

JOËL DE ROSNAY

La symphonie
du vivant

Comment l'épigénétique
va changer votre vie



JOËL
DE ROSNAY

La symphonie du vivant

Voici l'ouvrage sur une des révolutions scientifiques les plus importantes de ces cinquante dernières années. Un livre qui va changer votre vie!

Jusqu'à ces dernières années, la science expliquait que nous étions programmés par notre patrimoine génétique. Or, à la lumière de recherches récentes, les scientifiques revoient leur théorie. La nouvelle révolution en biologie, appelée épigénétique, montre que votre comportement quotidien – ce que vous mangez, l'exercice que vous pratiquez, votre résistance au stress, le style de vie que vous adoptez... – va inhiber ou activer certains de vos gènes. Vous êtes comme le chef d'orchestre d'une symphonie, co-auteur de votre vie, de votre santé, de votre équilibre. Joël de Rosnay raconte cette révolution et ses répercussions sur le « vivant ». Il dispense également de nombreux conseils pour prendre soin de son environnement personnel, et ainsi rester en bonne santé.

Par ailleurs, il élargit cette notion, fondée sur l'interdépendance entre individu et environnement, à la société tout entière. Il dessine les fondements du monde de demain en imaginant le passage d'une démocratie représentative à une démocratie participative, et enjoint les nouvelles générations à faire le pari de moins de compétition et de plus d'optimisme. Il décrit des citoyens engagés à tous les niveaux de décision (politique, économique, sociétal...) et l'avènement d'une économie plus collaborative et « circulaire ».

Ce livre fondamental veut inciter le lecteur à réfléchir aux impacts de cette révolution majeure dans la manière de construire sa vie personnelle et de décider des futures évolutions sociétales.

Joël de Rosnay, docteur ès sciences, est conseiller du président d'Universcience et président exécutif de Biotics International. Ancien chercheur et enseignant au Massachusetts Institute of Technology (MIT) dans le domaine de la biologie et de l'informatique, il a été directeur des Applications de la recherche à l'Institut Pasteur. Il est l'auteur de nombreux best-sellers, parmi lesquels *Je cherche à comprendre*, *Surfer la vie* (Les Liens qui Libèrent), *Le Macroscope* (Seuil) et *2020 : les scénarios du futur* (Fayard).

Joël de Rosnay

La symphonie du vivant

Comment l'épigénétique
va changer votre vie

LLL LES LIENS QUI LIBÈRENT

Introduction

J'ai commencé à me passionner pour l'épigénétique il y a une dizaine d'années, après avoir lu un article du Dr Jean-Claude Ameisen, biologiste et président du Comité d'éthique de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale. J'ai également pu approfondir avec lui l'impact de l'épigénétique sur notre santé et sur le ralentissement du vieillissement dans le cadre de plusieurs groupes de discussion et interventions publiques à propos des biotechnologies et de l'avenir de la médecine. Nos échanges m'ont incité à écrire divers articles sur le sujet et à y consacrer des chapitres dans mes derniers livres.

J'ai aussi publié une vidéo sur Youtube¹ en réponse à la question du journaliste Éric Jouan lors de l'Université de la Terre, en mars 2013, en présence de Jacques Attali et d'Étienne Klein: «Joël de Rosnay, pouvez-vous nous

1. <<https://www.youtube.com/watch?v=XTyhB2QgjKg>>

expliquer en 3 minutes ce qu'est l'épigénétique?» Cette petite vidéo a été reprise des milliers de fois par les internautes sur Facebook, Twitter et de nombreux blogs, signe que le grand public a perçu tout l'intérêt de cette nouvelle discipline «pour le bien vivre».

À la suite de mes recherches, de mes lectures et de mes rencontres, j'ai pris conscience, progressivement, que l'approche représentée par l'épigénétique allait beaucoup plus loin que notre seul corps. S'il est possible d'agir sur un système aussi complexe que l'organisme vivant, pourquoi ne pas appliquer l'épigénétique à un autre système particulièrement complexe? Je veux parler de la société au sein de laquelle nous vivons, travaillons et agissons.

Non seulement ce livre a pour but de vous aider à mieux organiser votre vie et à lui donner du sens, mais il entend vous permettre de mieux vous coordonner avec les autres pour influencer la société dans laquelle vous vivez. En effet, même dans une démocratie comme la nôtre, les systèmes électoraux traditionnels ne suffisent plus à traduire avec efficacité la volonté et les aspirations politiques des citoyens. Beaucoup d'entre nous souhaitent faire évoluer la démocratie actuelle, représentative, vers une démocratie participative. Dans ce livre, j'explique pourquoi il est possible d'appliquer des principes de l'épigénétique pour agir sur l'ADN de nos sociétés et, ainsi, en modifier l'expression, et comment le faire.

Avant l'apparition de l'épigénétique, la plupart des biologistes étaient persuadés que les êtres vivants n'étaient que le produit de leurs gènes. Or nous comprenons depuis peu qu'ils disposent d'un réel potentiel d'action sur leur génome. En effet, notre ADN peut être influencé

par notre environnement personnel : nourriture, exercice physique, vie sociale et amoureuse, entourage, lieu de vie, stress...

Au-delà de la génétique, l'épigénétique est certainement l'une des plus importantes découvertes des vingt dernières années dans le domaine de la biologie. Des recherches récentes ont démontré que le programme ADN pouvait être exprimé, inhibé ou modulé par le comportement des êtres vivants. Il apparaît également qu'un certain nombre de maladies et de troubles mentaux seraient liés à des changements épigénétiques. Étudier l'épigénome et sa régulation se révèle donc essentiel à la compréhension de la « bonne santé ».

Grâce à l'épigénétique, nous connaissons désormais les règles scientifiques de base qui permettent d'agir beaucoup plus rapidement sur notre corps. Des centaines de laboratoires dans le monde travaillent déjà sur le rôle de l'épigénétique dans le traitement du cancer, le ralentissement du vieillissement, l'amélioration de la santé et le maintien d'une santé équilibrée, permettant de se prémunir contre les maladies microbiennes, virales ou encore dégénératives liées à l'âge. L'épigénétique ouvre ainsi une nouvelle voie à la responsabilisation et à la liberté des êtres humains.

Le défi, dès lors, est de réussir à « manager son corps » avec l'épigénétique. Pour agir sur son corps et sur sa vie, il est nécessaire d'en comprendre le mode d'emploi. L'idée de cet ouvrage est aussi d'expliquer comment mettre en pratique les règles de la « bionomie », c'est-à-dire l'économie du corps, dans tous les domaines de la vie pour mieux prévenir les maladies, « vieillir jeune » et en bonne santé plutôt que simplement vivre plus vieux.

Et qu'en est-il au niveau de la société? L'écosystème informationnel dans lequel s'intègre Internet posséderait, de même que les êtres vivants, une sorte d'«ADN» sociétal dont l'information se serait complexifiée par suite des interventions individuelles et massives des internautes. Le codage permanent par les humains de nouvelles fonctions dans l'«écosystème numérique» pourrait ainsi conduire à l'émergence d'une forme d'«épigénétique» de cet écosystème. En d'autres termes, l'expression de l'ADN d'Internet pourrait être modifiable *de l'intérieur* par les comportements des utilisateurs, comme c'est le cas pour les êtres vivants¹.

Et si les «utilisateurs-neurones» que représentent les internautes détenaient ce pouvoir sans en avoir encore conscience? Et si des modifications «épigénétiques» découlaient de l'ensemble des comportements des internautes? Nous aurions alors le pouvoir de changer ce que le biologiste britannique Richard Dawkins appelle non pas les gènes sociaux, mais les *mèmes* – et au-delà, pourquoi pas, de modifier l'«ADN sociétal». Mais comment s'assurer que les effets combinés des actions des internautes et des mèmes au sein de l'organisme Internet soient positifs pour la démographie, les libertés et l'avenir de l'humanité?

Sur le principe de l'analogie gènes/mèmes, ou génétique/mémétique, je propose d'établir une relation entre épigénétique et *épimémétique*. J'entends par épimémétique l'ensemble des modifications de l'expression des mèmes de l'ADN sociétal par le comportement des

1. Joël de Rosnay, «L'ADN d'Internet est-il modifiable de l'intérieur?», *Les Échos*, 2 novembre 2012.

personnes dans une société, une entreprise ou toute forme d'organisation humaine. Ces modifications essaient grâce aux réseaux de communication traditionnels, mais surtout numériques. Grâce aux réseaux sociaux numériques, le comportement des utilisateurs, des électeurs, des politiques, des industriels, des scientifiques... peut modifier l'ADN sociétal (d'une entreprise, d'une association...). En usant de ces réseaux comme de véritables contre-pouvoirs et en orientant collectivement nos comportements vers un même but, nous participons à une « co-régulation citoyenne participative ». Une réelle opportunité pour le citoyen d'évaluer les actions des personnes représentant la société ou agissant en son nom, qu'elles soient ou non élues démocratiquement.

Ce sont ces questions fondamentales pour l'avenir de l'humanité que je souhaite aborder ici, en établissant ce lien audacieux entre biologie et société.

CHAPITRE 1

Comprendre les bases de l'épigénétique

QUAND LES ABEILLES BUTINEUSES SE TRANSFORMENT EN NOURRICES

Notre intérêt pour les abeilles ne date pas d'hier. Dans la Grèce antique, le venin d'abeille était déjà utilisé comme remède antidouleur. Le philosophe grec Démocrite, mort à 109 ans, vers 370 av. J.-C., tout comme son compatriote le poète Anacréon, décédé à l'âge de 115 ans, n'attribuaient-ils pas leur longévité à la consommation de miel? Outre les vertus médicinales de cet insecte, ce sont plus encore ses capacités surprenantes et ses comportements sociaux très élaborés qui fascinent depuis toujours les chercheurs du monde entier.

Le naturaliste suisse François Huber (1750-1831) fut le premier scientifique à comprendre que la reine de la ruche était fécondée dans les airs. Il découvrit également le rôle des antennes et l'origine de la cire d'abeille. Il

démontra que les larves nourries à la gelée royale par les abeilles nourricières se transformeraient à coup sûr en reines. Il ouvrit ainsi la voie à des générations de passionnés qui dévoileraient à leur tour les fantastiques performances de ces insectes pleins de ressources.

Dans leur laboratoire de l'université de l'Arizona, aux États-Unis, Andrew Feinberg et Gro Amdam réalisent avec leurs étudiants Brian Herb et Florian Wolschin de singulières expériences¹. En comparant les cerveaux d'abeilles butineuses (en quête de fleurs et de nourriture) et ceux de nourrices, Herb constate des différences dans les niveaux de «méthylation» de 155 gènes. La méthylation, comme nous le verrons, est le processus permettant d'activer ou de désactiver certains gènes à partir d'un même génome (l'ensemble des gènes de l'organisme) sans le modifier.

Lorsque Florian profite de l'absence des butineuses pour retirer les nourrices des ruches, quelle n'est pas sa surprise de constater que la moitié des butineuses se sont métamorphosées en nourrices! Cette métamorphose est d'autant plus intéressante que l'aspect physique et les comportements des nourrices et des butineuses sont extrêmement différents et font appel à des compétences particulières.

Au cours de cette transformation des butineuses en nourrices, les niveaux de méthylation ont été modifiés dans 107 gènes. Il est à noter que ces gènes interviennent dans la régulation d'autres gènes qui entraîneront des

1. Brian R. Herb *et al.*, «Reversible switching between epigenetic states in honeybee behavioral subcastes», *Nature Neuroscience*, vol. 15, 2012, p. 1371-1373.

changements physiques et comportementaux. Plus étrange encore, ces transformations sont réversibles. Si l'on tente l'expérience inverse en faisant disparaître les nourrices, on s'aperçoit que les butineuses retrouvent leur état d'origine.

Ces travaux sont une parfaite illustration des changements «épigénétiques»: une information extérieure (la disparition des nourrices) déclenche le processus de méthylation. À partir d'un même code génétique, ce processus permet de réguler l'activité des gènes des butineuses de façon à faciliter ou empêcher l'expression de certains d'entre eux. Dans le cas qui nous occupe, la méthylation a donc permis de compenser la perte d'une caste d'abeilles par l'apparition d'une autre (des nourrices devenant butineuses, et inversement). Brian et Florian ont été les premiers à démontrer que le comportement des abeilles était réversible, de même que la méthylation.

LA SYMPHONIE DU VIVANT

Fermez les yeux et imaginez-vous bien calé(e) dans votre siège de l'opéra Bastille. L'Orchestre symphonique de Paris interprète la 9^e symphonie de Beethoven en ré mineur. Vous ressentez la force de ce chef-d'œuvre. Le grand orchestre, dirigé par un chef de talent, irradie la perfection. Tambours, triangles et cymbales résonnent avec fougue. Quand les chœurs entament avec allégresse le dernier mouvement, vous reconnaissez *L'Hymne à la joie* et ressentez intensément l'émotion du public, uni à vous en cet instant inoubliable. Cette mélodie puissante et intemporelle, sans doute la plus connue du

compositeur, est également associée à l'Union européenne, qui l'a choisie comme hymne pour symboliser la fraternité des peuples.

Les notes des différents mouvements de *L'Hymne à la joie* ne peuvent être jouées à la perfection que par des musiciens et un chef d'orchestre capables de leur donner vie en respectant l'intention du compositeur. On peut considérer que les notes de musique sur une portée sont la génétique, tandis que l'épigénétique est la symphonie exécutée à partir de ces notes. Pour comprendre la différence entre «génétique» (la partition) et «épigénétique» (la symphonie), nul besoin d'être mélomane. On conçoit spontanément la nuance entre l'exécution d'une partition par des musiciens jouant d'instruments divers et l'écoute de la symphonie qui résultera de leur interprétation.

Tous les musiciens, ainsi que le chef d'orchestre, disposent de leur partition, qui représente les notes de musique, les accords, les silences, etc. Ces informations, grâce auxquelles la musique peut se transmettre, sont écrites sous forme linéaire et séquentielle: elles se suivent selon un ordre rigoureux permettant l'exécution individuelle en même temps que la synchronisation des musiciens. La justesse et la beauté de la symphonie dépendront de la qualité du jeu de chaque musicien autant que de la direction et de la coordination assurées par le chef d'orchestre.

Notre organisme fonctionne comme un grand orchestre. Le cœur, les poumons, le foie... Chacun doit «jouer sa partition» en harmonie avec tous les autres organes pour interpréter la symphonie du vivant. Notre symphonie personnelle du vivant. Comprendre

l'importance de l'épigénétique, c'est se donner la chance de devenir chef d'orchestre de son propre corps!

DU LIVRE DE LA VIE AU LIVRE DE RECETTES

On peut prendre encore un autre exemple pour expliquer l'épigénétique : celui d'un livre de recettes.

Si l'on représentait l'ADN comme une encyclopédie, chaque volume de ce «livre de la vie» contiendrait les informations propres aux caractères d'une espèce. Selon la célèbre formule du biologiste Thomas Jenuwein, directeur du Max Planck Institute of Immunobiology en Allemagne: «La génétique est à l'épigénétique ce que l'écriture d'un livre est à sa lecture.»

Imaginons que les gènes sont les chapitres du texte, et l'ADN le support de la totalité des informations contenues dans le livre. Pour transmettre ses messages, l'ADN de ce «livre de la vie» doit être décrypté et traduit par l'usine cellulaire. En effet, les cellules doivent être capables de «lire» les informations stockées afin de fabriquer les éléments (les protéines) communs à une espèce, comme ceux qui constituent, par exemple, les membres ou les organes d'un être humain, ou encore le bec et les ailes d'un oiseau, la couleur du pelage, l'odorat, la vision nocturne d'un chat.

Si vous avez déjà utilisé un livre de cuisine, vous comprendrez facilement cette autre métaphore, un peu triviale, pour illustrer ce qu'est l'épigénétique. Les différentes cellules de l'organisme contiennent au sein de leur noyau un même exemplaire d'ADN, renfermant la totalité de l'information génétique nécessaire à toutes les cellules de l'organisme. Pourtant, chaque cellule (de foie,

de rein ou de muscle) ne lit que les gènes (les pages du livre de cuisine) utiles à la production des protéines dont elle a besoin pour son propre fonctionnement.

Si vous faites régulièrement la cuisine, vous marquez probablement les pages de votre livre de recettes pour retrouver plus rapidement celles que vous préférez. Certains arrachent ou collent entre elles les pages qu'ils n'utilisent jamais. Au fil des ans, il arrive que des pages, victimes d'«accidents» (comme des produits renversés), deviennent illisibles. Dans le livre de recettes représenté par l'ADN, certaines «pages» peuvent être marquées en vue d'un usage immédiat. D'autres, au contraire, peuvent avoir été «collées» les unes aux autres, comme je l'ai décrit, et seront donc illisibles. Les marqueurs chimiques et biologiques permettent la lecture d'un gène (une recette) pour produire les protéines et les enzymes indispensables au fonctionnement de l'usine cellulaire. Ils peuvent aussi inhiber un gène (celui-ci existe toujours, mais il devient «silencieux») à l'aide de nombreux mécanismes et fonctions. Ils dépendent notamment du comportement d'un organisme vivant dans le temps¹.

Certes, le fait de connaître la séquence des lettres chimiques qui composent un gène ne suffit pas pour prédire de quelle façon celui-ci s'exprimera dans telle ou telle cellule, voire dans l'organisme tout entier. Le comportement et l'environnement jouent aussi leur rôle. Mais comment mettre en œuvre, *mettre en musique*, l'épigénétique? La réponse réside dans la prise de conscience de sa participation personnelle à cette

1. Sur les marqueurs chimiques, voir la page «Définitions» en fin d'ouvrage.

symphonie. Pour employer une expression populaire, on peut «faire quelque chose pour soi» plutôt que de s'en remettre à l'adversité ou à une programmation prédéterminée. Nous avons réellement la liberté d'expérimenter et d'agir, et vous le découvrirez au fil de ces pages.

Comme je l'ai dit en introduction, l'une des principales conclusions des travaux sur la révolution épigénétique nous apprend que les individus ne sont pas (totalement) «prédéterminés» par leurs gènes. Leur comportement et leur volonté d'agir peuvent aussi changer leur vie. Certes, personne ne peut prétendre maîtriser entièrement sa vie, mais chacun d'entre nous a le pouvoir d'optimiser ses chances de vivre en meilleure santé, à condition d'adopter certains types de comportement.

Qu'on puisse partiellement agir sur sa santé, son vieillissement, et donc sur le cours de sa vie, c'est plutôt une bonne nouvelle... À nous d'adapter nos modes de vie pour activer les gènes contribuant à nous protéger plus efficacement contre certaines maladies (diabète, cancer, maladies cardiovasculaires, parmi d'autres). Comme je le montrerai plus loin, des études récentes ont montré que nos comportements alimentaires influençaient certains gènes. La nourriture serait donc un acteur essentiel de l'épigénétique.

ADN : TROIS LETTRES CAPITALES POUR UNE DÉCOUVERTE MAJEURE

Avant de poursuivre l'exploration du nouveau monde de l'épigénétique, je souhaite revenir sur une découverte essentielle : celle de l'ADN. Pour le grand public, ce sigle évoque surtout des recherches en paternité ou des

enquêtes criminelles. En témoigne la série *Les Experts*, où la police scientifique américaine, à la pointe de la science et de la technologie, se montre capable de « faire parler » l'ADN. En effet, depuis les années 1990, de nouvelles méthodes d'investigation permettent d'identifier un délinquant grâce à la plus petite trace de sa présence sur une scène de crime. À partir d'une quantité infime d'ADN (cheveu, sécrétions corporelles, cellule de peau...), les « experts » obtiennent des « profils » génétiques, voire des portraits-robots en 3D d'une précision impressionnante. Et, miracle de la science, ils peuvent ainsi boucler leurs enquêtes en un temps record. Du moins dans les séries télé...

Quittons l'univers de la fiction pour revenir à la réalité de ces trois lettres, capitales dans tous les sens du terme. Alors que la génétique, cette discipline visant à étudier le caractère héréditaire des gènes transmis par les parents à leurs descendants, existe depuis le début du xx^e siècle, l'ADN, lui, n'a été identifié que dans les années 1940. Et, bien qu'il ait permis de mieux comprendre les mécanismes évolutifs des espèces vivantes (humaine, animales, végétales), ses découvreurs ignoraient tout de sa structure moléculaire jusqu'en 1953.

Comment les molécules d'ADN parviennent-elles à s'assembler et à se dupliquer en conservant les codes de l'hérédité ? La réponse est restée un mystère, jusqu'à ce que le biophysicien britannique Francis Crick et le généticien américain James Watson lèvent le voile. Ils sont, en effet, les premiers à décrire l'ADN comme une molécule en trois dimensions. Leur représentation d'une structure en double hélice enroulée autour d'un axe dont chaque brin est formé d'une suite de groupes

chimiques appelés « bases » va devenir célèbre dans le monde entier.

DE LA DOUBLE HÉLICE AU PROJET GÉNOME HUMAIN

À l'époque, la publication par ces deux jeunes chercheurs, dans la revue *Nature*, de leurs travaux sur la structure en double hélice de l'ADN suscita peu d'intérêt : curieusement, les scientifiques sous-évaluèrent l'impact de cette immense découverte. Ils considéraient l'ADN comme un produit chimique. Pourtant, c'est de sa structure très particulière en trois dimensions que découlent ses étonnantes propriétés de mémorisation et de duplication de l'information génétique. Leur découverte fondamentale vaudra à Crick et Watson le prix Nobel de physiologie et de médecine en 1962.

Cette révolution des sciences de la vie va bouleverser les connaissances en génétique. Les scientifiques ont compris, grâce à elle, les principes fondamentaux de la transmission des caractères héréditaires et la possibilité de mutations par la modification des « lettres » du message génétique. Au niveau moléculaire, tout se passe comme si une « faute de frappe » dans le texte en transformait totalement la signification.

C'est dans ce contexte que des chercheurs lancent, dans les années 1990, le Projet génome humain. Des équipes de recherche transdisciplinaires (composées de bio-informaticiens, de biologistes, de médecins, d'informaticiens, de mathématiciens, de physiciens...) vont réussir à lire, écrire et, d'une certaine manière, *programmer* le vivant. Un chantier pharaonique : le séquençage

complet (la cartographie) de l'ADN du génome humain ne sera achevé qu'en 2003, après avoir mobilisé des moyens considérables. Depuis ce succès, nous sommes en mesure de décrypter et d'écrire les codes du vivant avec des machines, de fabriquer des gènes synthétiques et, en quelque sorte, de créer le logiciel du vivant¹.

Outre l'ADN, l'autre grand acteur de cette révolution, ce sont les protéines. L'ADN contient les gènes (c'est-à-dire l'information, les plans moléculaires), tandis que les protéines et les enzymes en sont les exécutants. À partir des plans de l'ADN, ce sont elles qui construisent les « briques » de l'usine-cellule, et elles constituent les « machines-outils » qui assurent son fonctionnement. Élément de base, donc, de toute cellule vivante, les protéines se répartissent en deux catégories : les protéines de construction (le collagène, par exemple) et les enzymes ou protéines d'action (des nanomachines qui digèrent, découpent ou recollent entre elles d'autres molécules). Pour bien comprendre leur rôle, retenez ces deux mots clés : *transcription* et *traduction*. La transcription, c'est le processus de copie de l'ADN en ARN messager (acide ribonucléique messager), lequel participe à la conversion de l'ADN en protéine. Quant à la traduction, elle permet l'expression des gènes portés par l'ADN².

1. Voir Joël de Rosnay, en collaboration avec Fabrice Papillon, *Et l'homme créa la vie. La folle aventure des architectes et des bricoleurs du vivant*, LLL, 2010.

2. Sur la relation entre ADN, ARN et protéines, voir la page « Définitions » en fin d'ouvrage.

Le rôle essentiel des protéines pour la vie

Présentes dans chacune de nos cellules, les protéines jouent un rôle essentiel. Elles forment le phénotype moléculaire (cellulaire et organique), c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques biochimiques d'un organisme vivant. À noter que le génotype désigne l'ensemble des gènes d'un organisme vivant, alors que le phénotype représente le caractère visible attribué par un ou plusieurs gènes. Par exemple, certains gènes déterminent la couleur de la peau, des cheveux ou des yeux, la taille des mains, la forme de la tête, etc. D'autres gènes indiquent au corps comment se comporter face à une agression extérieure, par exemple à un virus.

Des protéines capables de catalyser des réactions chimiques dans les cellules (on les appelle les enzymes) vont ouvrir la double hélice de l'ADN et transcrire des gènes de l'ADN en un simple «brin» appelé «ARN messager» (ARNm), qui contient une copie du code génétique. Si vous observiez les mécanismes de synthèse des protéines à une échelle nanoscopique (moléculaire), vous pourriez voir l'ARN quitter le noyau de la cellule par de petites ouvertures pour aller se fixer sur des particules cellulaires complexes faites de protéines et d'ARN, appelées «ribosomes». Agissant comme des «têtes de lecture», les ribosomes peuvent lire le code génétique. Ensuite, grâce à des adaptateurs appelés «ARN de transfert», les acides aminés qu'ils transportent s'accrochent les uns aux autres dans l'ordre exact du code génétique, créant ainsi une chaîne de protéines.

N'oublions pas que les protéines sont constituées d'acides aminés. Si vous ne voyez pas à quoi ressemble une protéine, imaginez vingt wagons isolés les uns des autres: chacun de ces wagons représente un des vingt acides aminés