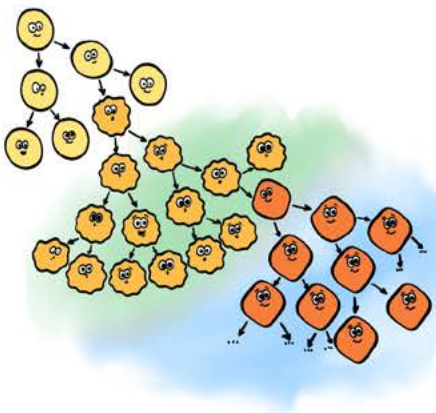




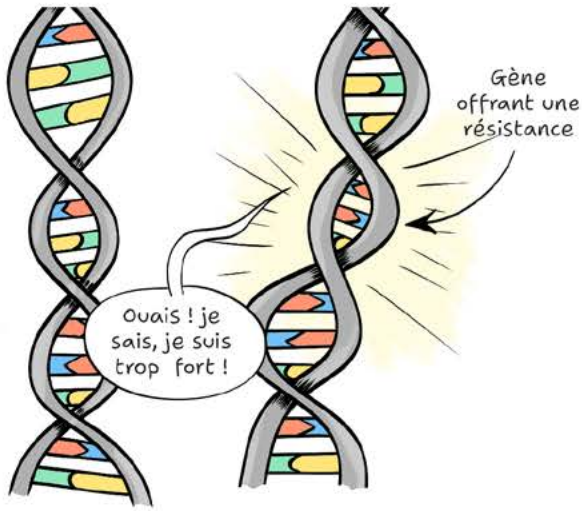
Elle peut alors continuer à se multiplier, donnant naissance à toute une famille de bactéries résistantes à l'antibiotique utilisé.



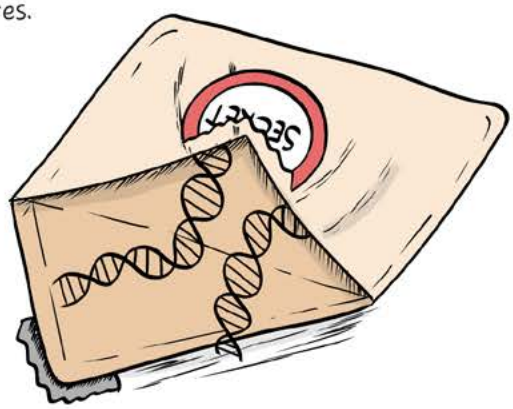
Si un nouvel antibiotique est introduit, une nouvelle **mutation** peut également apparaître, rendant ce traitement inefficace à son tour. Ceci peut se répéter indéfiniment, entraînant des souches bactériennes multirésistantes.



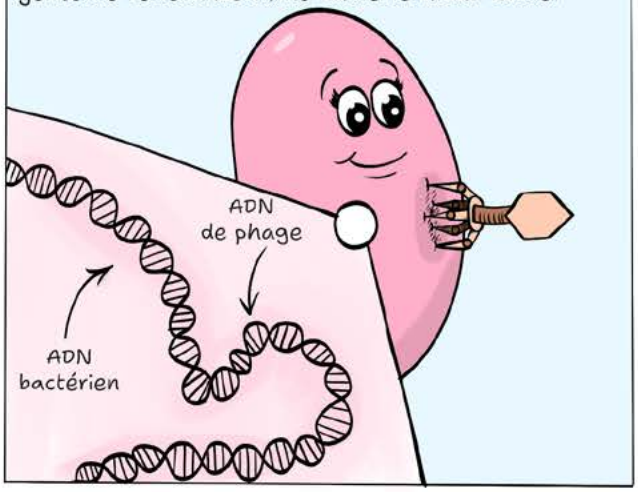
Mais à vrai dire, seulement 10 à 20 % des résistances sont dues à des mutations dans l'ADN...

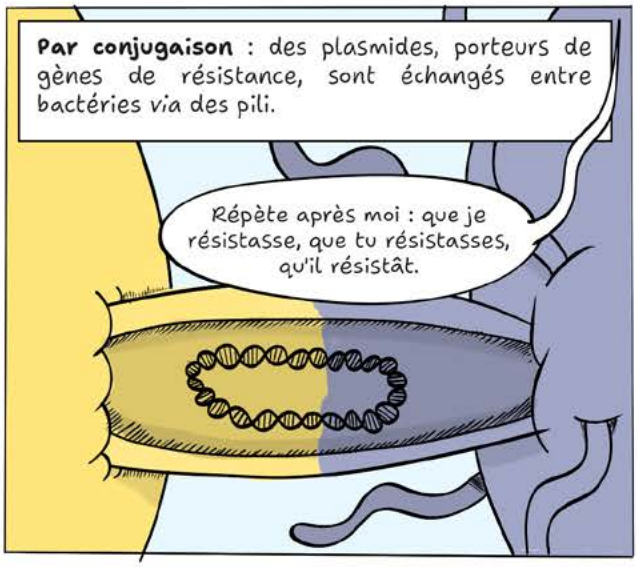


La majorité des résistances proviennent du **transfert de gènes.** Cela peut se produire de plusieurs manières.

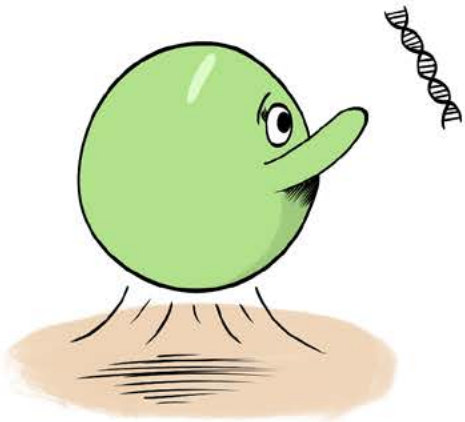


Par transduction : des phages transportent des gènes de résistance d'une bactérie à une autre.

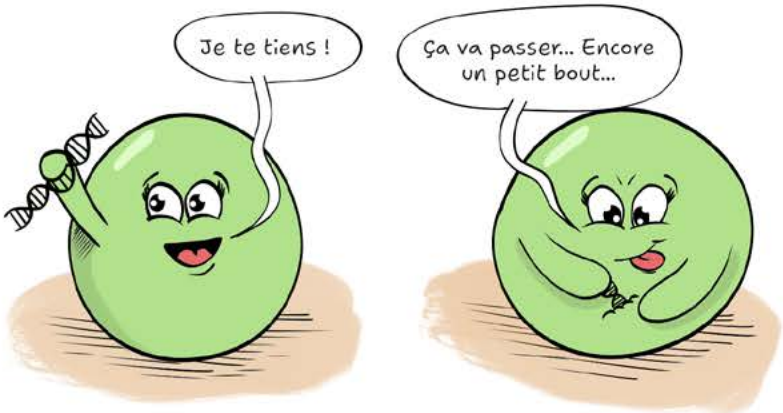


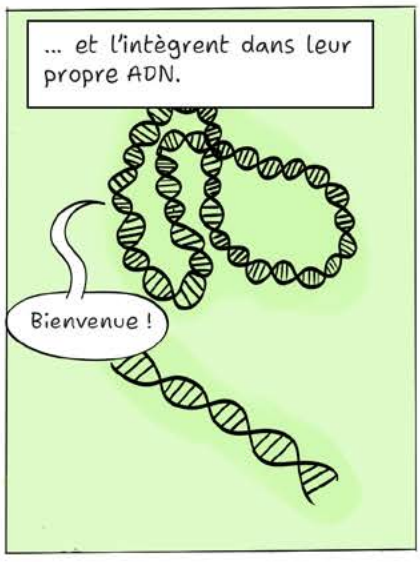


Par transformation : des bactéries capturent de l'ADN libre dans l'environnement.



Une fois qu'elles l'ont attrapé, elles l'absorbent directement...

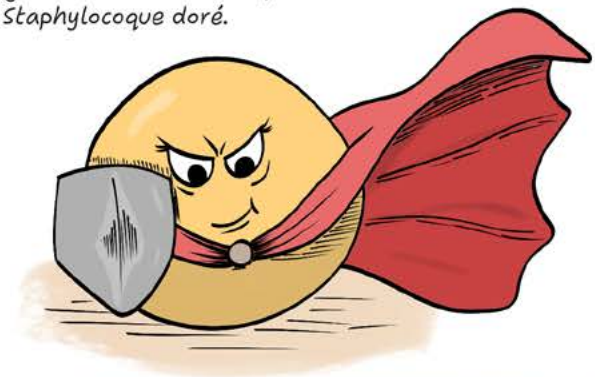




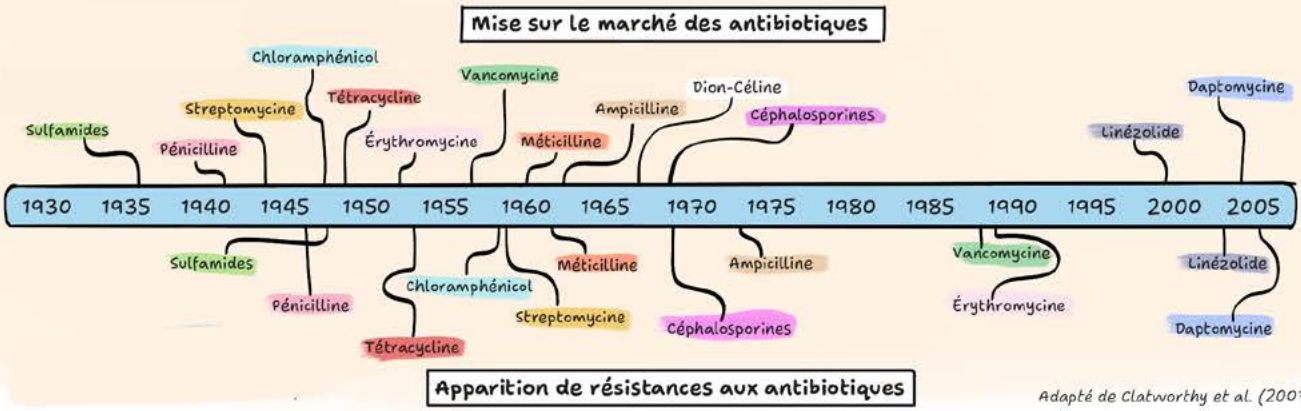
Toutes ces méthodes permettent le **transfert d'ADN**. Et parfois, celui-ci contient des **gènes pour résister aux antibiotiques.**



Une même bactérie peut ainsi accumuler plusieurs gènes de résistance, comme c'est le cas du *Staphylocoque doré*.



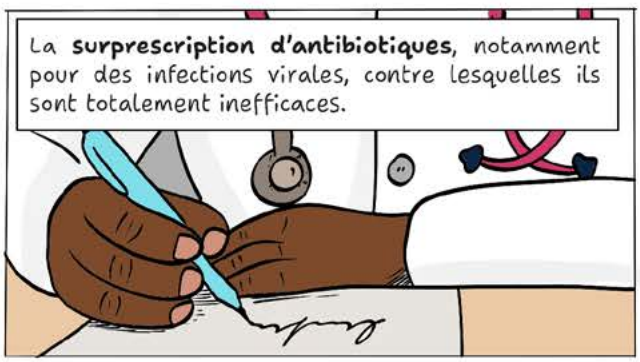
Avec l'industrialisation des antibiotiques, les résistances sont devenues de plus en plus fréquentes. Chaque fois qu'un antibiotique est utilisé massivement, une forme de résistance finit par émerger.



Adapté de Clatworthy et al. (2007)

Plusieurs facteurs favorisent cette résistance :

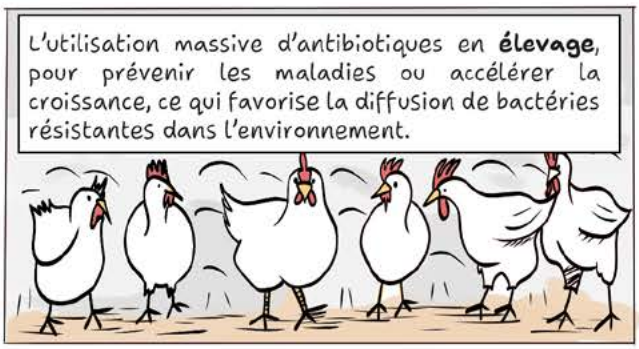
La **surprescription d'antibiotiques**, notamment pour des infections virales, contre lesquelles ils sont totalement inefficaces.



Le **non-respect des traitements**, comme l'arrêt trop tôt ou une mauvaise prise des doses, qui laisse des bactéries survivre et s'adapter.



L'utilisation massive d'antibiotiques en **élevage**, pour prévenir les maladies ou accélérer la croissance, ce qui favorise la diffusion de bactéries résistantes dans l'environnement.



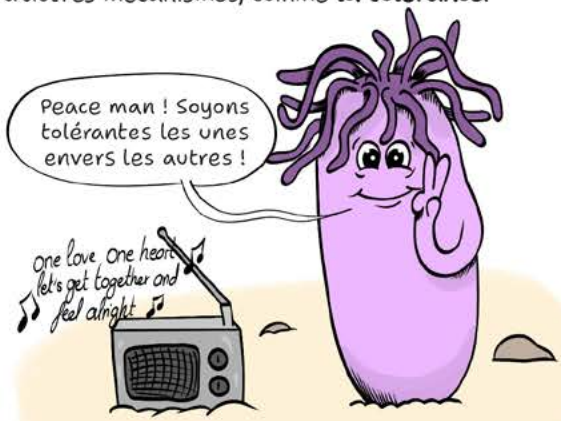
La **pollution** liée aux déchets pharmaceutiques ou hospitaliers, qui expose les bactéries à de faibles doses d'antibiotiques et stimule l'apparition de gènes de résistance.



En 2019, l'OMS[1] estimait que la résistance aux antibiotiques avait causé 1,27 million de décès dans le monde. **Ce chiffre pourrait dépasser les 10 millions d'ici 2050**, faisant de la résistance une menace majeure pour la santé publique mondiale.



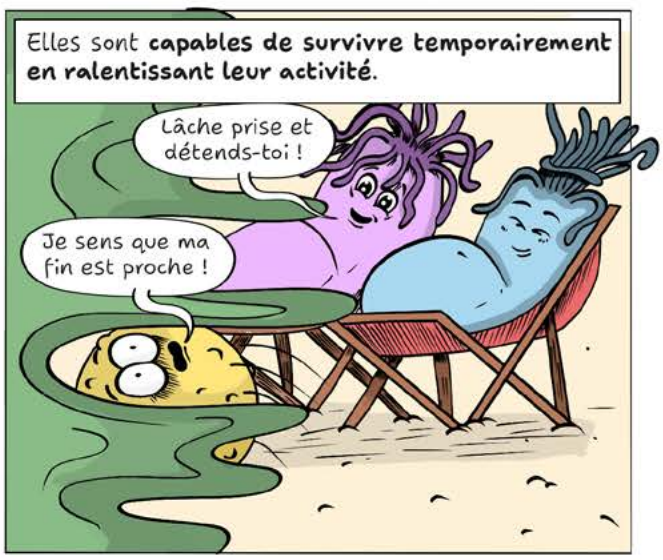
Mais la résistance aux antibiotiques n'est pas la seule cause d'échec des traitements. Il existe d'autres mécanismes, comme **la tolérance**.



Contrairement aux résistantes, les bactéries tolérantes **n'ont pas de gènes de résistance**. Elles cessent juste de se multiplier en présence d'antibiotiques.



Elles sont **capables de survivre temporairement en ralentissant leur activité**.

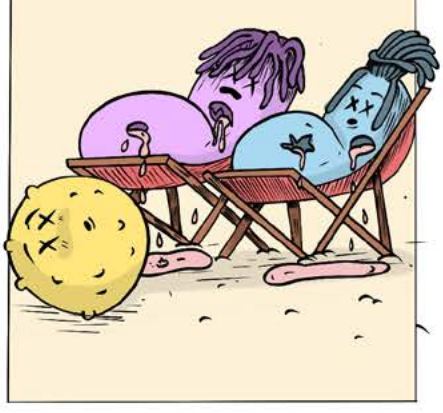


Mais ça ne fonctionne que pour certains types d'antibiotiques, comme ceux qui ciblent la division des bactéries.





En revanche, ceux qui attaquent directement la membrane restent efficaces.



[1] OMS : Organisation Mondiale de la Santé

Dans le cas d'un antibiotique qui agit uniquement lorsque les bactéries sont actives et se multiplient, deux scénarios sont possibles pour une bactérie tolérante.

Il devient épais ce nuage...

Oui. Babylone nous asphyxie !

Scénario 1 : Si le traitement est interrompu trop tôt, avant que la bactérie ne soit éliminée...

Aaah ! On respire mieux maintenant !

... elle peut reprendre sa multiplication et l'infection persistera.



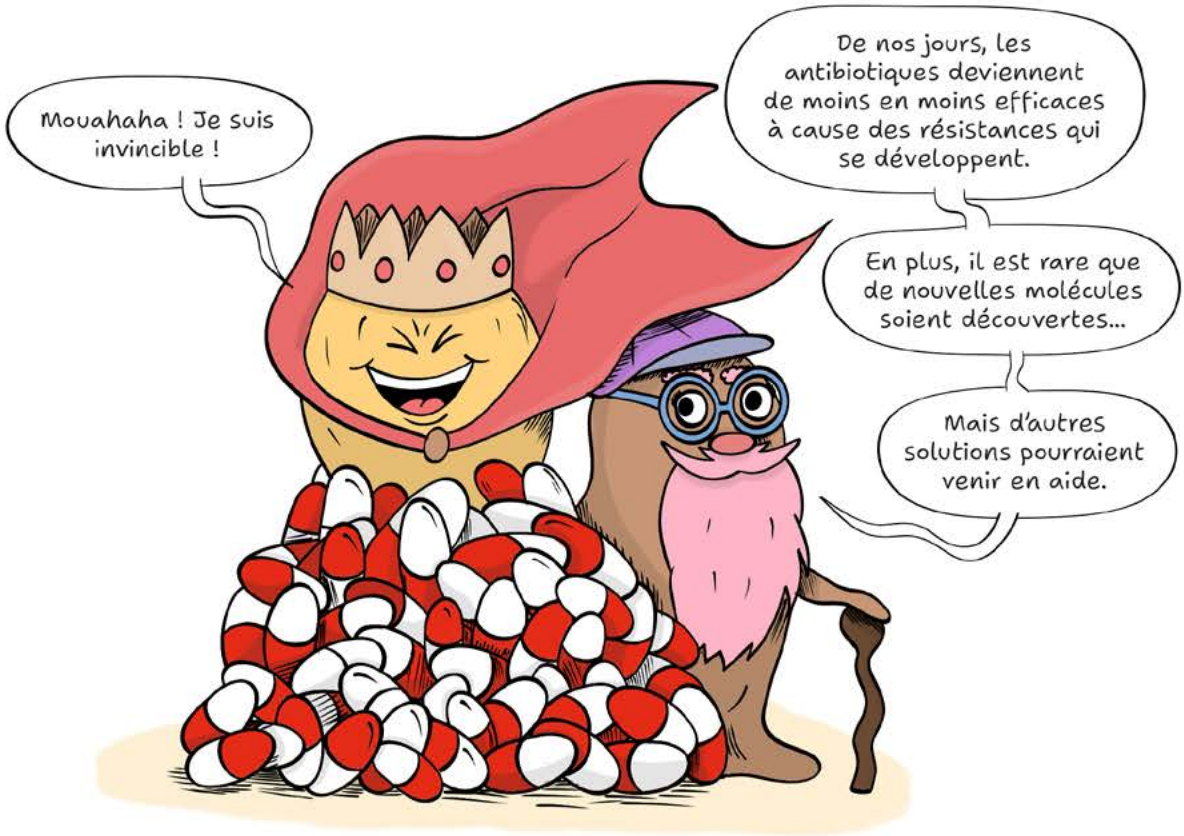
Scénario 2 : En revanche, si le traitement est poursuivi suffisamment longtemps...

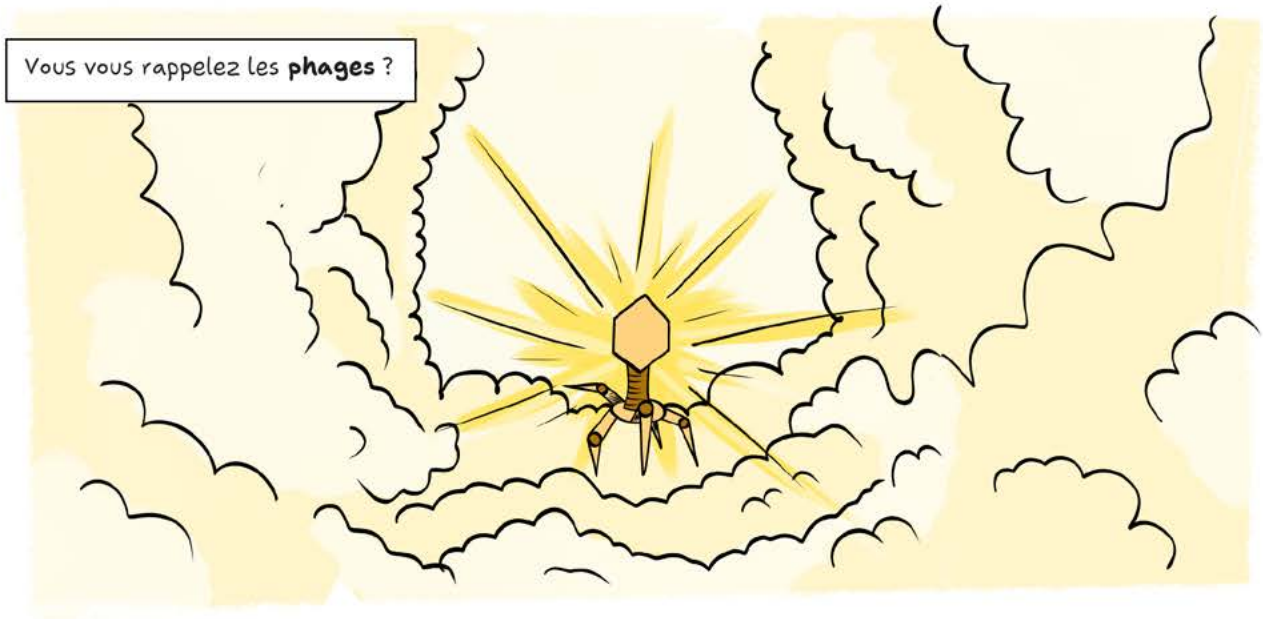
... la bactérie finira par s'affaiblir et par mourir.



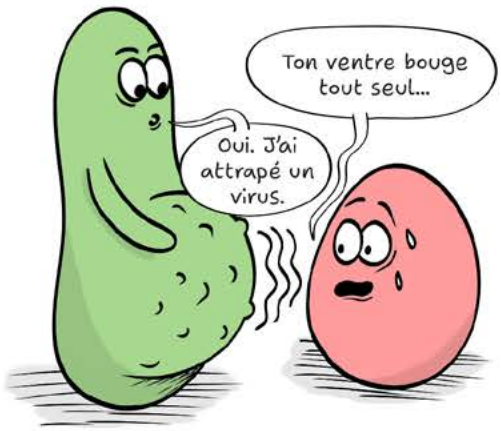
Il est donc crucial de **respecter la durée du traitement**. Même si elles ralentissent leur activité, les bactéries ne peuvent pas rester au repos indéfiniment. Avec un traitement prolongé, leur élimination est possible.

LES VIRUS... NOS SAUVEURS ?

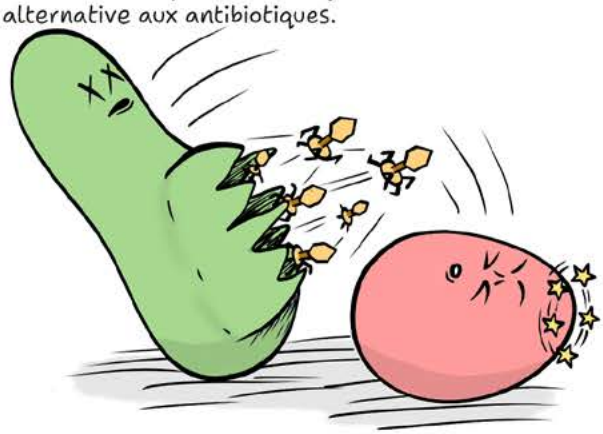




Ce sont ces fameux virus à bactéries.

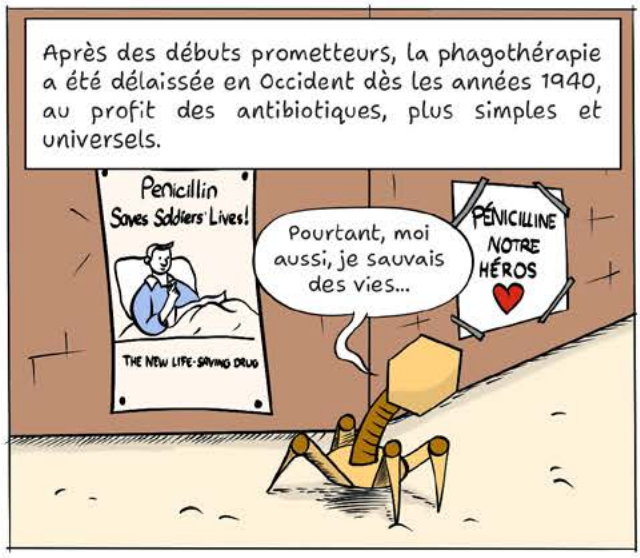


Certains types de phages peuvent tuer les bactéries. Ils pourraient aujourd'hui devenir une alternative aux antibiotiques.



Mais leur découverte ne date pas d'hier ! Au début du XXe siècle, Félix d'Hérelle a été le pionnier de la phagothérapie, une méthode utilisant les phages pour soigner les infections bactériennes.

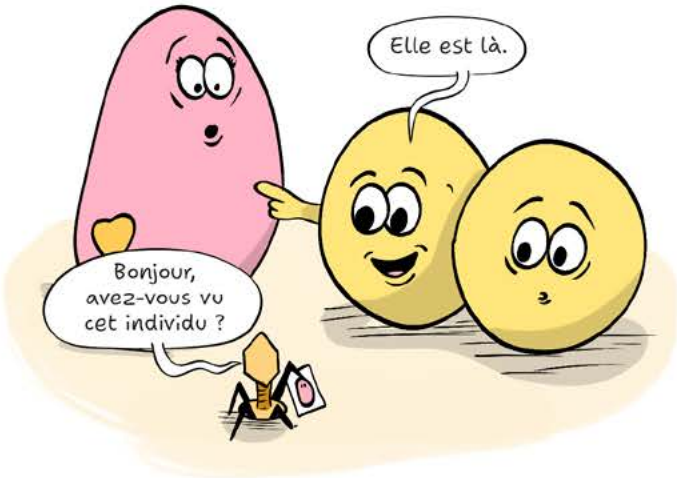




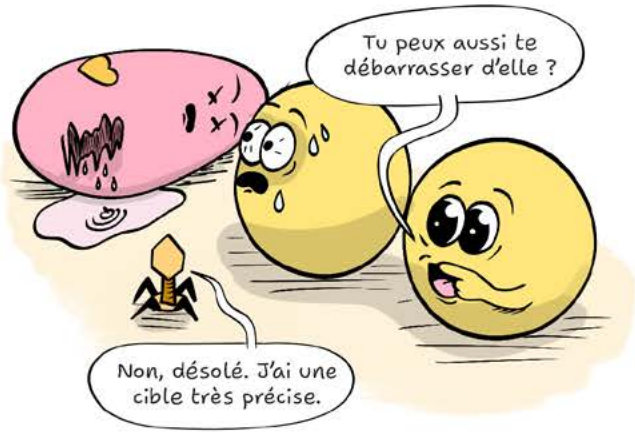




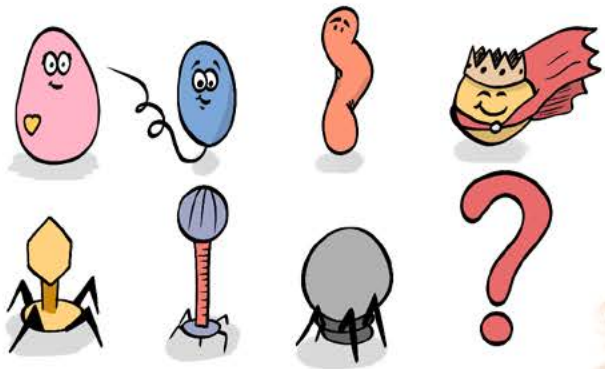
L'avantage des phages, c'est que chacun d'entre eux est spécifique à une bactérie.



Un atout majeur pour cibler uniquement les bactéries pathogènes tout en préservant les bonnes bactéries.

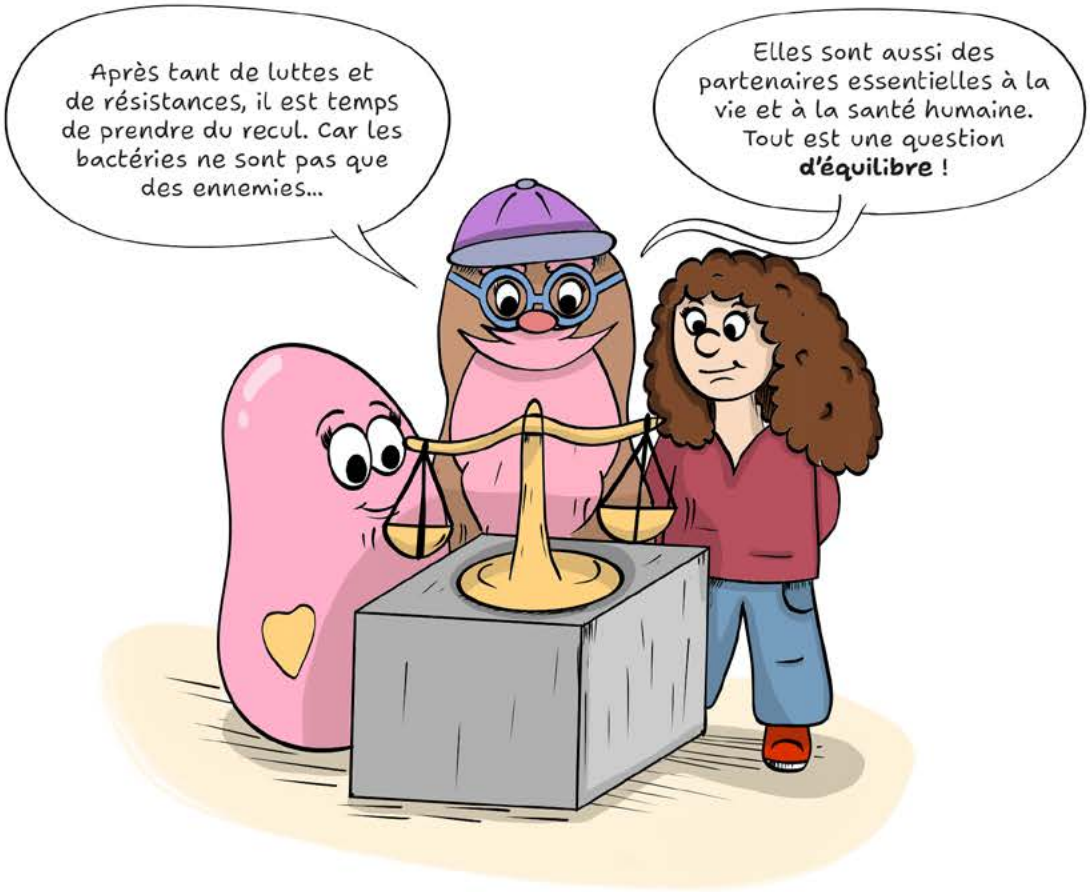


Mais cela nécessite une immense banque de phages, et pour l'instant, il en manque pour certaines bactéries.



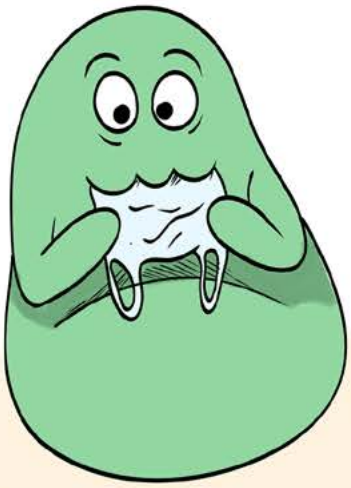


L'ÉQUILIBRE DU VIVANT





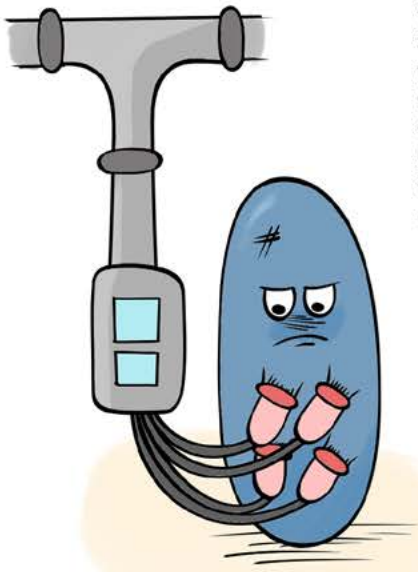
On les imagine souvent comme des organismes hostiles, responsables de maladies... Pourtant, les bactéries jouent un rôle essentiel et souvent **bénéfique** dans votre quotidien !



Elles sont à l'origine de nombreux **plaisirs gourmands** : ce sont elles qui transforment le lait en fromage ou en yaourt, qui font fermenter la choucroute ou encore le salami. Mais leur utilité dépasse largement le domaine de la gastronomie.

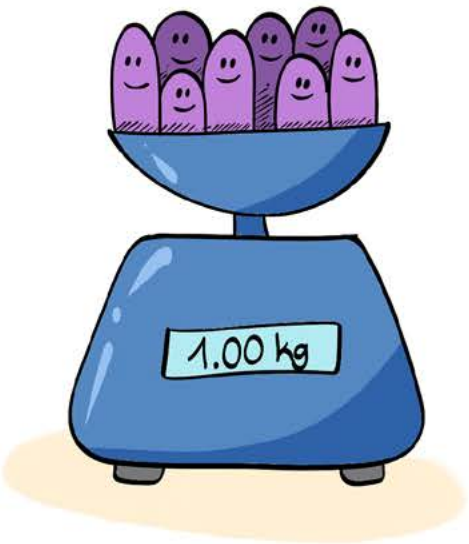


Certaines bactéries nettoient les eaux usées, **dégradent les déchets** et éliminent des polluants dangereux comme les hydrocarbures ou les pesticides. Dans les champs, elles enrichissent les sols et aident les plantes à mieux pousser. Dans les usines, elles servent à produire des plastiques biodégradables ou des carburants écologiques.



Et ce n'est pas tout ! Grâce aux avancées scientifiques, on utilise des bactéries pour **fabriquer des trésors médicaux** : des antibiotiques qui sauvent des vies, des vitamines essentielles, ou encore de l'insuline pour les personnes diabétiques. En réalité, elles sont bien plus souvent nos alliées que nos adversaires.





Ce qui est encore plus fascinant, c'est que chaque être humain porte en lui environ un **kilo de microbes** ! Cela représente plus de cellules bactériennes que de cellules humaines. Elles vivent sur votre peau, dans votre bouche, et surtout dans vos intestins, où elles forment un écosystème complexe : **le microbiote**. Ce microbiote vous protège, notamment en empêchant les microbes pathogènes de s'installer.

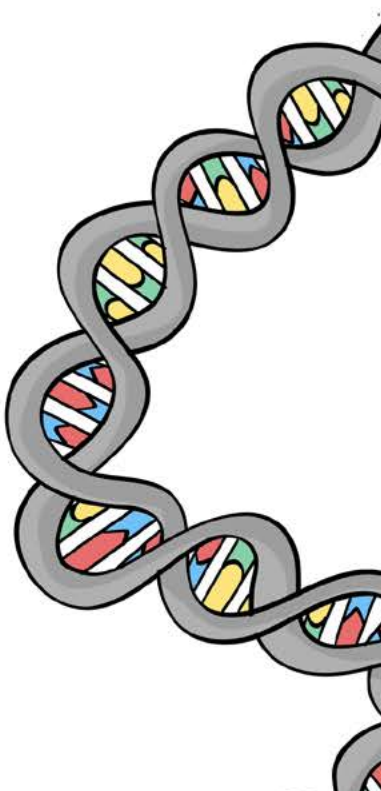


Mais cet **équilibre est fragile**. Si des bactéries pathogènes pénètrent dans des zones normalement stériles comme le sang, les poumons ou les voies urinaires, elles peuvent provoquer des **infections graves**. Même dans les zones où elles cohabitent avec d'autres bactéries, comme les intestins ou la peau, certaines peuvent devenir problématiques si elles prennent le dessus.



Dans ces cas, il faut utiliser des **antibiotiques**, mais toujours avec précaution : un usage excessif ou mal ciblé peut créer des bactéries résistantes, un vrai défi pour la santé de toutes et de tous.
Cette lutte se fait **en équipe** : patient·e·s, soignant·e·s, chercheur·se·s, décideur·se·s politiques, industriel·le·s, agriculteur·rice·s et citoyen·ne·s contribuent chacun·e à préserver l'efficacité des traitements d'aujourd'hui... et de demain.

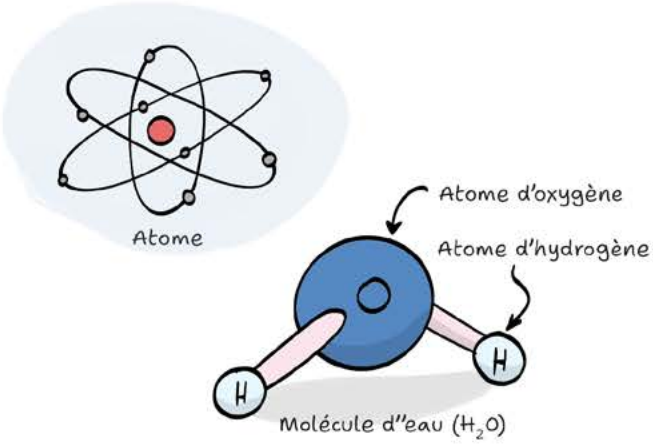




GLOSSAIRE

Le matériel génétique et les protéines

Atome : La plus petite unité de matière qui compose tout ce qui nous entoure. Il existe différents types d'atomes, comme le carbone, l'hydrogène ou l'oxygène, qui se combinent pour former tout ce qui existe : les objets, les êtres vivants et même l'air que nous respirons.



Molécule : Ensemble d'atomes liés entre eux. Les molécules peuvent être simples avec peu d'atomes, comme l'eau, ou très complexes, comme l'ADN ou les protéines.

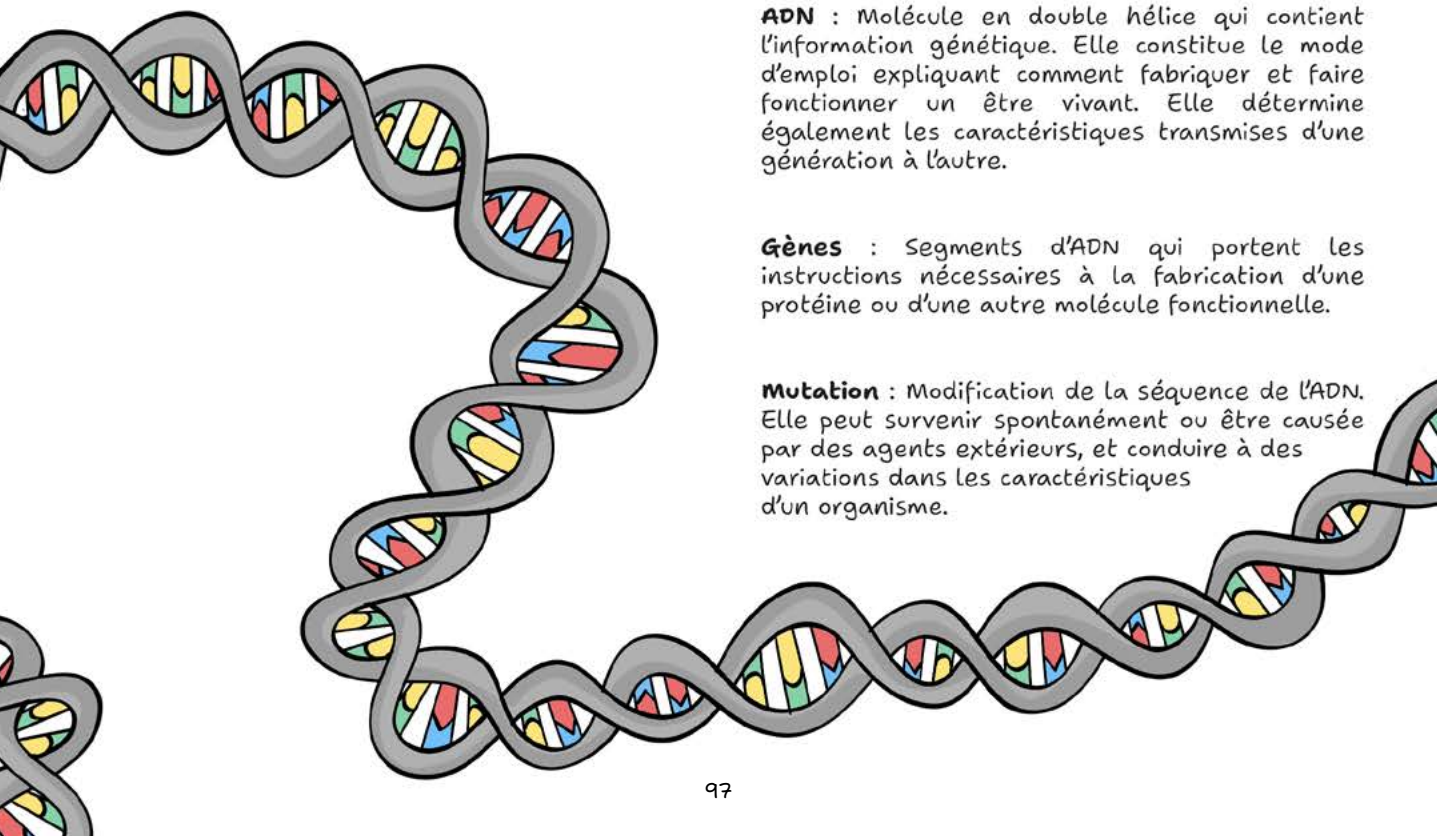


Nucléotide : Petite molécule qui compose l'ADN. L'ordre des nucléotides dans la molécule forme le code génétique. Chaque nucléotide est représenté par une "lettre" (A : adénine, T : thymine, C : cytosine, G : guanine).

ADN : Molécule en double hélice qui contient l'information génétique. Elle constitue le mode d'emploi expliquant comment fabriquer et faire fonctionner un être vivant. Elle détermine également les caractéristiques transmises d'une génération à l'autre.

Gènes : Segments d'ADN qui portent les instructions nécessaires à la fabrication d'une protéine ou d'une autre molécule fonctionnelle.

Mutation : Modification de la séquence de l'ADN. Elle peut survenir spontanément ou être causée par des agents extérieurs, et conduire à des variations dans les caractéristiques d'un organisme.

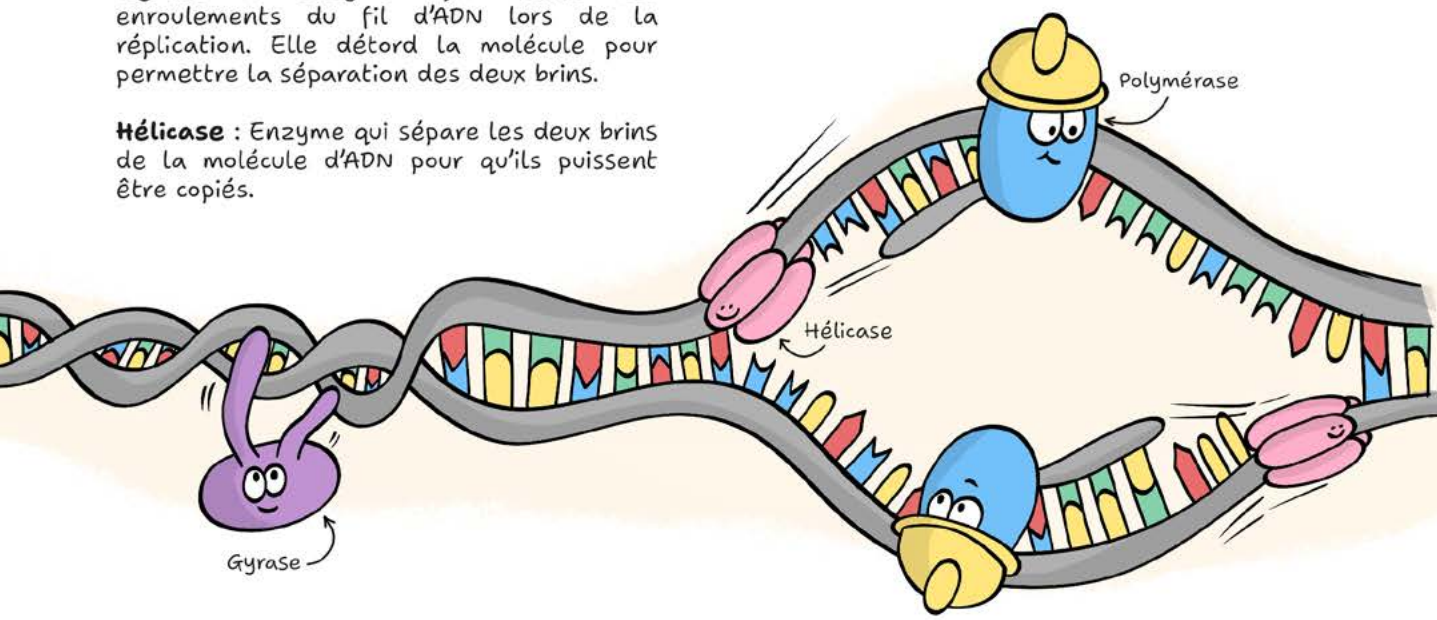


Enzyme : Protéine qui accélère les réactions chimiques dans les cellules sans être consommée. Chaque enzyme agit comme un "outil" spécialisé pour une réaction précise.

Gyrase : Enzyme qui défait les enroulements du fil d'ADN lors de la réplication. Elle détord la molécule pour permettre la séparation des deux brins.

Hélicase : Enzyme qui sépare les deux brins de la molécule d'ADN pour qu'ils puissent être copiés.

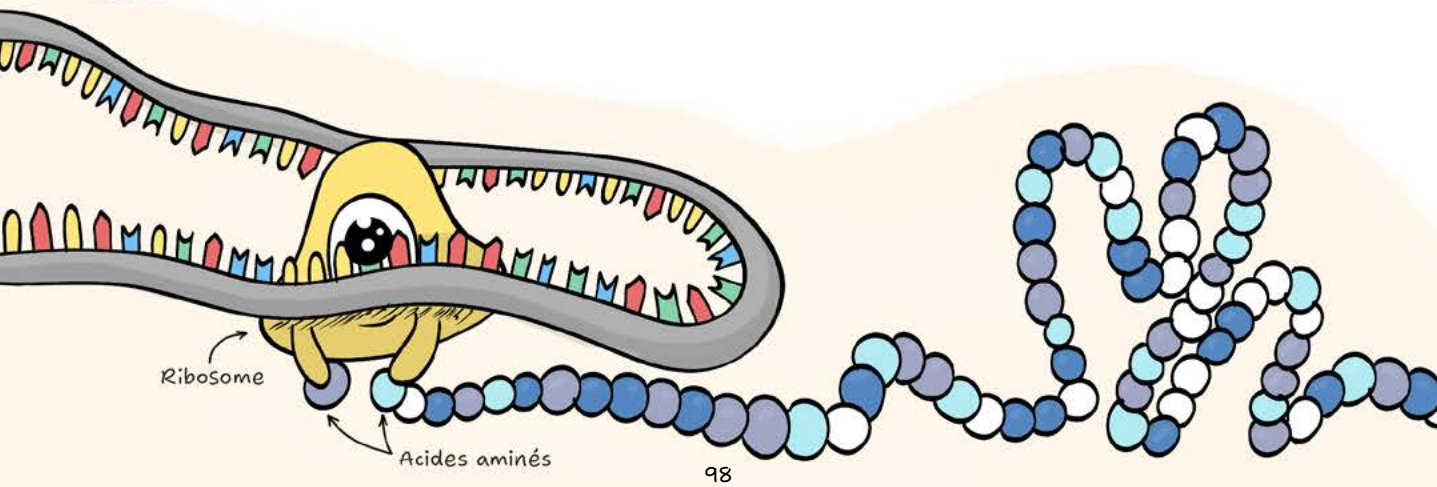
Polymérase : Enzyme qui assemble les nucléotides pour former un nouveau brin d'ADN à partir d'un modèle existant.



Ribosome : Site où sont fabriquées les protéines. Il lit les instructions génétiques pour assembler les acides aminés.

Acides aminés : Petites molécules qui s'assemblent pour former les protéines. Il existe vingt acides aminés différents dans le vivant.

Protéine : Chaîne d'acides aminés repliée en une forme spécifique, qui lui permet d'assurer une fonction précise (comme construire, transporter ou catalyser (accélérer) des réactions).

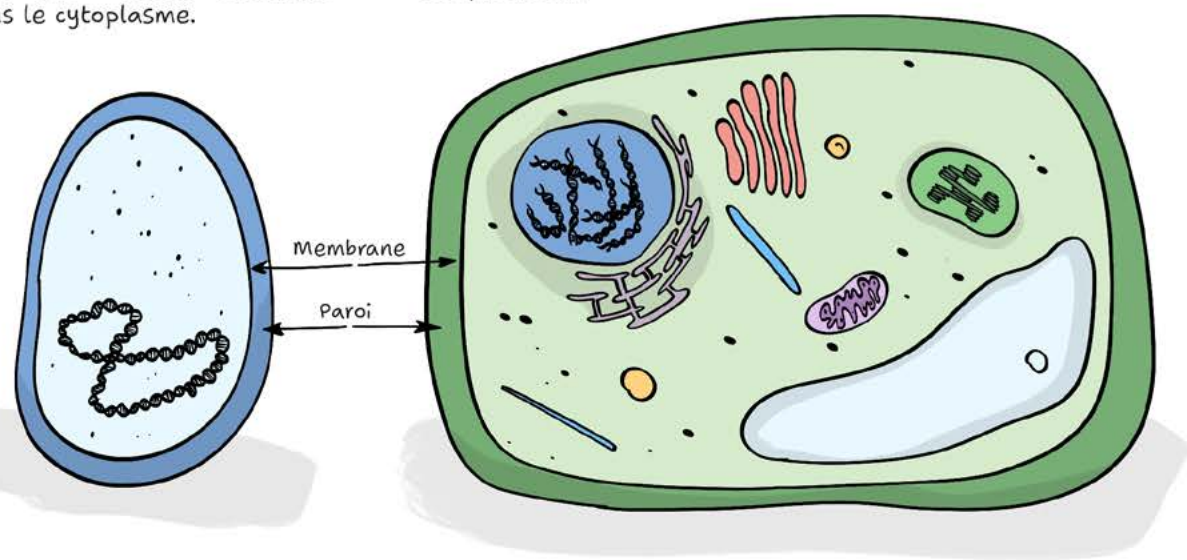


Les cellules et leurs structures

Cellule : Unité de base du vivant. Toutes les formes de vie sont constituées d'une ou de plusieurs cellules.

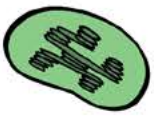
Procaryote : Cellule simple avec un noyau primitif, sans membrane entourant l'ADN. Ainsi l'ADN flotte librement dans le cytoplasme.

Eucaryote : Cellule complexe, avec un noyau et des organites (genre d'organes intracellulaires spécialisés) présente chez les plantes, les animaux, les champignons et les protistes.



Membrane : Enveloppe souple qui délimite la cellule et contrôle les échanges avec l'extérieur.

Paroi : Structure rigide qui entoure certaines cellules (comme celles des bactéries et des plantes), offrant protection et maintien de la forme.



Chloroplaste : Organite (un "organe" cellulaire) présent dans les cellules eucaryotes des plantes et de certaines algues. Il est responsable de la photosynthèse, qui transforme l'énergie solaire en énergie chimique utilisable par la cellule. La photosynthèse convertit également le dioxyde de carbone (CO_2) en oxygène (O_2).

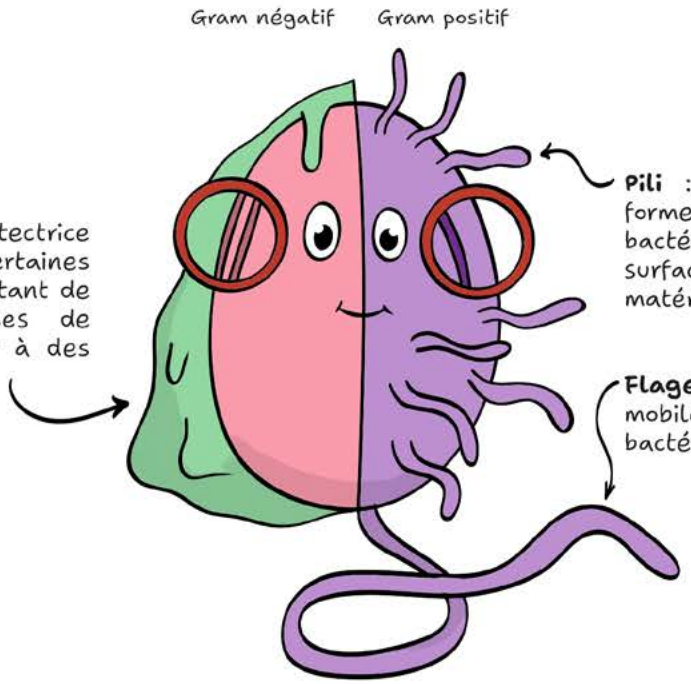


Mitochondrie : Organite présent dans les cellules eucaryotes, qui fournit l'énergie nécessaire à la cellule grâce à la respiration cellulaire.

Les bactéries et leur diversité

Bactéries : Micro-organismes unicellulaires appartenant au groupe des procaryotes. Elles jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus biologiques : digestion, décomposition, production d'oxygène, etc.

Gram : Méthode de coloration qui permet de distinguer deux grands types de bactéries (Gram positif et Gram négatif) selon la composition de leur paroi.



Capsule : Couche protectrice externe entourant certaines bactéries, leur permettant de résister aux défenses de l'hôte ou de se fixer à des surfaces.

Pili : Fines structures en forme de poils qui aident les bactéries à s'accrocher à des surfaces ou à échanger du matériel génétique.

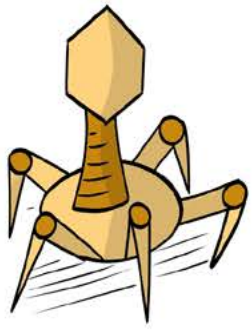
Flagelle : Long filament mobile qui permet aux bactéries de se déplacer.

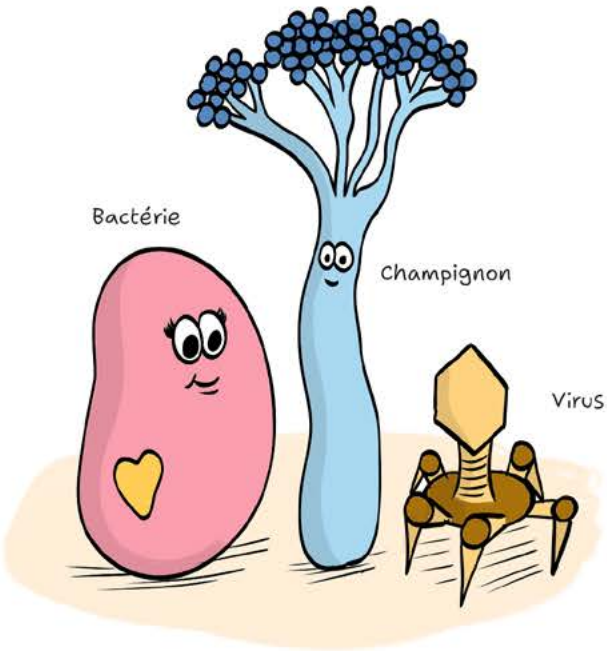


Spore : Forme dormante très résistante que certaines bactéries adoptent pour survivre dans des conditions extrêmes.

Biofilm : Communauté de bactéries vivant ensemble dans une matrice protectrice, souvent collée à une surface (comme la plaque dentaire).

Phages (bactériophages) : Virus qui infectent exclusivement les bactéries. Ils peuvent être utilisés comme alternative aux antibiotiques.





Microbes : Terme générique désignant les micro-organismes invisibles à l'œil nu (bactéries, virus, champignons, protozoaires).

Microbiote : Ensemble des micro-organismes (bactéries, champignons, virus) vivant dans un environnement donné, par exemple dans le corps humain (microbiote intestinal, cutané, etc.).

Système immunitaire : Ensemble de cellules, de tissus et d'organes qui protègent le corps contre les infections. Il inclut les globules blancs, les anticorps, la rate, les ganglions lymphatiques et d'autres composants. Ce système est capable de reconnaître les substances étrangères (comme les virus ou les bactéries) et de les éliminer avant qu'elles ne causent de dommages.

Globules blancs : Cellules du système immunitaire chargées d'identifier et de détruire les agents pathogènes.

Inflammation : Réponse du corps face à une infection ou à une blessure, se manifestant par une rougeur, une chaleur, une tuméfaction et une douleur. Bien que l'inflammation soit nécessaire à la guérison, une inflammation chronique peut être nuisible.

Système lymphatique : Réseau de vaisseaux et d'organes qui transporte la lymphe (un fluide contenant des globules blancs) et aide à éliminer les déchets et toxines du corps, notamment par filtration au niveau des ganglions et de la rate. Il joue un rôle central dans la réponse immunitaire.



Globule blanc



BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages de référence généraux utilisés tout au long de la BD

- N. A. Campbell et J. B. Reece, *Biologie*, 7e édition, Pearson Éducation, 2011.
- G. Tortora, B. Funke et C. Case, *Introduction à la microbiologie*, 2e édition, Pearson Éducation, 2012.

Le commencement

- *Overview of the Universe*, NASA, Science Mission Directorate, 2024.

Une bouffée d'air frais

- T. W. Lyons *et al.*, The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere, *Nature*, 2014.
- I. Zachar, E. Szathmáry, Breath-giving cooperation: critical review of origin of mitochondria hypotheses : Major unanswered questions point to the importance of early ecology, *Biology Direct*, 2017.

Bactérie, qui es-tu ?

- U. Kutschera, Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723): Master of Fleas and Father of Microbiology, *Microorganisms*, 2023.
- D. M. Williams, *Christian Gottfried Ehrenberg (1795-1876): The Man and His Legacy*, The Linnean, 1998.
- J. M. Volland *et al.*, A centimeter-long bacterium with DNA contained in metabolically active organelles, *Science*, 2022.
- E. R. Angert *et al.*, The largest bacterium, *Nature*, 1993.
- M. A. Sierra *et al.*, Microbiome and metagenomic analysis of Lake Hillier Australia reveals pigment-rich polyextremophiles and wide-ranging metabolic adaptations, *Environmental Microbiome*, 2022.
- Yu V. L., *Serratia marcescens*: historical perspective and clinical review, *New England Journal of Medicine*, 1979.

Elle a fait un bébé toute seule

- A. R. Tuttle *et al.*, Growth and maintenance of *Escherichia coli* laboratory strains, *Current Protocols*, 2021.
- B. W. James *et al.*, The physiology and pathogenicity of *Mycobacterium tuberculosis*, *Journal of Applied Microbiology*, 2000.

Lutter pour survivre

- M. J. Eickhoff *et al.*, *Vibrio fischeri* siderophore production drives competitive exclusion during dual-species growth, *Molecular Microbiology*, 2021.
- E. R. Green, J. Mecsas, Bacterial secretion systems: an overview, *Microbiology Spectrum*, 2016.
- M. R. Popoff, Overview of bacterial protein toxins: mode of action and evolution, *Toxins*, 2024.

La Belle au Bois dormant

- M. J. Leggett *et al.*, Bacterial spore structures and their protective role in biocide resistance, *Journal of Applied Microbiology*, 2012.
- R. J. Cano, M. K. Borucki, Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old amber, *Science*, 1995.
- L. Madueño *et al.*, A historical legacy of antibiotic utilization on bacterial seed banks in sediments, *PeerJ*, 2018.

Une forteresse imprenable
- J. Makk *et al.*, Actively forming microbial mats provide insight into the development of microdigitate stromatolites, *Scientific Report*, 2025.

Allô Docteure ? J'ai attrapé un virus !
- L. Cui *et al.*, A comprehensive review on phage therapy and phage-based drug development, *Antibiotics*, 2024.

La maladie frappe
- A. Ciammaruconi *et al.*, Plagued by the past, pressed by the present: a one health perspective on *Yersinia pestis*, *Biomedicines*, 2025.
- A. McCullough *et al.*, Pathogenicity and virulence of *Chlamydia trachomatis*, *Virulence*, 2025.

Les antibiotiques ripostent
- E. M. Halawa *et al.*, Antibiotic action and resistance: updated review of mechanisms and approaches, *Frontiers in Pharmacology*, 2024.
- R. E. L. Procópio *et al.*, Antibiotics produced by *Streptomyces*, *The Brazilian Journal of Infectious Diseases*, 2012.
- P. G. Stansly *et al.*, Studies on polymyxin: isolation and identification of *Bacillus polymyxa* and differentiation of polymyxin from certain known antibiotics, *Journal Bacteriology*, 1947.
- A. Fleming, On the antibacterial action of cultures of a *Penicillium*, with special reference to their use in the isolation of *B. influenzae*, *British Journal of Experimental Pathology*, 1929.

La résistance s'organise
- A. E. Clatworthy *et al.*, Targeting virulence: a new paradigm for antimicrobial therapy, *Nature Chemical Biology*, 2007.
- Antimicrobial resistance – Fact Sheet, World Health Organization (WHO), 2022.
- Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations, The Review on Antimicrobial Resistance, chaired by Jim O'Neill, 2016.
- A. Brauner *et al.*, Distinguishing between resistance, tolerance and persistence to antibiotic treatment, *Nature Reviews Microbiology*, 2016.

Les virus... nos sauveurs ?
- W. C. Summers, Félix Hubert d'Hérelle (1873-1949): history of a scientific mind, *Bacteriophage*, 2017.
- L. Cui *et al.*, A Comprehensive Review on Phage Therapy and Phage-Based Drug Development, *Antibiotics (Basel)*, 2024.

L'équilibre du vivant
- S. Soth *et al.*, Microbiomes in action: multifaceted benefits and challenges across academic disciplines, *Frontiers Microbiology*, 2025.

