

## LE MONDE SECRET DE L'ADN « SAUTEUR »

Eva Satovic-Vuksic\* et Miroslav Plohl

Division de Biologie Moléculaire, Institut Ruder Boškovic, Zagreb, Croatie

Les transposons sont des segments particuliers d'ADN qui peuvent modifier des gènes et créer de nouveaux caractères, contribuant ainsi à rendre chaque être vivant spécial. Les transposons ont la capacité étonnante de se déplacer au sein de l'ADN d'un organisme, et ils peuvent même « voyager » entre différents organismes ! Leur déplacement peut être activé par un stress, ce qui aide les organismes à y faire face et à s'adapter. Les chercheurs utilisent les transposons comme des systèmes de livraison pour aider à guérir des maladies. En outre, l'étude des transposons peut fournir de nombreuses informations sur l'évolution de la diversité de la vie sur Terre au cours de millions d'années. Les transposons peuvent s'entraider dans leurs voyages, ce qui leur permet de travailler en équipe. Leur découverte a été récompensée par un prix Nobel.

### QU'EST-CE QUE LA BIODIVERSITÉ ?

Notre monde contient une grande variété de formes de vie, comprenant les animaux (dont les êtres humains), les plantes et de nombreux organismes minuscules. L'incroyable variété des êtres vivants sur notre planète s'appelle la **biodiversité**. La biodiversité est indispensable car elle permet à notre planète de rester en bonne santé. Chaque organisme joue un rôle important. Certains organismes

**BIODIVERSITÉ.** Diversité biologique des organismes vivants.

**TRANSPOSONS.** Segments d'ADN qui peuvent se déplacer à l'intérieur du génome.

**GÉNOME.** Ensemble du contenu en ADN d'un organisme.

**GÈNE.** Segment d'ADN responsable d'une certaine fonction ou d'un certain caractère.

**FONCTION BIOLOGIQUE.** Ce que fait une protéine, une cellule, un tissu, un organe etc. pour le fonctionnement général d'un organisme.

**CARACTÈRE.** Particularité ou caractéristique d'un organisme, comme la couleur des yeux ou la taille.

purifient l'air, d'autres pollinisent les plantes et d'autres encore recyclent les nutriments. La biodiversité aide l'environnement à rester équilibré, et diverses formes de vie sur Terre nous fournissent de la nourriture, des médicaments et de nouvelles technologies. La biodiversité peut être influencée par de nombreux facteurs. Parfois, de nouvelles espèces apparaissent, d'autres disparaissent. Dans cet article, nous te parlons des **transposons** et des multiples façons dont ils influencent la biodiversité.

## QU'EST-CE QU'UN TRANSPOSON ?

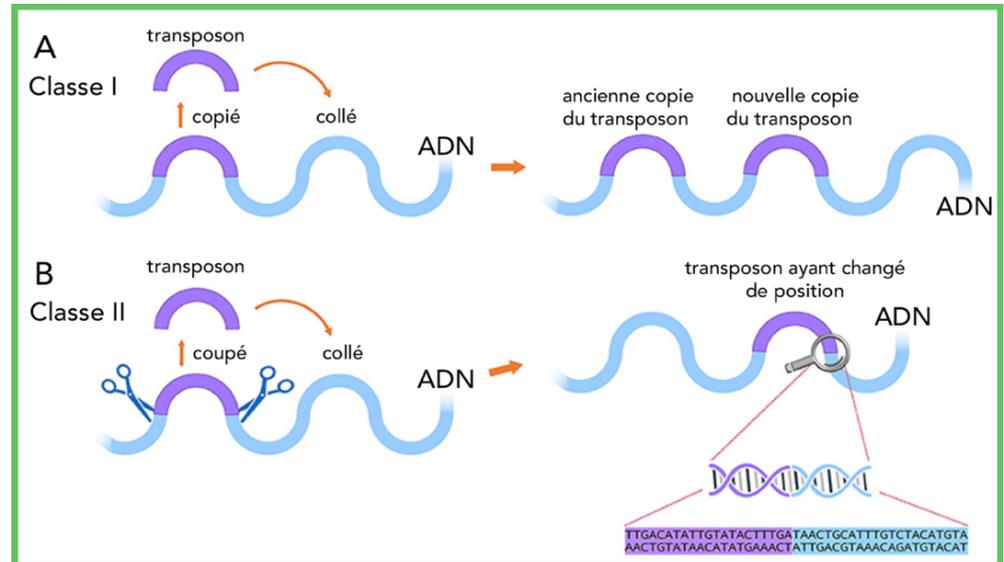
Comme tu le sais peut-être déjà, l'ADN contient les informations pour que notre corps, comme celui de tous les êtres vivants, fonctionne. Chaque molécule d'ADN est constituée de deux brins enroulés l'un sur l'autre, construits à partir de quatre substances chimiques appelées bases. Le nom abrégé de ces quatre bases est A, G, C et T. L'ensemble de l'ADN d'un organisme est appelé son **génome**. De quoi le génome est-il composé ? Une partie de cet ADN est constituée de **gènes** et chaque gène est responsable d'une **fonction biologique** ou d'un **caractère** spécifique. Mais nos gènes représentent moins de 2 % de notre ADN. Qu'en est-il du reste du génome ? La fonction de ces 98 % d'ADN « supplémentaire » n'est pas tout de suite apparue clairement aux scientifiques et, au début, certains ont pensé qu'il s'agissait de « déchets » inutiles. Mais ce n'est pas le cas !

Une partie de ces segments d'ADN ont la capacité fascinante de se déplacer à l'intérieur d'un génome, et on les appelle transposons. Les transposons constituent une part importante des génomes de nombreux organismes des animaux, y compris des humains, et des plantes. Les transposons ont été découverts dans les années 1940 par la scientifique Barbara McClintock [1]. La communauté scientifique de l'époque était sceptique à propos des idées de Barbara McClintock, car beaucoup pensaient que des segments d'ADN ne pouvaient pas se déplacer d'une position à l'autre dans un génome. Cependant, des décennies plus tard, cette découverte a été confirmée. Les recherches de McClintock sur les transposons lui ont même valu un prix Nobel en 1983 !

Il existe plusieurs types de transposons et les deux catégories principales sont appelées transposons de classe I et de classe II (**Figure 1**). Les transposons de classe I utilisent un processus appelé « copier-coller » pour changer de position dans le génome. Cela signifie qu'ils font une copie d'eux-mêmes et l'insèrent à un nouvel endroit, ce qui donne deux transposons identiques à deux endroits. Les transposons de classe II utilisent un mécanisme de « couper-coller » : ils se coupent de leur position d'origine et s'insèrent à un nouvel endroit [2]. Dans ce cas, le nombre de copies du transposon n'augmente pas. Lorsque le moment est venu pour les transposons de classe II de se déplacer, une

**TRANSPOSASE.** Protéine qui aide les transposons à se déplacer vers de nouveaux emplacements dans le génome.

protéine appelée **transposase** agit comme des ciseaux moléculaires, coupant le transposon de son emplacement d'origine (**Figure 1**). Une fois le transposon libéré, la transposase l'accompagne vers son nouvel emplacement dans l'ADN et l'aide à s'y insérer. La machinerie de réparation de l'ADN fixe les deux extrémités du transposon au site d'insertion. Dans le cas des transposons de classe I, d'autres protéines aident à faire les copies supplémentaires du transposon.



**Figure 1.** Il existe deux types de transposons. **(A)** Les transposons de classe I se copient d'abord eux-mêmes, puis la nouvelle copie est « collée » ailleurs dans le génome. **(B)** Les transposons de classe II n'utilisent pas l'étape de la copie. Des « ciseaux » moléculaires (transposase) extraient ces transposons du génome, puis ils sont collés à un nouvel endroit.

Les transposons coopèrent ! Certains transposons possèdent tous les outils nécessaires pour se déplacer d'un endroit à un autre du génome, tandis que d'autres transposons ne les ont pas et ne peuvent pas se déplacer seuls [2]. Cependant, ces transposons peuvent « faire de l'auto-stop » avec ceux qui ont les bons outils, en empruntant leurs outils pour se déplacer dans le génome. Un vrai travail d'équipe !

## COMMENT LES TRANSPOSONS CONTRIBUENT-ILS À LA BIODIVERSITÉ ?

Jusqu'à présent, les scientifiques ont découvert plusieurs façons importantes dont les transposons contribuent à la biodiversité. Chacune est expliquée ci-dessous.

### Les transposons sont des architectes de la diversité

Les transposons peuvent agir comme des architectes du génome, en déplaçant des gènes vers de nouveaux emplacements ou même en reliant des segments de parties distinctes du génome. Le déplacement et la combinaison de gènes peuvent modifier les instructions indiquant à l'organisme comment fonctionner [2]. Parfois, ces changements conduisent à de nouveaux caractères qui rendent les individus différents les uns des autres, augmentant ainsi la biodiversité.

Par exemple, les pommes ont différentes saveurs, n'est-ce pas ? Certaines sont sucrées et d'autres acides. Les gènes de la pomme sont comme de petites recettes responsables du caractère sucré ou acide. Les transposons agissent comme des cuisiniers sournois qui changent la recette — ils peuvent donner un goût acide à une pomme sucrée ou un goût plus sucré à une pomme acide.

Le tournesol est un autre exemple. Certains de ses gènes sont responsables de la hauteur de la plante. Des transposons peuvent s'insérer dans ces instructions et les modifier, de sorte qu'un tournesol qui était censé être petit peut finir par devenir très grand ! Les transposons peuvent également affecter la coloration d'un animal. Pense aux rayures ou aux taches sur les tigres ou les léopards. Des transposons peuvent s'insérer dans les gènes responsables de ces colorations et créer un nouveau motif. La couleur de la peau des serpents peut changer de la même manière. Des transposons peuvent également modifier la couleur du pelage des souris, des chiens et des loups. Les insectes peuvent avoir des yeux de couleurs différentes et les poules peuvent pondre des œufs avec des coquilles de couleurs différentes. Une chose similaire se produit chez les poissons : un transposon peut rendre un poisson albinos, c'est-à-dire complètement incolore.

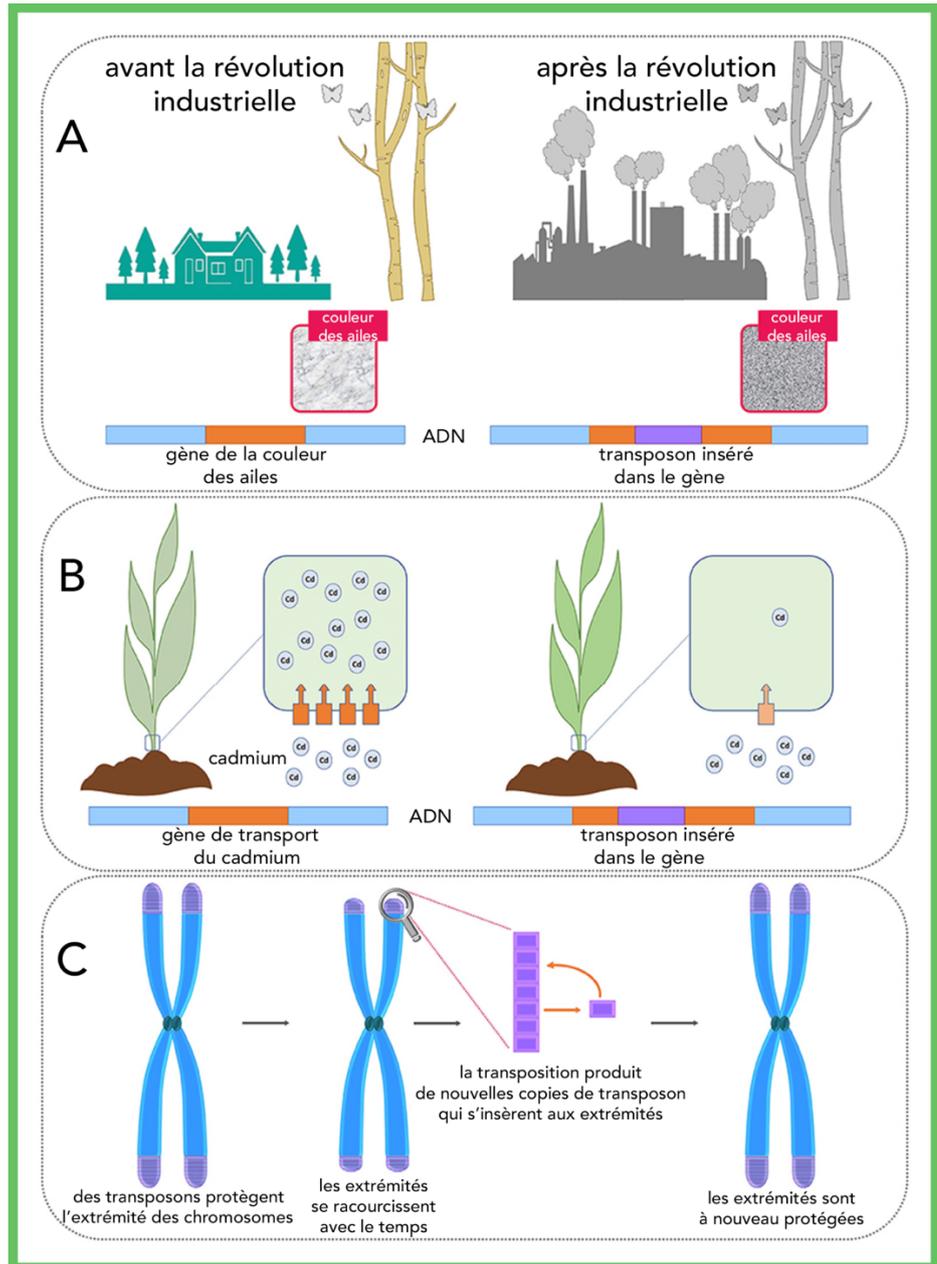
### **Les transposons permettent l'adaptation et la protection**

Lorsque les transposons se déplacent, ils peuvent s'insérer à l'intérieur d'un gène et modifier son fonctionnement [2]. Dans certains cas, ces modifications sont néfastes et provoquent des maladies. Dans d'autres cas, ils peuvent être bénéfiques et même rendre une espèce mieux adaptée à son environnement. L'histoire d'un papillon de nuit, la phalène du bouleau, en est un exemple classique [3]. Au début du 19<sup>e</sup> siècle, toutes les phalènes du bouleau étaient de couleur claire avec des taches sombres. Cependant, en 1864, un naturaliste anglais a découvert un papillon de nuit complètement sombre. C'était très intéressant ! Pendant la révolution industrielle, la pollution due aux usines recouvrait les arbres de suie. Les papillons sombres pouvaient se camoufler sur ces arbres, ce qui réduisait le risque qu'ils soient vus et mangés (Figure 2A). Bien plus tard, les scientifiques ont identifié qu'un transposon était responsable de cette coloration foncée. Ce transposon a sauté à l'intérieur d'un gène du papillon de nuit appelé *cortex*, responsable de la couleur des ailes, ce qui a entraîné la production d'une plus grande quantité de pigment foncé. Sans ce changement, ces papillons de nuit n'auraient pas survécu.

### **Les transposons sont des témoins du passé**

Les transposons peuvent nous aider à découvrir la biodiversité qui existait dans le passé, un peu comme des fossiles génétiques. Les

transposons existent depuis très longtemps. Certains étaient actifs il y a des millions d'années et sont devenus inactifs au fil du temps.



**Figure 2.** (A) Les transposons aident les espèces à s'adapter aux changements de l'environnement. Avant la révolution industrielle, les phalènes du bouleau avec des ailes claires étaient fréquentes. L'insertion d'un transposon dans le gène de la couleur des ailes a modifié son activité, rendant la couleur des ailes plus foncée. Ces papillons plus foncés étaient mieux cachés des prédateurs sur des arbres qui avaient changé de couleur à cause de l'utilisation intensive du charbon et ils sont devenus plus nombreux que les papillons aux ailes claires. (B) Les transposons peuvent protéger les organismes contre des conditions dangereuses dans l'environnement. Dans cet exemple, un transposon a modifié un gène de sorte que les cellules végétales absorbent moins un métal toxique, le cadmium. (C) Chez la *Drosophile*, des transposons protègent les extrémités des chromosomes et participent ainsi à la stabilité du génome.

**DROSOPHILE.** Petite mouche de 2 à 4mm, aussi appelée mouche du vinaigre ou mouche à fruits.

Toutefois, ils subsistent dans l'ADN des organismes, le plus souvent sous forme de morceaux. En étudiant la présence et les types de transposons dans les génomes de divers organismes, les scientifiques

**MALADIES GÉNÉTIQUES.**  
Maladies dues à la  
modification d'un gène.

**EMPREINTE GÉNÉTIQUE.**  
Motifs uniques dans l'ADN  
permettant d'identifier des  
individus.

peuvent comprendre comment les espèces sont liées les unes aux autres, même chez des organismes qui ont disparu et qu'on ne trouve que dans des musées. En étudiant les transposons anciens, les scientifiques peuvent reconstituer l'histoire de l'évolution et les relations entre les espèces, comme des détectives qui suivent des indices ! De cette façon, les transposons révèlent en partie l'histoire de la transformation de la vie sur Terre au cours de millions d'années.

### **Les transposons sont des héros du sauvetage**

Les transposons sont également devenus des outils utiles pour la recherche médicale. Les scientifiques peuvent modifier les transposons en laboratoire et les utiliser pour transmettre des gènes importants à des cellules particulières du corps. Cela peut aider à traiter certaines **maladies génétiques** en remplaçant ou en corrigeant des gènes défectueux. Ces transposons agissent comme un « système de livraison » qui apporte des instructions utiles au bon endroit dans le corps. Ils peuvent maintenir les organismes en bonne santé et même sauver des vies !

### **Les transposons sont des équipes de secours lors de crises**

Lorsque les organismes sont confrontés à des situations stressantes, comme des températures extrêmes, des substances dangereuses ou d'autres défis, ils produisent des signaux qui les aident à faire face au stress. Ces signaux peuvent réveiller des transposons « endormis », qui se mettent alors à « sauter » dans le génome. L'activation des transposons modifie ainsi l'information génétique de l'organisme ; certaines de ces modifications peuvent être bénéfiques pour l'adaptation de l'organisme à ces nouvelles conditions et à sa survie [4]. Par exemple, un transposon activé par le stress est impliqué dans la réponse des plants de riz à un métal toxique appelé cadmium. Les plants de riz possèdent un gène responsable de la pénétration du cadmium dans leurs cellules. Un transposon s'est inséré dans ce gène et l'a désactivé. Cela a permis de réduire la quantité de cadmium absorbée par les plantes et de les aider à rester en bonne santé (**Figure 2B**). Comment cela a-t-il contribué à la biodiversité ? Il existe désormais un nouveau type de riz, protégé contre le cadmium.

### **Les transposons sont des marqueurs de la biodiversité**

La technique d'**empreinte génétique** utilisant les transposons est une technique innovante et puissante pour étudier et identifier différentes variétés de plantes. Les transposons peuvent s'insérer à différents endroits de l'ADN de la plante, de sorte qu'au fil du temps, chaque plante accumule son propre ensemble de copies de transposons. Cela crée une empreinte génétique unique. En comparant les empreintes de transposons des génomes de différentes plantes, les scientifiques peuvent déterminer le degré de parenté de ces plantes. Les plantes

dont les empreintes de transposons sont similaires sont susceptibles d'être étroitement apparentées, tandis que celles dont les empreintes sont très différentes sont plus éloignées. De cette manière, les transposons aident les scientifiques à suivre la biodiversité.

### **Les transposons sont des « voyageurs à longue distance »**

Les transposons peuvent passer d'une espèce à l'autre ! Deux études récentes indiquent même un transfert ancien de transposon d'insecte à plante. Les transposons entrant dans un nouvel organisme, s'insèrent dans son ADN, devenant ainsi une partie du génome du nouvel organisme [5]. En modifiant le génome de l'organisme qu'ils atteignent, les transposons contribuent à la biodiversité.

### **Les transposons augmentent (amplifient) la taille des génomes**

Tu te souviens de la façon dont les transposons de classe I se copient eux-mêmes ? Eh bien, plus cela se produit, plus le génome de l'organisme s'agrandit. Par exemple, une augmentation extrême du nombre de transposons dans le maïs il y a environ 3 millions d'années a doublé la taille de son génome [6]. Dans le génome d'un type de blé cultivé, 96 % de l'ADN est composé de transposons. L'existence de nombreuses variétés de plantes cultivées est liée à l'activité des transposons.

### **Les transposons sont des gardiens du génome**

Les transposons peuvent parfois jouer le rôle de gardiens du génome, en le maintenant stable. C'est le cas chez la drosophile : des transposons sont situés aux extrémités de la molécule d'ADN, c'est-à-dire à l'extrémité des chromosomes (Figure 2C). Ces extrémités sont sujettes au raccourcissement et à la dégradation au cours du temps et doivent être gardées intactes. C'est ce qu'assurent ces transposons en produisant de nouvelles copies : cela permet d'éviter la perte d'informations génétiques par raccourcissement des chromosomes.

## **CONCLUSIONS**

Aujourd'hui, les transposons sont reconnus comme des constructeurs importants du génome et des moteurs de son évolution. Comme tu l'as vu, leurs contributions à la biodiversité sont diverses et importantes (Figure 3). Ils jouent le rôle d'architectes, de conteurs, de voyageurs, de guérisseurs, de gardiens, d'auto-stoppeurs et bien plus encore. Les transposons sont impliqués dans de nombreux processus importants qui modifient et façonnent le génome. Il reste encore beaucoup de mystères à élucider sur les transposons. Comment leur mouvement au sein des génomes et entre génomes est-il régulé ? Comment peuvent-ils être utilisés en médecine ? Comment les transposons se comporteront-ils lorsque l'environnement de la Terre changera ? Ont-ils d'autres effets sur la biodiversité ? Nous savons déjà que les

transposons sont importants, mais nous pensons qu'il y a beaucoup plus à découvrir !

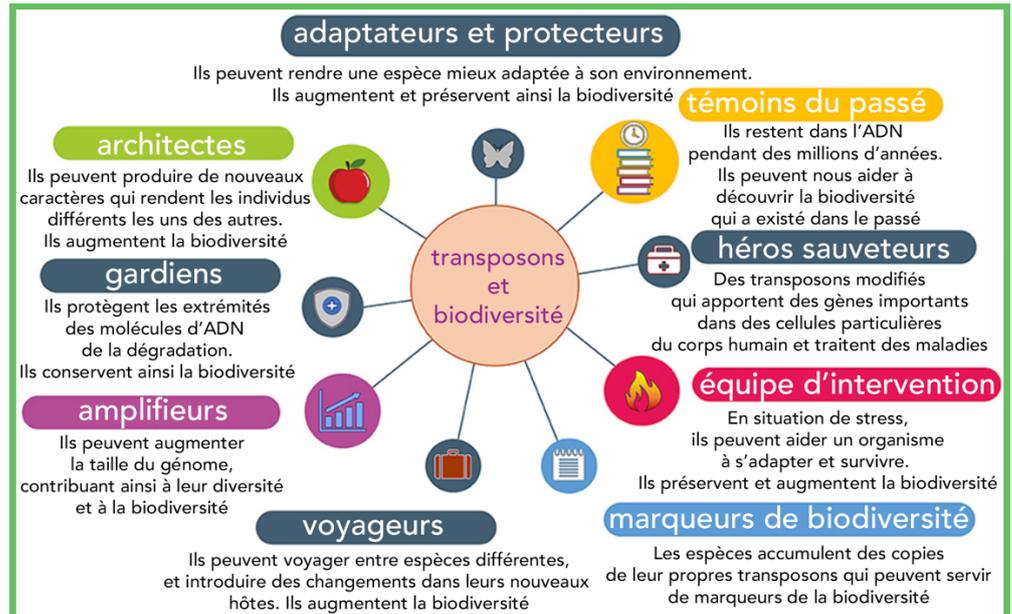


Figure 3. Les transposons contribuent à la biodiversité de nombreuses manières.

## RÉFÉRENCES

- [1] McClintock, B. 1984. The significance of responses of the genome to challenge. *Science* 226:792–801. doi: 10.1126/science.15739260
- [2] Bourque, G., Burns, K. H., Gehring, M., Gorbunova, V., Seluanov, A., Hammell, M., et al. 2018. Ten things you should know about transposable elements. *Genome Biol.* 19:1–12. doi: 10.1186/s13059-018-1577-z
- [3] Nadeau, N. J., Pardo-Diaz, C., Whibley, A., Supple, M. A., Saenko, S. V., Wallbank, R. W. R., et al. 2016. The gene cortex controls mimicry and crypsis in butterflies and moths. *Nature* 534:106–10. doi: 10.1038/nature17961
- [4] Negi, P., Rai, A. N., and Suprasanna, P. 2016. Moving through the stressed genome: emerging regulatory roles for transposons in plant stress response. *Front. Plant Sci.* 7:1448. doi: 10.3389/fpls.2016.01448
- [5] Wallau, G. L., Vieira, C., and Loreto, É. L. S. 2018. Genetic exchange in eukaryotes through horizontal transfer: Connected by the mobilome. *Mob DNA.* 9:1–16. doi: 10.1186/s13100-018-0112-9
- [6] SanMiguel, P., Gaut, B. S., Tikhonov, A., Nakajima, Y., and Bennetzen, J. L. 1998. The paleontology of intergene retrotransposons of maize. *Nat Genet.* 20:43–45. doi: 10.1038/1695

## 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.2024.1279209 ; Šatović-Vukšić E and Plohl M (2024) The Secret World of "Jumping" DNA. *Front. Young Minds.* 12:1279209).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

**ÉDITION** : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

**MENTOR SCIENTIFIQUE** : Myriam Houmey

### **JEUNE ÉDITRICE :**

#### **RANIA, 17 ANS**

J'ai décidé de contribuer à la relecture d'articles scientifiques car j'aime la science et me pose beaucoup de questions. Le monde microscopique est fascinant !

### **ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)**

**SOUMIS** le 17 août 2023; **ACCEPTÉ** le 26 mars 2024

**PUBLIÉ EN LIGNE** le 10 avril 2024.

**ÉDITEUR** : Pedro Morais

**MENTORS SCIENTIFIQUES** : Fred Junghans, Shruti Parikh

**CITATION** : Šatović-Vukšić E and Plohl M (2024) The Secret World of "Jumping" DNA. *Front. Young Minds.* 12:1279209. doi: 10.3389/frym.2024.1279209

### **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 © 2024 Šatović-Vukšić and Plohl

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**

#### **SAMARTH, 13 ANS**

Je m'intéresse aux sciences et aux mathématiques. L'une de mes activités préférées est de lire et de jouer de la musique. Je joue du piano et de la trompette dans l'orchestre de l'école. J'aime aussi l'histoire, le sport et la cuisine !

#### **Y8 LAURUS INTERNATIONAL SCHOOL OF SCIENCE, 11–12 ANS**

Nous sommes en 8<sup>ème</sup> année de l'école internationale Laurus. Nous aimons nous plonger dans les sciences et comprendre comment les choses fonctionnent. Nous aimons aussi les jeux et le sport, explorer le monde et découvrir de fabuleux mystères !

## AUTEURS

### EVA ŠATOVIĆ-VUKSIĆ

Je suis biologiste moléculaire et je travaille comme chercheur à l'Institut Ruđer Bošković en Croatie. Mes recherches portent principalement sur les séquences répétées d'ADN dans les génomes de divers organismes. J'ai caractérisé divers éléments transposables et ADN satellites, et étudié leur structure, leur fonction, leur localisation, leur organisation, leur évolution et leur influence sur l'architecture du génome. Les séquences répétées telles que les ADN satellites et les transposons étaient autrefois accusées d'être de l' « ADN poubelle », sans fonction biologique pertinente. Cette accusation s'est révélée tout à fait erronée, et j'aime contribuer à la destruction de ce mythe.  
\*Eva.Satovic.Vuksic@irb.hr

### MIROSLAV PLOHL

Je suis chercheur responsable de projet à l'Institut Ruđer Bošković à Zagreb, en Croatie, émérite de l'Institut depuis 2022. Pendant plus de 30 ans, je me suis concentré sur l'exploration de la structure et de l'évolution des séquences d'ADN répétées non codantes qui constituent la fraction majeure de nos génomes. Mon objectif principal est d'aider les gens à comprendre l'utilité de ces séquences, notamment en expliquant leurs fonctions. J'ai été responsable ou participant à de nombreux projets qui incluaient des collaborations internationales avec des scientifiques ayant des intérêts similaires.