



COPIER L'ARN EN ADN : LA DÉCOUVERTE QUI A RÉVOLUTIONNÉ LA BIOLOGIE ET LES BIOTECHNOLOGIES

David Baltimore*

Division de Biologie, Institut Californien de Technology (Caltech), Pasadena, CA, États-Unis

Les virus sont des systèmes biologiques uniques. Ce sont des parasites qui utilisent les cellules d'autres organismes, appelés hôtes, pour se multiplier, provoquant souvent des maladies chez l'hôte. L'une des caractéristiques les plus fascinantes des virus est que certains d'entre eux contiennent de l'ARN comme matériel génétique, alors que tous les autres organismes connus utilisent de l'ADN. Au début de ma carrière, j'ai travaillé sur les virus à ARN, en essayant de comprendre leur comportement et leurs mécanismes fondamentaux. Lorsque je me suis concentré sur les virus à ARN connus pour causer un cancer, j'ai découvert qu'ils pouvaient fabriquer de l'ADN à partir de leur génome à ARN, dans un processus appelé transcription inverse. Il s'agit d'une grande découverte qui a changé la façon de penser des biologistes et qui a eu de profondes implications dans les domaines de la biologie, de la médecine et de la biotechnologie. Dans cet article, je te parlerai des virus, je te guiderai dans la découverte de la transcription inverse et décrirai certaines conséquences majeures de nos découvertes en termes d'amélioration, voire de sauvetage, de nombreuses vies humaines.

Le professeur David Baltimore a reçu le prix Nobel de Physiologie ou de Médecine en 1975, avec les professeurs Renato Dulbecco et

Howard M. Temin, pour leurs découvertes concernant l'interaction entre les virus tumoraux et le matériel génétique de la cellule.

LE MONDE FASCINANT DES VIRUS

VIRUS. Minuscules particules qui contiennent de l'information. Pour se reproduire, ils doivent obligatoirement infecter une cellule. On trouve des virus chez tous les organismes cellulaires.

Les **virus** sont de toutes petites particules qui infectent des cellules et peuvent causer des maladies. Il existe un nombre incalculable de virus et chaque organisme végétal, animal, et même les bactéries, possède ses propres virus. On a déjà identifié plus d'un million de virus différents ! Certains te sont probablement familiers, comme le virus de la grippe, le virus SRAS-CoV-2 responsable du COVID-19 ou encore celui qui provoque la varicelle et le zona. Peut-être as-tu aussi entendu parler du virus VIH, qui provoque le SIDA, et du virus Ebola. Les virus sont très différents, par leur structure (Figure 1), le nombre d'espèces qu'ils infectent (s'ils en infectent une seule ou plusieurs) et leur dangerosité pour les organismes qu'ils infectent, qu'on appelle leurs hôtes.



Figure 1. La diversité des virus. Les virus se présentent sous des formes variées. Chaque organisme a son lot de virus (adapté de [ici](#)).

Les virus se multiplient en pénétrant dans une cellule hôte et en y délivrant leur matériel génétique, que la cellule hôte traite ensuite comme le sien. De cette manière, les virus "asservissent" leur cellule hôte, lui faisant produire de nombreuses copies du virus. Les virus se multiplient extrêmement rapidement, en 20 à 30 minutes chez les bactéries et en quelques heures chez les mammifères, y compris les humains. Ils se propagent en passant d'un hôte à un autre. Par exemple, certains virus peuvent passer d'un être humain à un autre par le biais d'éternuements ou lorsqu'une personne touche une surface qui a été touchée auparavant par une personne infectée. Nous pouvons nous défendre contre certains virus grâce à la vaccination, et les virus qui n'infectent que les humains sont plus faciles à contrôler.

Comme tu le sais peut-être, l'ADN est la molécule qui porte l'information génétique chez tous les organismes cellulaires. Les virus, qui sont des organismes mais ne sont pas constitués de cellules, sont uniques en ce sens que chez certains d'entre eux, appelés virus à ARN, le matériel génétique est de l'ARN, pas de l'ADN. Les ARN sont des molécules ressemblant à l'ADN qui permettent aux cellules de traduire les informations de l'ADN en

ARN MESSENGER (ARNm).

Un type d'ARN qui porte les instructions pour la fabrication des protéines et se déplace du noyau à l'usine à protéines de la cellule (le ribosome).

ENZYME. Protéine qui accélère la vitesse des réactions chimiques dans l'organisme.

VIRUS TUMORAUX À ARN.

Virus à ARN qui provoquent des tumeurs en intégrant leur génome dans le génome de l'hôte.

protéines, molécules qui assurent beaucoup des fonctions des cellules. Une des hypothèses actuelles est que les virus sont les vestiges d'un monde antérieur où l'ARN était le support de l'information génétique (pour en savoir plus sur ce monde à ARN, tu peux lire cet [article](#)). Selon qu'ils sont à ADN ou à ARN, les virus ont leur propre façon de fabriquer de l'**ARN messenger (ARNm)** [1], un type d'ARN qui transporte aux ribosomes l'information leur permettant de fabriquer une protéine. J'ai créé une méthode de classification des virus, appelée la Classification de Baltimore, qui classe les virus selon la façon dont ils fabriquent leurs ARNm. Dans cette classification, il y a deux types de virus à ADN qui n'utilisent que de l'ADN comme information pour fabriquer leurs ARNm (les groupes I et II), trois types de virus à ARN qui n'utilisent que de l'ARN comme information pour fabriquer leurs ARNm (groupes III, IV et V), et deux types de virus qui utilisent à la fois de l'ARN et de l'ADN pour fabriquer leurs ARNm (groupes VI et VII) [1, 2].

L'ÉTUDE DES VIRUS À ARN

Lorsque j'ai commencé ma carrière scientifique dans les années 1960, je voulais travailler sur la chimie fondamentale de la vie. Il m'a semblé que les virus offraient la meilleure opportunité de le faire, car ce sont les organismes les plus simples au monde et nous pouvions les étudier et comprendre leur fonctionnement en détail, jusqu'au niveau moléculaire. Dans les années 1960, nous savions très peu de choses sur la manière dont les virus à ARN se multiplient.

Dans un premier temps, j'ai travaillé sur un virus à ARN qui se développe chez la souris, proche du virus de la poliomyélite et appartenant au groupe IV selon la classification de Baltimore (comme le SRAS-CoV-2), en essayant de comprendre comment ce virus se multiplie et comment il affecte la vie de son hôte. J'ai décrypté le mécanisme de réplication de ce virus et j'ai ensuite étendu mes recherches à d'autres virus à ARN. Au cours de ces études, j'ai découvert plusieurs protéines importantes appelées **enzymes** qui fabriquent l'ADN et l'ARN [3, 4].

Vers 1970, j'ai commencé à me demander s'il existait d'autres modalités de réplication des virus à ARN qui n'auraient pas encore été découvertes. J'étais particulièrement intéressé par des virus à ARN qui causent certains cancers, appelés **virus tumoraux à ARN**. Lorsque j'ai commencé à étudier ces virus, je ne me doutais pas qu'une sacré surprise m'attendait.

LA TRANSCRIPTION INVERSE

Dans les années 1960, un de mes collègues, Howard Temin, a suggéré que les virus tumoraux à ARN pouvaient faire une copie

**PRÉCURSEUR
RADIOACTIF.**

Molécule utilisée pour la fabrication d'une autre molécule (des nucléotides pour un acide nucléique). Si le précurseur est radioactif, la molécule qui sera synthétisée en l'incorporant sera également radioactive.

ADN de leur ARN. Personne n'avait de preuve que cela était vrai et de nombreuses personnes n'y croyaient pas, car l'idée dominante (appelée "dogme central") était que l'ARN était fabriqué à partir de l'ADN (dans un processus appelé transcription), et non l'inverse (Figure 2). Néanmoins, il n'y avait rien d'impossible à copier l'ARN en ADN, car l'ARN et l'ADN sont des molécules qui se ressemblent chimiquement et se répliquent selon des mécanismes similaires. En 1970, j'ai décidé de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'ARN pourrait être copié en ADN. Pour ce faire, j'ai récupéré le contenu de virus tumoraux à ARN et l'ai mis en présence de **précurseurs radioactifs** de l'ADN (encadré 1). En quelques jours d'expériences, j'ai pu montrer que l'échantillon de virus tumoraux à ARN pouvait fabriquer de l'ADN [4].

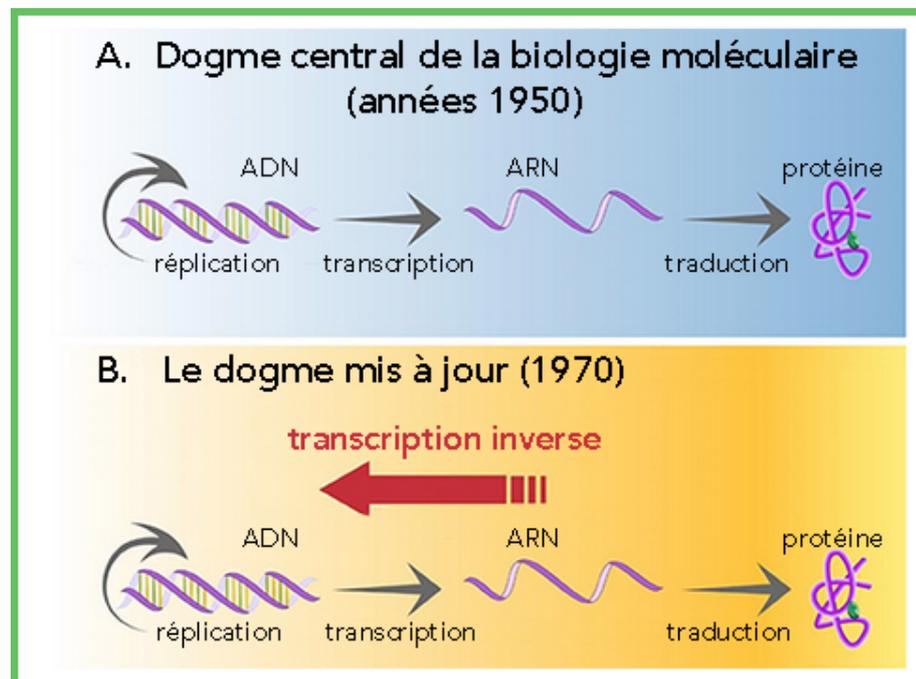


Figure 2. Un changement de dogme. (A) Le dogme central de la biologie moléculaire dans les années 1950. La réplication de l'ADN est le processus qui fabrique deux molécules d'ADN identiques à partir d'une molécule d'ADN. La transcription est le processus qui fabrique de l'ARN à partir d'ADN. La traduction est le processus qui fabrique des protéines à partir d'ARNm. Avant la découverte de la transcription inverse, on avait montré que l'ARN était fabriqué à partir de l'ADN par le processus de transcription, mais la majorité des scientifiques ne pensaient pas que l'ADN pouvait être fabriqué à partir de l'ARN. (B) Le dogme mis à jour en 1970. Ma découverte en 1970 a montré que l'ADN pouvait aussi être fabriqué à partir de l'ARN, par un processus appelé transcription inverse. Cette découverte a modifié l'une des idées les plus fondamentales (dogme) de la biologie moléculaire concernant la réplication des acides nucléiques.

Mes résultats signifient que les virus tumoraux à ARN peuvent fabriquer de l'ADN à partir de leurs génomes à ARN, car il n'y avait pas d'autre source possible d'ADN dans l'expérience. J'ai également montré que si l'on éliminait l'ARN des échantillons de virus, on ne détectait pas d'ADN à la fin de l'expérience. Il s'agissait d'une découverte majeure, celle de ce qu'on appelle aujourd'hui la

TRANSCRIPTION

INVERSE. Processus par lequel l'ADN est synthétisé en copiant une molécule d'ARN - l'inverse de la transcription normale, dans laquelle l'ARN est synthétisé en copiant une molécule d'ADN.

transcription inverse, pour laquelle j'ai reçu, avec Renato Dulbecco et Howard Temin, le prix Nobel de Physiologie ou de Médecine en 1975, cinq ans seulement après ces expériences

Encadré 1 – Fabriquer de l'ADN grâce aux virus tumoraux à ARN.

L'expérience dans laquelle j'ai utilisé des précurseurs radioactifs pour découvrir l'ADN s'est déroulée comme suit : j'ai acheté des nucléotides prêts à l'emploi (les éléments constitutifs de l'ADN - A, T, C et G), marqués à l'hydrogène radioactif. J'ai placé le virus et les nucléotides marqués dans un tube à essai et j'ai utilisé un détergent pour ouvrir l'enveloppe de lipides qui recouvre le virus. Les nucléotides marqués sont alors entrés en contact avec les composants du virus. J'ai ajouté du magnésium, qui est nécessaire à l'activité de certaines enzymes, et j'ai placé le tout dans un bain-marie à 37°C. J'ai ensuite utilisé un filtre pour séparer les longues molécules d'ADN des petites molécules comme les nucléotides radioactifs et, à l'aide d'un détecteur de radioactivité, j'ai constaté que ces longues molécules étaient radioactives ! Pour prouver que ces molécules étaient bien de l'ADN, j'ai utilisé une enzyme appelée DNase qui dégrade l'ADN en nucléotides. Lorsque j'ai ajouté de la DNase aux produits de la réaction et que je les ai filtrés à nouveau pour éliminer les petites molécules, je n'ai obtenu aucun signal radioactif. Cela prouve que le matériau que j'ai mesuré dans la réaction initiale était bien de l'ADN.

UNE NOUVELLE ENZYME QUI CONVERTIT L'ARN EN ADN

Lorsque j'ai découvert la transcription inverse, on savait que l'ARN et l'ADN sont synthétisés par des enzymes, et je savais donc qu'il existait une enzyme capable de réaliser la transcription inverse dans les particules de virus. À l'époque, nous ne savions pas qui était cette enzyme qui convertissait l'ARN en ADN, et nous ne comprenions pas non plus comment elle fonctionnait. Mes collègues et moi-même avons travaillé pendant dix années supplémentaires pour découvrir l'enzyme impliquée dans la transcription inverse et pour déchiffrer le mécanisme complexe par lequel elle copie l'ARN en ADN. Pour ce faire, nous avons mis au point un nouveau système dans lequel nous pouvions ajouter des molécules d'ARN connues et examiner ce qu'elles produisaient. Ce système nous a permis d'observer des réactions chimiques que personne n'avait jamais vues auparavant.

Nous avons trouvé l'enzyme qui copie l'ARN en ADN et l'avons appelée **transcriptase inverse** [5]. Plusieurs années après la découverte de cette enzyme, des scientifiques d'autres laboratoires ont décrit sa structure à l'aide d'une méthode d'imagerie appelée cristallographie aux rayons X (pour en savoir plus, [voir](#)). Ces scientifiques ont montré que la transcriptase inverse a une structure qui ressemble à une main avec des "doigts", un "pouce" mobile

TRANSCRIPTASE

INVERSE. Enzyme qui effectue la transcription inverse.

qui ressemble à une main avec des "doigts", un "pouce" mobile qui peut s'ouvrir et se fermer, et une zone centrale appelée site actif, où l'ADN est fabriqué (Figure 3).

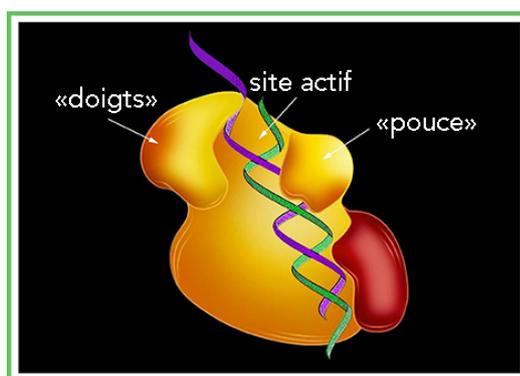


Figure 3. Structure de la transcriptase inverse. La transcriptase inverse a une structure qui ressemble à une main avec des "doigts" et un "pouce" mobile qui peut s'ouvrir et se fermer. Dans sa partie centrale, elle possède un site actif où l'ADN est synthétisé en copiant l'ARN. En jaune : la partie de l'enzyme avec l'activité de transcription inverse. En violet : l'ARN. En vert : le nouveau brin d'ADN synthétisé en copiant la séquence de l'ARN. En rouge : une partie de l'enzyme qui dégrade l'ARN après la synthèse du brin d'ADN ; cela permet la synthèse du deuxième brin de l'ADN (complémentaire du premier). [Adapté de [6]].

DE NOUVEAUX TRAITEMENTS D'INFECTIONS VIRALES ET DE CANCERS

Notre découverte de la transcription inverse a eu des retombées majeures – à la fois pour notre compréhension de mécanismes cellulaires fondamentaux et pour le traitement de maladies. Tout d'abord, notre découverte a ouvert la voie à la compréhension d'un type particulier de virus, les **rétrovirus**. Ce sont des virus à ARN qui utilisent la transcription inverse pour produire de l'ADN à partir de l'ARN du virus. Cet ADN viral est alors intégré (inséré) dans l'ADN de la cellule hôte (grâce à une autre enzyme, appelée intégrase) et devient ainsi partie du matériel génétique de cette cellule (Figure 4). La cellule hôte produit alors des protéines virales qui participent à l'assemblage de nouveaux virus.

Le virus VIH, responsable du SIDA, est un exemple bien connu de rétrovirus et la cause de très nombreux décès. Ce virus a été découvert en 1983, environ deux ans après que le SIDA soit devenu une pandémie mondiale (pour en savoir plus sur le SIDA, tu peux lire [ici](#)). Le VIH a été détecté grâce à l'activité de sa transcriptase inverse et des médicaments qui bloquent l'activité de cette enzyme et traitent cette maladie ont été développés. Si nous n'avions pas découvert la transcription inverse en 1970, dix ans environ avant l'émergence du SIDA, il n'aurait probablement pas été possible d'identifier le VIH et il aurait fallu beaucoup plus de temps pour comprendre ce qu'est le SIDA. La découverte relativement rapide

RÉTROVIRUS. Virus qui fabrique de l'ADN en copiant son génome ARN par transcription inverse.

du VIH a permis de sauver et d'améliorer la vie de très nombreuses personnes, qui auraient eu moins de chance si le SIDA était apparu avant la découverte de la transcription inverse.

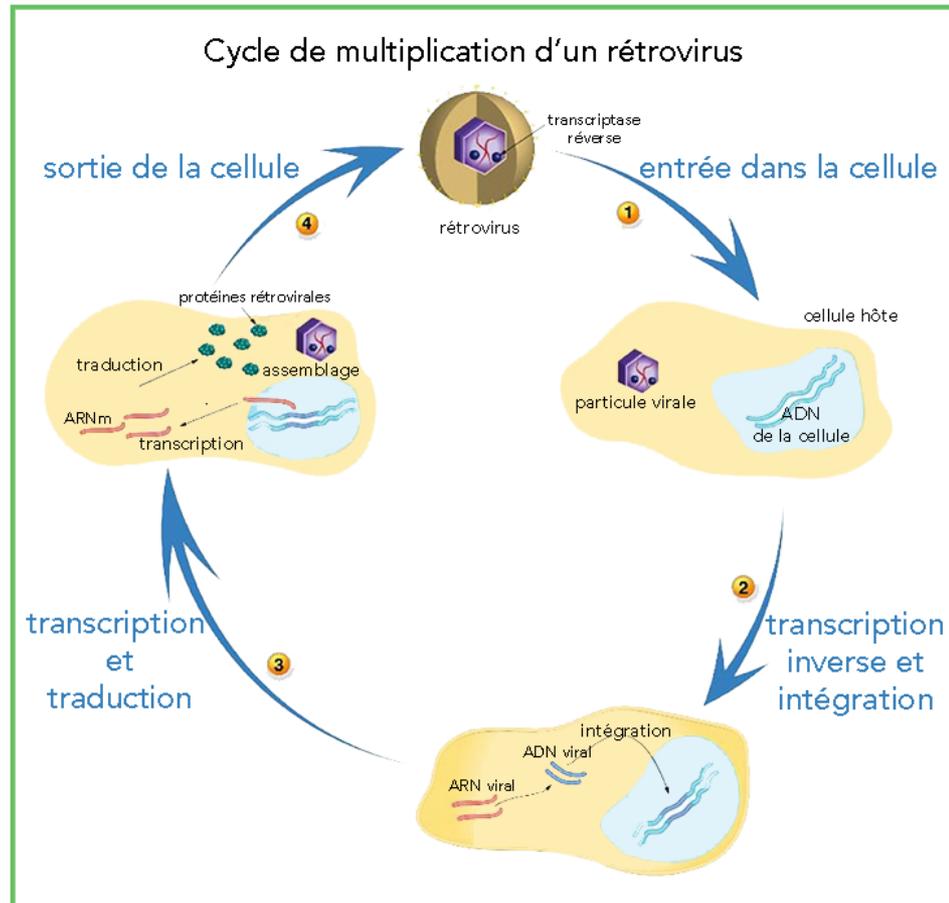


Figure 4. Cycle de multiplication d'un rétrovirus. (1) Un rétrovirus pénètre dans la cellule hôte et se débarrasse de son enveloppe extérieure. (2) Le rétrovirus utilise la transcription inverse qui produit de l'ADN viral à partir de son matériel génétique ARN. L'ADN viral est ensuite intégré dans le matériel génétique de la cellule hôte, devenant ainsi une partie de l'ADN de la cellule hôte. (3) Après l'intégration, la cellule hôte transcrit l'ADN viral en ARNm, puis traduit l'ARNm viral en protéines virales qui sont ensuite assemblées avec de l'ARN viral en nouvelles particules de virus. (4) Les nouveaux virus sont libérés et infectent d'autres cellules (Image adaptée de David Baltimore).

Notre découverte a également joué un rôle clé dans le traitement de cancers. Avant notre découverte, la façon dont les virus à ARN provoquent le cancer était une énigme. Dans le cancer, les cellules passent d'une croissance contrôlée à une croissance incontrôlée, parfois sous forme d'amas de cellules appelées tumeurs dans les tissus de l'organisme ou sous forme de cellules à croissance rapide dans le sang, comme dans le cas d'une leucémie. L'ARN étant généralement une molécule peu stable, il n'était pas logique que l'ARN puisse provoquer un changement permanent dans le comportement d'une cellule. L'ADN, en revanche, est une molécule très stable, et on a découvert que les virus tumoraux à ARN effectuaient une transcription inverse de leur ARN en ADN, porteur de gènes, comme l'ADN des cellules. Ces nouveaux gènes

sont introduits dans l'ADN de la cellule et produisent des protéines virales. Certaines de ces protéines virales forcent la cellule à croître et à se diviser continuellement, faisant de la cellule infectée une cellule cancéreuse.

Le lien entre le cancer et l'activité de certains gènes, que nous avons découvert en étudiant les virus tumoraux à ARN, s'est avéré être un processus très important dans le développement du cancer. Notre découverte a fourni une hypothèse sur ce qui ne va pas dans les cellules cancéreuses, et elle s'est avérée vraie pour de nombreux types de cancers, pas seulement ceux qui sont causés par des virus. Notre idée que le cancer pourrait être un problème génétique a élargi le champ de la recherche sur le cancer et a déclenché la découverte de médicaments qui sauvent des vies, y compris un "médicament miracle" contre certaines leucémies, le Gleevec, qui bloque certaines protéines signalant aux cellules de se multiplier. Le développement de ces médicaments s'est appuyé sur la compréhension du fait qu'un gène spécifique était à l'origine d'un type spécifique de cancer. Lorsque nous pouvons inhiber l'activité de la protéine spécifique produite par ce gène, nous pouvons inhiber ce cancer.

UTILISATION EN BIOTECHNOLOGIE ET EN THÉRAPIE GÉNIQUE

Notre découverte a également contribué à faire progresser les **biotechnologies**, qui consistent souvent à créer des protéines souhaitées pour diverses applications, y compris des médicaments. L'une des premières questions que nous nous sommes posées après avoir découvert la transcriptase inverse était la suivante : peut-elle copier n'importe quel ARN ou seulement l'ARN viral ? Il s'est avéré que la transcriptase inverse peut copier n'importe quel ARN en ADN, si nous lui donnons en tant qu'amorce un petit morceau d'ADN complémentaire à l'ARN que nous voulons copier. Cela signifie que nous pouvons transformer l'information de n'importe quel ARNm en ADN, c'est-à-dire en gène. Nous pouvons introduire ce gène dans des cellules qui peuvent alors produire beaucoup d'ARNm, et donc une grande quantité de la protéine d'intérêt à partir de ce gène. Cette capacité a été révolutionnaire pour les entreprises biotechnologiques et a conduit au développement de nombreux nouveaux médicaments.

Les rétrovirus sont couramment utilisés dans la thérapie génique, comme outil de guérison de maladies génétiques [7]. Cela consiste à introduire du matériel génétique dans des cellules d'un organisme de façon à soigner la cause d'une maladie dont il souffre. Un exemple très réussi de thérapie génique rétrovirale est le traitement de la maladie des bébés-bulles, officiellement

BIOTECHNOLOGIE.

Domaine industriel qui utilise des processus biologiques pour développer des produits.

appelée déficit immunitaire combiné sévère (DICS). Ces bébés n'ont pas de système immunitaire fonctionnel, de sorte que toute infection peut leur être mortelle. Dans le passé, ces bébés devaient vivre dans des bulles en plastique qui les séparaient de l'environnement extérieur afin qu'ils ne tombent pas malades. Aujourd'hui, de nouvelles thérapies géniques rétrovirales qui remplacent les gènes endommagés des bébés par des gènes fonctionnels peuvent restaurer leur système immunitaire et leur permettre de vivre une vie normale.

À l'origine, je n'avais pas l'intention d'étudier des maladies et d'essayer de guérir les gens. Je ne m'intéressais qu'à la science fondamentale. J'étais curieux des virus et je voulais les comprendre et savoir comment ils affectaient leurs hôtes. Mais il s'est avéré que les nouvelles connaissances auxquelles j'ai contribué ont eu, et ont toujours, de grandes implications pour la biotechnologie et certains domaines de la médecine. Il s'agit là d'un exemple d'un thème récurrent en science : les applications qui améliorent la vie, voire qui la sauvent, découlent souvent de nouvelles connaissances scientifiques fondamentales.

RECOMMANDATIONS POUR LES JEUNES ESPRITS

Lorsque je travaille avec des étudiants, je les encourage à être aussi indépendants que possible, à réfléchir de manière autonome aux problèmes et aux solutions et à travailler sur ces problèmes dans des laboratoires qui les soutiennent dans leur quête d'indépendance. Il est souvent difficile pour les jeunes étudiants de travailler de manière indépendante, mais ils doivent le faire parce que la science est basée sur le travail et les connaissances de chaque individu. De nos jours, nous mettons l'accent sur la coopération et le travail collaboratif, et c'est très important. Mais en fin de compte, c'est l'imagination, les connaissances et le travail acharné de chaque scientifique qui conduisent à des découvertes telles que la transcriptase inverse et tant d'autres qui sont faites chaque jour. C'est pourquoi j'encourage mes étudiants et je t'encourage à choisir une carrière qui te donne de l'indépendance le plus tôt possible et qui te permet de trouver ta propre voie dans la science (Figure 5). Cela signifie que tu ne te contentes pas d'imiter la façon dont tes superviseurs et conseillers font de la science, mais que tu trouves ta propre façon de faire les choses. Pour mener à bien une étude, tu dois avoir une connaissance approfondie du sujet sur lequel tu te concentres, un organisme ou une maladie en particulier. Lorsque tu débutes en biologie, où les choses sont compliquées et requièrent des compétences nombreuses et variées, tu dois avoir une compréhension approfondie de ce que tu as appris et te concentrer uniquement sur un ou deux problèmes définis, car cela te permettra

d'approfondir encore tes connaissances. Plus tard dans ta carrière, tu pourras choisir d'avoir une vision plus large de ce qui se passe dans d'autres domaines de la biologie et d'autres domaines scientifiques, mais au début de ta carrière, il est très important de te concentrer sur un projet et de l'approfondir.



Figure 5. Recommandations pour les jeunes esprits. J'encourage tous ceux qui sont intéressés par une carrière scientifique d'être indépendants et de trouver leur propre voie.

Mon plus grand plaisir en tant que scientifique est de découvrir de nouvelles choses en essayant de résoudre des problèmes biologiques. Je pense que c'est la vie la plus gratifiante que l'on puisse avoir et j'encourage les gens à s'engager dans cette voie, si leur esprit s'y prête.

Beaucoup de gens ne veulent pas passer leur temps à résoudre des problèmes et c'est très bien aussi. Le plus important est de trouver ce qui vous fait plaisir et de vous y consacrer à plein temps. Il n'est pas facile d'être un scientifique, pas plus qu'il n'est facile de faire quoi que ce soit avec un engagement total et en profondeur. Mais une fois que vous avez atteint cette profondeur, vous obtenez des récompenses que vous ne pourrez jamais obtenir d'une autre manière.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Noa Segev pour avoir mené l'entretien qui a servi de base à ce document et pour en avoir été le co-auteur, ainsi que Zehava Cohen pour avoir fourni les figures.

RÉFÉRENCES

1. Baltimore, D. 1971. Expression of animal virus genomes. *Bacteriol. Rev.* 35:235–41.
2. Koonin, E. V., Krupovic, M., and Agol, V. I. 2021. The Baltimore classification of viruses 50 years later: how does it stand in the light of virus evolution? *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 85:e00053-21. doi: 10.1128/MMBR.00053-21
3. Baltimore, D., and Franklin, R. M. 1962. The effect of Mengovirus infection on the activity of the DNA-dependent RNA polymerase of L-cells. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 48:1383–90.
4. Baltimore, D. 1970. Viral RNA-dependent DNA polymerase: RNA-dependent DNA polymerase in virions of RNA tumour viruses. *Nature* 226:1209–11.
5. Coffin, J. M., and Fan, H. 2016. The discovery of reverse transcriptase. *Annu. Rev. Virol.* 3:29–51. doi: 10.1146/annurev-virology-110615-035556
6. Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., and Walter, P. 2002. Site-Specific Recombination. In *Molecular Biology of the Cell*. 4th ed. New York, NY: Garland Science.
7. Anson, D. S. 2004. The use of retroviral vectors for gene therapy-what are the risks? A review of retroviral pathogenesis and its relevance to retroviral vector-mediated gene delivery. *Genet. Vacc. Ther.* 2:1–13. doi: 10.1186/1479-0556-2-9

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi: 10.3389/frym.2023.1080663 ; Baltimore D (2023) Turning RNA Into DNA: The Discovery That Revolutionized Biology and Biotechnology. *Front. Young Minds* 11:1080663).

TRADUCTION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science.

ÉDITION : Jean Marie Clément et Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 26 Octobre 2022 ; **ACCEPTÉ** le 15 Mars 2023 ;
PUBLIÉ EN LIGNE le 31 Mai 2023.

ÉDITEUR : Idan Segev, Hebrew University of Jerusalem, Israel

MENTORS SCIENTIFIQUES : Ishita Choudhary and Fatemeh Talebian

CITATION : Baltimore D (2023) Turning RNA Into DNA: The Discovery That Revolutionized Biology and Biotechnology. *Front. Young Minds* 11:1080663. doi: 10.3389/frym.2023.1080663

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2023 Baltimore.

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES EXAMINATEURS

KRISH, 13 ANS

Krish est un élève de 7^{ème} année et est passionné par la recherche et les phénomènes scientifiques. Krish est très actif dans les discussions scientifiques et aime parler des découvertes scientifiques avec ses camarades de classe, ses cousins, ses professeurs et ses parents. Krish aime jouer au football et est champion de natation.

MEHRANEH, 15 ANS

Bonjour ! Je m'appelle Mehraneh. J'aime lire, faire la cuisine et dessiner. J'aime aussi voyager. Je voudrais devenir avocate.

MOHAMMAD, 12 ANS

Bonjour ! Je m'appelle Mohammad. J'aime les Légos, les jeux de construction et faire du sport. Plus tard, je veux être ingénieur.

AUTEUR

DAVID BALTIMORE

David Baltimore est un virologue américain et professeur de biologie à l'Institut de technologie de Californie (Caltech, Californie, États-Unis). Le professeur Baltimore a obtenu une licence en chimie au Swarthmore College (Pennsylvanie, États-Unis). Il a ensuite étudié pendant un an au Massachusetts Institute of Technology (MIT, Massachusetts, États-Unis) et a poursuivi ses études à l'université Rockefeller (New York, États-Unis), où il a obtenu un doctorat en virologie animale. Entre 1963 et 1964, le professeur Baltimore a été chercheur postdoctoral en biophysique

au MIT. Il décide ensuite de changer d'orientation et étudie les virus animaux à l'Albert Einstein College of Medicine (New York, États-Unis). En 1965, le professeur Baltimore a obtenu son premier poste indépendant au Salk Institute à La Jolla (Californie, États-Unis). En 1968, il retourne au MIT en tant que membre de la faculté, où il travaille actuellement, et concentre ses recherches sur le problème du cancer. De 1997 à 2006, le professeur Baltimore a été président de Caltech. Pendant cette période, il a également été président de l'American Association for the Advancement of Science. Au cours de sa carrière, le professeur Baltimore a reçu de nombreuses récompenses, dont le NAS Award in Molecular Biology (1974), le prix Nobel de Physiologie ou de Médecine (1975), la médaille Sir Hans Krebs (1997), la National Medal of Science (1999) et le prix Lasker (2021). [*baltimo@caltech.edu](mailto:baltimo@caltech.edu)