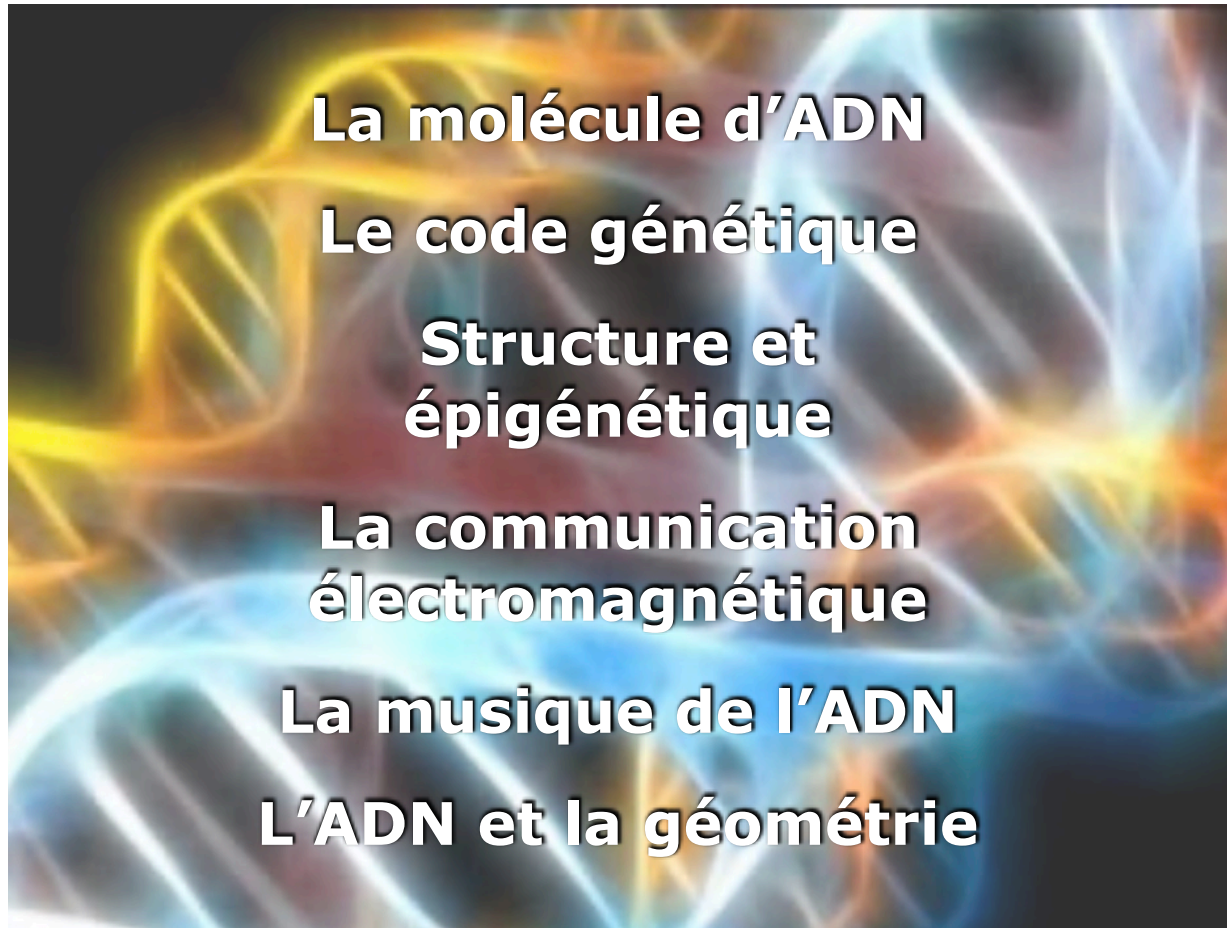


# **L'ADN**

## **ET LES CHAMPS COSMIQUES D'INFORMATION**



**La molécule d'ADN**

**Le code génétique**

**Structure et  
épigénétique**

**La communication  
électromagnétique**

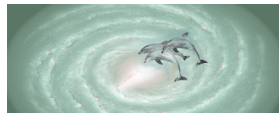
**La musique de l'ADN**

**L'ADN et la géométrie**

**Alain Boudet**

Dr en Sciences Physiques

[www.spirit-science.fr](http://www.spirit-science.fr)



© Copyright 2023 - Alain Boudet

# INTRODUCTION

Après avoir collecté de nombreuses informations sur l'ADN, et écrit à ce sujet des articles publiés depuis 2008 dans mon site web, il me semblait profitable de rassembler ces 6 articles en 6 chapitres d'un livre numérique. Puis, ayant encore approfondi le sujet et trouvé des informations supplémentaires, j'ai pensé nécessaire d'ajouter un septième chapitre, ainsi que des annexes.

Depuis la découverte de l'ADN dans les années 1950, sa présence dans le noyau de nos cellules est bien connue, ainsi que sa fonction comme support du code génétique. Les enseignements universitaires et les médias diffusent abondamment les représentations de la constitution chimique et de la structure de cette molécule, faites de 2 brins enroulés en une double hélice (*chapitre 1*).

Pourtant, ce n'est là qu'un aspect limité de l'ADN. Cet ouvrage relate d'autres aspects, qui vont jusqu'à la communication cosmique de l'ADN. Cela est décrit de façon détaillée, tout en restant dans un style facile à lire.

Dans les *chapitres 2 et 3*, je montre que l'expression du code génétique est sous le contrôle d'autres facteurs et que son rôle doit être nuancé. Les gènes s'expriment plus ou moins, certains sont actifs et d'autres muets, selon l'environnement et d'autres facteurs venant de l'extérieur de la cellule. C'est la science de l'épigénétique.

Il est peu connu, sauf dans l'intimité des laboratoires, que l'influence de l'environnement est véhiculée par des ARN courts, provenant de la partie de l'ADN hors-gènes, donc non-codante pour des protéines. Ces mécanismes, souvent ignorés dans les enseignements, se révèlent d'une importance considérable pour le fonctionnement de l'organisme.

Ces études novatrices sont toutefois encore issues de la représentation habituelle moléculaire/atomique, donc matériel, de l'ADN et des gènes. Or il est des aspects électriques et électromagnétiques rarement décrits (*chapitres 4 et 5*). Une molécule y est vue comme un assemblage d'atomes où chaque atome est constitué d'un noyau chargé d'électricité positive et d'électrons de charge négative qui gravitent autour. Cette électricité produit des rayons électromagnétiques (biophotons) par lesquels les molécules reçoivent et émettent des informations.

Selon les découvertes de Fritz-Albert Popp et de Peter Gariaev, les biophotons forment un nuage qui constitue un champ d'information sous forme quantique qui inclut un code génétique complémentaire électromagnétique. Cela conduit à penser que l'ADN a des fonctions bien plus étendues que le seul code génétique. On peut voir dans ce nuage de biophotons une première approche de l'existence d'un corps subtil entourant l'ADN, de la même façon que le corps physique dans son ensemble est enveloppé de corps subtils (voir mon article *Chakras et corps subtils*).

L'ADN comporte également des aspects sonores, dus aux ondes d'échelles émises au moment de la synthèse des protéines. Elles ont été découvertes et mises en évidence par le physicien Joël Sternheimer, qui en a conçu des mélodies spécifiques pour les protéines, les protéodies (*chapitre 6 et compléments plus techniques en annexe*).

J'ai ajouté un chapitre sur les géométries de l'ADN (*chapitre 7*). Y sont décrites des formes non canoniques de la molécule d'ADN, c'est-à-dire des hélices différentes de l'hélice à deux brins habituelle, y compris des hélices à 3 brins. On y découvre aussi que le fameux rapport nommé nombre d'or se loge à 3 reprises dans la forme habituelle à deux brins.

Les *annexes* apportent des compléments importants. En particulier j'y expose les principes des vaccins à ARN qui font beaucoup parler d'eux dans l'actualité. On y trouve également un rapport étonnant sur les liens entre la molécule d'ADN et les plans cosmiques. En particulier, le Dr J.J. Hurtak a établi des correspondances entre les 4 bases de l'ADN et les 4 lettres hébraïques du nom divin. Cela nous donne une vision de l'ADN qui s'étend dans des plans invisibles, qui porte les codes de la Vie multidimensionnelle, et nous élève dans des mondes majestueux.

Texte conforme à la [nouvelle orthographe française](#) (1990)

Ce document est protégé par les lois sur les droits d'auteur.

Les publications du site [www.spirit-science.fr](http://www.spirit-science.fr) sont identifiées par le numéro international ISSN 2430-5626

Cet ouvrage est l'aboutissement d'études, d'investigations, de compréhensions, de synthèse, de réflexions, de clarifications et de reformulation en langage simple, qui ont demandé une somme importante de travail.

Si vous deviez en tirer parti devant un public de lecteurs ou de spectateurs ou pour quoi que ce soit, merci de le citer.

# RÉSUMÉ

## 1. La molécule d'ADN et le code génétique

De la cellule aux gènes, en passant par les chromosomes et l'ADN, vous êtes invités à visiter **les rouages du programme génétique qui commande notre développement physique**. Comment fonctionne-t-il? Jusqu'à quel point nous contrôle-t-il? Quel est son langage? Vous pourrez le découvrir sans notion de biologie ou de chimie en observant le paysage, tel un voyageur qui s'aventure dans le monde des molécules.

## 2. L'ADN et ses modes d'expression. Impact de l'environnement sur l'expression des gènes - Transmission par hérédité - Épigénétique

Contrairement à l'idée répandue selon laquelle nous sommes programmés par notre code génétique, des scientifiques ont montré que celui-ci est en réalité un stock de données qui peuvent être activées ou non selon nos conditions de vie (nutritionnelles et psychiques). La science de **l'épigénétique** a montré que cette activation était due à des modifications chimiques réversibles du gène. Chacun de nous est donc dans un état épigénétique qui lui est propre et qui se modifie avec l'âge. Dans certaines circonstances, cet état est transmissible à la **descendance**, et cela bouleverse les idées figées des scientifiques sur l'évolution des espèces par la sélection naturelle. D'autres observations nous démontrent que l'ADN et les gènes ne sont pas des assemblages constitués de façon fixe et définitive. L'ADN se recompose en partie lorsque certains fragments (les **transposons**) changent de place. La **plasticité des cellules nerveuses** est un autre exemple qui montre combien nos cellules ne sont pas constituées une fois pour toutes, mais possèdent la capacité étonnante de s'adapter au changement et d'inventer de nouvelles formes.

## 3. Architecture et structure de l'ADN - Les 98,7% d'ADN "non-codants" ont un rôle fonctionnel

Les parties codantes des gènes de l'ADN, qui détiennent les codes de fabrication des protéines qui régulent notre corps, n'occupent que 1,3% environ de la totalité de l'ADN. Les zones non-codantes dans et entre les gènes intriguent les scientifiques par leur présence énigmatique. Ayant abandonné l'idée que ces zones sont inutiles, ils commencent à mettre en évidence leurs fonctions possibles. Ces zones ont des rôles de régulation et de contrôle. Les zones intergènes comportent des séquences caractéristiques pour chaque individu, au point qu'elles ont été retenues par la législation comme base de l'empreinte génétique. Il existe donc une architecture significative dans l'ADN. Par des méthodes d'analyse statistique, des mathématiciens ont mis en évidence **un ordre fractal qui varie selon le type d'ADN**.

## 4. L'ADN électrique

On représente habituellement la molécule d'ADN sous forme de volumes géométriques: hélices, rubans et segments. Au-delà de son occupation dans l'espace, une vie électronique intense se manifeste dans les molécules, responsable de leurs attirances, associations et assemblages. De nombreuses recherches ont été conduites sur la conductivité électrique de l'ADN nu, donc en-dehors du corps. Récemment, il a été démontré que l'ADN est électro-conducteur et peut être considéré comme un minuscule fil électrique. Ces recherches sont motivées par la possibilité d'utiliser l'ADN comme constituant de nano-circuits électroniques (à l'échelle du nanomètre). Des ordinateurs à base d'ADN ont été construits et testés. L'ADN participe ainsi à la grande course des nanotechnologies qui permettent de fabriquer des puces et autres dispositifs de taille très inférieure à celles élaborées avec le silicium. Une technologie qui se répand pour le meilleur et pour le pire.

## 5. L'ADN électromagnétique et la communication entre cellules

Depuis une centaine d'années, des scientifiques de plusieurs pays (Gurwitsch, Kaznacheev, Gariaev, Inaba, Popp, et d'autres) ont montré que les organismes vivants émettent de la lumière (biophotons) à très faible intensité. Tel un laser, l'ADN est à la fois la source et le lieu de stockage de ces photons. L'ensemble des biophotons de l'organisme constitue un champ cohérent porteur d'information, sous forme d'hologrammes, qui dirige les processus vitaux de l'organisme et maintient son intégrité. Grâce à ces rayonnements, les cellules communiquent entre elles et envoient des informations sur leur état énergétique et sanitaire. D'autres informations constituent un code génétique électromagnétique holographique qui assure et coordonne le développement de l'organisme. Cela explique des phénomènes inexplicables par la génétique moléculaire comme la différenciation des cellules. Des applications pratiques de ce phénomène ont été conçues pour évaluer la qualité des aliments et améliorer l'état de santé des êtres vivants par des techniques non destructrices.

## 6. La musique de l'ADN et des protéines

La structure de l'ADN et des gènes sous-tend une harmonie que certains artistes et compositeurs ont transcrite en musique. Au-delà de ces visions d'artiste, la physique quantique montre, grâce à Joël Sternheimer, qu'**à chaque acide aminé composant une protéine est associée une onde d'échelle, qui peut être transcrite en note de musique**. Par la musique des protéines ou **protéodies**, il est possible d'entrer en dialogue intime avec l'organisme, ce qui ouvre des perspectives passionnantes et nouvelles en agriculture et en médecine.

## 7. Les géométries de l'ADN

La molécule d'ADN présente une forme remarquable, la structure en double hélice. Le plus souvent, elle apparaît sous sa forme canonique ADN-B, mais elle peut également apparaître sous d'autres types de doubles hélices qui diffèrent par la façon dont les spires sont compressées ou étirées. Dans la variante ADN-B, on peut découvrir que le rapport entre certaines mesures y prend la valeur du nombre d'or par trois fois. Enfin, il existe aussi des hélices à 3 brins, aussi bien synthétiques que naturelles, de très courte longueur, qui ont parfois des rôles spécifiques.

## Livres numériques du même auteur

*Musique et sons*

*Une autre histoire de la Terre*

*Les circuits vitaux de la Terre*

*Les structures atomiques de la matière*

# Table des matières

|                                                                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION.....</b>                                                                                                                         | <b>1</b>  |
| <b>RÉSUMÉ .....</b>                                                                                                                              | <b>2</b>  |
| <b>Table des matières.....</b>                                                                                                                   | <b>4</b>  |
| <b>1. La molécule d'ADN et le code génétique .....</b>                                                                                           | <b>7</b>  |
| Le programme de développement biologique de l'individu                                                                                           | 7         |
| Le programme biologique est inscrit dans l'ADN                                                                                                   | 7         |
| Des microscopes pour explorer le vivant                                                                                                          | 8         |
| Au cœur des cellules, le noyau                                                                                                                   | 9         |
| Au cœur du noyau, les chromosomes                                                                                                                | 10        |
| Au cœur des chromosomes, l'ADN                                                                                                                   | 11        |
| Structure de la molécule d'ADN - l'Acide Désoxyribo-Nucléique                                                                                    | 11        |
| Deux brins associés en double hélice                                                                                                             | 13        |
| Les liaisons entre bases azotées                                                                                                                 | 13        |
| Les formes changeantes de l'ADN                                                                                                                  | 14        |
| Les caractères héréditaires sont transmis par l'ADN                                                                                              | 14        |
| Au cœur de l'ADN, les gènes                                                                                                                      | 14        |
| La fécondation et les chromosomes appariés                                                                                                       | 16        |
| Les protéines, ouvrières du corps                                                                                                                | 17        |
| La carte chromosomique des gènes ou génotype                                                                                                     | 17        |
| La carte chromosomique des bases azotées ou génome                                                                                               | 18        |
| Le langage codé de l'ADN                                                                                                                         | 19        |
| Unité et diversité des êtres vivants                                                                                                             | 20        |
| <b>2. L'ADN et ses modes d'expression -Impact de l'environnement sur l'expression des gènes -Transmission par hérédité - Épigenétique- .....</b> | <b>21</b> |
| L'illusion du tout-génétique                                                                                                                     | 21        |
| Des codes génétiques identiques se manifestent différemment selon l'environnement                                                                | 22        |
| Des codes génétiques identiques se manifestent différemment selon les cellules                                                                   | 23        |
| L'épigenétique, complément de la génétique                                                                                                       | 23        |
| Nos expériences de vie affectent l'état des gènes                                                                                                | 24        |
| La configuration épigénétique, un ensemble de commutateurs modifiables                                                                           | 26        |
| Transmission héréditaire des altérations épigénétiques                                                                                           | 26        |
| Transmission de l'état de stress                                                                                                                 | 29        |
| L'ADN changeant et modulable: les transpositions                                                                                                 | 29        |
| Prenons soin de notre ADN                                                                                                                        | 30        |
| Un regard élargi sur l'ADN                                                                                                                       | 32        |
| <b>3. Architecture et structure de l'ADN -Les 98,7% d'ADN "non-codants" ont un rôle fonctionnel- .....</b>                                       | <b>33</b> |
| Les zones qui portent le code génétique et les autres                                                                                            | 34        |
| Les introns: des zones sans code génétique incluses dans les gènes                                                                               | 35        |
| Nombres et longueurs des introns                                                                                                                 | 36        |
| À quoi servent les introns?                                                                                                                      | 36        |
| À la fois intron et exon - l'épissage alternatif                                                                                                 | 37        |
| Des séquences répétées dans l'ADN non-codant                                                                                                     | 38        |
| Variabilité individuelle des satellites                                                                                                          | 38        |
| Les séquences non-codantes plus nombreuses dans les organismes supérieurs                                                                        | 40        |
| Le réseau de régulation des gènes                                                                                                                | 40        |

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Des séquences mobiles, les transposons                                            | 41        |
| La communication par les ARN non-codants                                          | 42        |
| L'information itérative                                                           | 43        |
| Un ordre global dans l'ADN                                                        | 44        |
| L'ordre fractal                                                                   | 46        |
| Le code génétique électromagnétique                                               | 47        |
| <b>4. L'ADN électrique</b>                                                        | <b>48</b> |
| Les molécules sont des assemblages de particules électriques                      | 49        |
| La molécule d'ADN comme composant électronique                                    | 49        |
| Mesures expérimentales de la conductivité de l'ADN                                | 50        |
| La conductivité de l'ADN dépend de sa composition moléculaire                     | 51        |
| La conductivité de l'ADN en présence de métaux                                    | 51        |
| Les ordinateurs à molécules organiques                                            | 52        |
| Les ordinateurs à ADN à base d'enzymes                                            | 52        |
| Ordinateurs à ADN en plaquettes                                                   | 53        |
| L'ordinateur à ADN qu'on peut avaler                                              | 54        |
| L'ADN est électrique, et après?                                                   | 54        |
| <b>5. L'ADN électromagnétique et la communication entre cellules</b>              | <b>56</b> |
| La matière émet des rayons électromagnétiques                                     | 56        |
| Les radiations d'Alexander Gurwitsch                                              | 57        |
| 1950- 1960: découvertes sur la luminescence par des chercheurs russes et italiens | 57        |
| Communication entre organismes vivants par biophotons                             | 58        |
| Le rayonnement luminescent cohérent                                               | 60        |
| Indications sur l'état sanitaire d'une cellule                                    | 61        |
| Analyse de la qualité des tissus biologiques                                      | 61        |
| L'ADN, un laser à photons                                                         | 62        |
| Régulation de réactions chimiques                                                 | 63        |
| Le champ de biophotons imprègne l'organisme                                       | 63        |
| Le biochamp, champ énergétique informationnel des organismes biologiques          | 64        |
| Le code génétique holographique                                                   | 65        |
| L'ADN est un bio-ordinateur                                                       | 65        |
| Le champ électromagnétique qui pilote l'assemblage de l'ADN                       | 67        |
| Transfert par laser de code génétique d'un organisme à un autre                   | 67        |
| <b>6. La musique de l'ADN et des protéines</b>                                    | <b>71</b> |
| <b>Des compositions musicales associées à l'ADN et aux protéines</b>              | <b>71</b> |
| Une suite de notes pour représenter les bases azotées et les acides aminés        | 72        |
| Les caractéristiques physiques mises en musique                                   | 72        |
| <b>Les protéodies de Joël Sternheimer</b>                                         | <b>74</b> |
| Les acides aminés émettent des ondes                                              | 74        |
| Les ondes sont transformées en notes de musique                                   | 74        |
| Les mélodies musicales interagissent avec les protéines                           | 75        |
| Des tests démonstratifs sur la croissance des plantes                             | 75        |
| Des protéodies pour les hommes                                                    | 76        |
| <b>7. Les géométries de l'ADN</b>                                                 | <b>78</b> |
| <b>Les trois formes de la double hélice</b>                                       | <b>78</b> |
| <b>Le nombre d'or dans la chaîne d'ADN-B</b>                                      | <b>79</b> |
| <b>L'hélice triple</b>                                                            | <b>80</b> |
| Synthèse d'hélices triples de polynucléotides                                     | 80        |



|                              |    |
|------------------------------|----|
| Triplex naturels             | 81 |
| Liaisons entre brins         | 81 |
| Les replis intramoléculaires | 81 |

## **Annexes .....83**

### **Le vaccin à ARN-----83**

### **Histoire de l'épigénétique -----85**

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Un précurseur des empreintes épigénétiques: l'opéron                                                   | 85 |
| Définitions de l'épigénétique selon les scientifiques aujourd'hui                                      | 86 |
| La plasticité des cellules nerveuses, autre exemple de transformation et de flexibilité des organismes | 86 |

### **Hologrammes -----88**

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| Hologramme génétique et ondes polarisées | 89 |
|------------------------------------------|----|

### **Les expériences du Pr. Luc Montagnier sur la synthèse de l'ADN -----91**

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Signaux électromagnétiques de bactéries et de virus enregistrés dans l'eau | 91 |
| Le champ "fantôme" de l'ADN                                                | 93 |

### **Ondes d'échelle et protéodies -----94**

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| Invariances et symétries                  | 94 |
| Ondes d'échelle                           | 95 |
| Retrouver le rapport entre sujet et objet | 95 |
| Ondes d'échelle en biologie               | 96 |
| Une onde pour une molécule                | 96 |
| Ondes d'échelle et musique                | 97 |
| Les notes musicales des protéodies        | 97 |
| Exemple de protéodie, la prolactine       | 98 |
| Stimulation et inhibition de protéines    | 98 |
| Génodique appliquée à l'agriculture       | 98 |

### **L'ADN, reflet du monde divin -----100**

## **En savoir plus .....101**

# 1. La molécule d'ADN et le code génétique

**Résumé:** De la cellule aux gènes, en passant par les chromosomes et l'ADN, vous êtes invités à visiter **les rouages du programme génétique qui commande notre développement physique**. Comment fonctionne-t-il? Jusqu'à quel point nous contrôle-t-il? Quel est son langage? Vous pourrez le découvrir sans notion de biologie ou de chimie en observant le paysage, tel un voyageur qui s'aventure dans le monde des molécules.

**Dans quelle mesure notre vie et notre développement physique sont-ils gouvernés par la génétique et par l'ADN?** Il est fréquent d'entendre parler de code génétique, de maladie héréditaire, de tests ADN, etc. Mais savez-vous de quoi il s'agit? A quoi sert l'ADN? Comment fonctionne-t-il?

Nous entendons parfois parler de ces choses, à l'école ou à la télé, et nous répétons sans vraiment comprendre. Dans cet article, **vous découvrirez l'ADN comme vous découvrez un pays**, avec des sensations visuelles, à partir de questions qui nous concernent. Peut-on décrire le monde de l'ADN sans employer un langage scientifique spécialisé? Je pense que oui et c'est ce que j'ai tenté de réaliser. Vous trouverez peu de descriptions biologiques et chimiques dans ce texte. De telles descriptions sont disponibles dans de nombreux sites, dont certains, riches et bien construits, sont cités en fin d'ouvrage.

## Le programme de développement biologique de l'individu

Nous habitons dans un corps, mais nous n'avons pas le sentiment de l'avoir choisi comme on choisit ses vêtements ou sa voiture. Quelquefois nous sommes fiers de lui, et quelquefois nous aurions voulu qu'il soit différent. Nous ne contrôlons pas sa forme, sa taille, la couleur de nos cheveux, pas plus que le genre masculin ou féminin, ni la façon dont il fonctionne. Bien entendu, nous sommes responsables des soins que nous lui prodiguons et de son entretien, mais **la base anatomique et biologique de notre corps échappe à notre volonté et à notre contrôle**.

Alors quel est le poste central qui définit toutes ses caractéristiques et la façon dont il se développe? Nous avons la sensation que notre corps est dirigé par une sorte de **programme de développement biologique interne** qui comporte un plan de construction avec son calendrier de réalisation. Ceci est vrai pas seulement pour l'être humain, mais pour l'ensemble des êtres vivants.

**L'observation des êtres vivants quels qu'ils soient montre qu'ils se développent selon un plan bien établi.** C'est à partir d'une seule graine que les végétaux croissent et deviennent plante, arbuste, ou arbre d'une espèce bien déterminée, un organisme complet et complexe qui comporte toutes les fonctions nécessaires à sa vie. Tous les chênes d'une même espèce se développent selon le même "patron", le même schéma. Ce schéma contient leurs caractéristiques qui les font reconnaître comme des chênes: hauteur, aspect de l'écorce, forme des feuilles, durée moyenne de vie, etc. C'est la même chose pour les animaux et pour l'être humain qui se développent selon des caractéristiques propres à leur espèce à partir d'une seule cellule.

## Le programme biologique est inscrit dans l'ADN

La manière dont ce programme de développement est inscrit est appelé le **code génétique**. Génétique, cela signifie qui engendre, génère, donc crée. Ce code a-t-il un support physique? Est-il écrit quelque part dans l'organisme? OUI. Selon nos connaissances actuelles, **le programme biologique de développement est écrit dans l'ADN**, avec une écriture qu'on nomme justement **le code génétique** et qui a son langage propre.

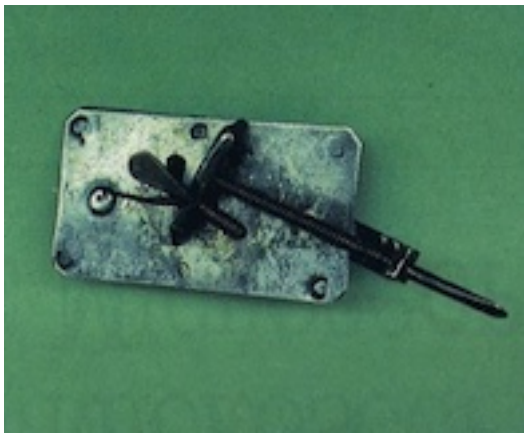
Pour faire connaissance avec l'ADN et le code génétique, **nous allons d'abord suivre les traces des naturalistes et biologistes qui l'ont découvert puis examiné** et nous allons relater quelques observations scientifiques qui ont permis d'en arriver à ces conclusions. Cela nous permettra également de mieux nous rendre compte de **la façon dont progressent nos connaissances**: sous forme fragmentaire, par le recoupement d'observations précises dans des domaines spécialisés, toujours susceptibles d'être remises en cause ou intégrées dans des visions plus larges.



## Des microscopes pour explorer le vivant

Vous savez probablement que les molécules d'ADN habitent au cœur des cellules, et nous allons donc commencer par **visiter des cellules**. Cellule, un mot courant, une notion répandue, tout le monde sait que notre corps est constitué de cellules. Mais réfléchissez deux minutes. **Comment le savez-vous, vous?** Quelle idée vous faites-vous d'une cellule? Quelle taille? Comment fonctionne-t-elle? Comment les cellules sont-elles disposées dans votre corps? Se poser la question, c'est déjà presque avoir la réponse, car notre ignorance résulte souvent du fait que nous n'avons jamais porté notre attention sur cet aspect de notre vie. Faisons-le.

Observez votre peau. Voyez-vous des cellules? Non, car elles sont trop petites pour être détectées à l'œil nu. Pour les découvrir, nous devons les regarder avec l'aide d'un **microscope**. Et c'est justement ce qu'ont fait des pionniers à une époque où les lentilles de verre n'étaient pas fabriquées par une micromécanique contrôlée électroniquement avec des plans conçus par ordinateur comme maintenant. Vous connaissez sans doute ce genre de personnes, éventuellement par le film ou le roman, qui sont quelquefois des adolescents, des passionnés qui sont avides de réponses à leurs interrogations et sont poussés par leur curiosité insatiable à imaginer des appareils pour comprendre.



*Fig.1- Microscope en argent fabriqué avant 1700 par Leeuwenhoek. Il est constitué d'une bille de verre enchâssée dans une plaque d'argent ou de cuivre. Taille: 45 mm de long*



*Fig.2- Microscope fabriqué vers 1820 par Robert Bancks. A l'étage intermédiaire, on distingue la lame de verre sur laquelle on déposait l'objet à examiner, comme on le fait encore.*



*Fig.3- Microscope optique actuel pour la recherche (Olympus)*



*Fig.4- Un microscope électronique à balayage (Philips)*

Ce sont des hommes de ce genre qui ont inventé et perfectionné le microscope (scope = regarder; micro = le tout petit). Ainsi l'anglais **Robert Hooke** et le hollandais **Antony van Leeuwenhoek** (1632 - 1723). Et c'est Hooke qui le premier a vu quelque chose qui ressemble à des cellules dans une écorce de liège et leur a donné ce nom de **cellules**, c'est-à-dire des **petits compartiments**. Il a publié ses travaux dans un livre, *Micrographia*, en **1665**. De mon point de vue, cette remarque est intéressante parce qu'elle nous montre

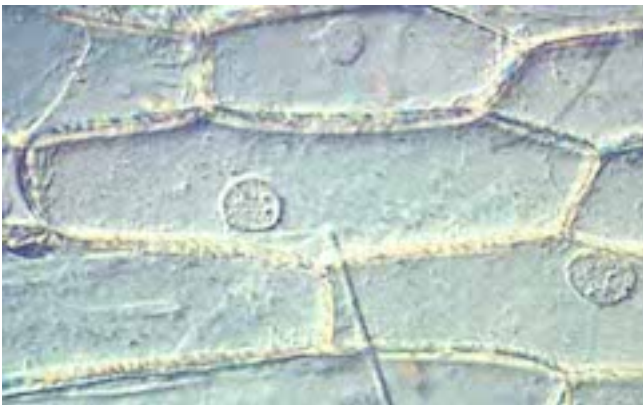
que la notion de cellule est relativement récente dans notre culture occidentale. Et d'autre part que **notre connaissance est liée en grande partie à la mise au point d'appareils**. Cependant, ces appareils sont le résultat direct de la **pensée** de ces hommes, donc de la façon dont ils veulent comprendre et expliquer.

Depuis cette époque, les microscopes ont bénéficié des développements de l'optique et des procédés de fabrication des lentilles, de l'électronique et de l'informatique. Dans les années 1930, un nouveau type d'appareil a été inventé, le microscope électronique, avec lequel les objets sont observés en les "éclairant" non avec de la lumière, mais avec un faisceau d'électrons, d'où leur nom (*voir également mon ouvrage sur les Microstructures des polymères photographiées avec des microscopes, et mon article Observer la matière en 3 dimensions*). Ce sont ces appareils qui ont contribué à fournir de nombreux détails sur les cellules et sur l'ADN. Par ailleurs, ces observations ont été confrontées aux autres informations apportées par les méthodes biochimiques.

## Au cœur des cellules, le noyau

Au microscope, les cellules sont plus ou moins visibles. Nous regarderons celles qui sont les plus faciles à observer. C'est le cas de la **pelure d'ognon** [*Non pas de faute, c'est l'orthographe recommandée depuis 1990*]. Il faut aussi que le morceau de tissu observé soit une fine pellicule.

Sur l'image présentée ci-dessous à gauche, on voit nettement plusieurs cellules délimitées par des parois, collées les unes aux autres. À l'intérieur de chaque cellule, on détecte la présence d'une inclusion à peu près circulaire. C'est le **noyau** de la cellule. Il joue un rôle essentiel à cause de l'ADN qui s'y trouve, comme on va le voir. Il est délimité par une paroi souple, une membrane.



*Fig.5- Image de pelure d'ognon  
Assemblage de cellules délimitées par des parois.  
Noyaux visibles dans chacune d'elle  
Grossissement environ 600 fois  
Merci à Christian Lookx*



*Fig.6- Image d'une cellule de la bouche  
Le noyau apparaît en sombre  
Coloration au bleu de méthylène*

Examinons maintenant un **tissu animal** coloré avec une teinture bleue. C'est une cellule prélevée à l'intérieur de la bouche d'un humain. On distingue très bien le noyau, plus sombre. La taille de la cellule est d'environ 0,050 mm ou 50 micromètres ( $\mu\text{m}$ ). La paroi qui la délimite est plus fine que celle des végétaux. C'est une membrane souple. Les végétaux aussi ont cette membrane, mais elle est doublée par une membrane bien plus épaisse qui confère aux tiges leur rigidité et au bois sa consistance.

Les biologistes ont effectué des milliers d'observations. Ils ont constaté que tous les tissus végétaux et animaux connus sont constitués de cellules. **Les cellules sont les briques élémentaires de la construction des organismes vivants.**

Les cellules sont faites d'une **membrane**, sorte de poche-réservoir, remplie d'une substance souple un peu visqueuse (le **cytoplasme**). Elles se présentent sous des aspects extrêmement variés, aussi bien en taille qu'en structure interne. La **taille** varie de 1 à 100  $\mu\text{m}$  (0,1 mm) avec une moyenne de 20  $\mu\text{m}$ . Les façons dont elles s'assemblent pour former un tissu sont également très diverses et très inventives.

Les cellules sont pourvues d'un **noyau**, mises à part celles de certains organismes primaires microscopiques tels que les bactéries. Le noyau est contenu lui-aussi dans une membrane souple.

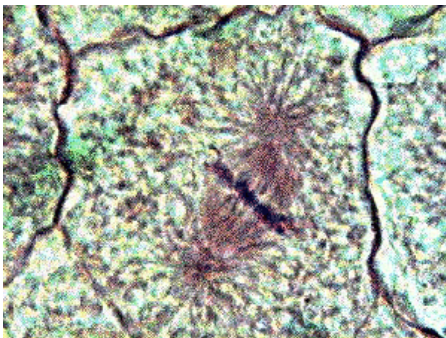
La forme des cellules isolées n'est pas fixe. Pendant l'observation, on les voit bouger et se déformer. Elles sont plastiques et fluctuantes, car elles sont vivantes.

À l'intérieur, elles sont parcourues de **courants** de matière fluide. Des études biochimiques ont montré que ces courants transportent des substances qui, tout comme notre sang, assurent les **échanges de matière** à l'intérieur de la cellule, en particulier avec le noyau. La membrane du noyau est perméable et laisse passer ces substances de façon sélective. C'est également le cas de la membrane extérieure, afin d'assurer les échanges entre cellules, entre tissus, entre organes.

## Au cœur du noyau, les chromosomes

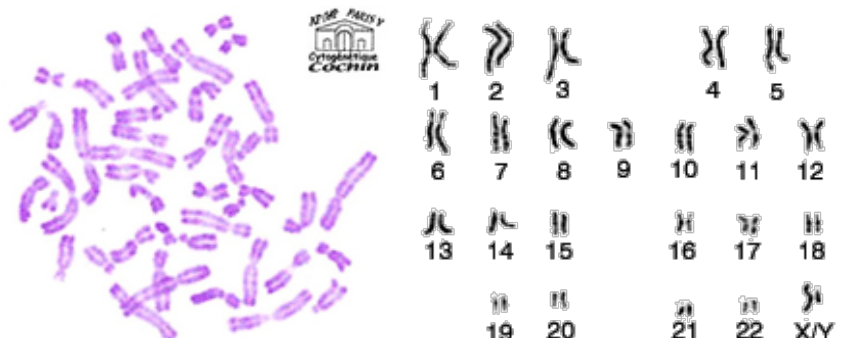
C'est dans le noyau qu'on a découvert, analysé, identifié la substance qu'on a nommé ADN. Au début, le but des biologistes n'était pas de rechercher cette substance dont ils ignoraient l'existence. Ils voulaient observer et décrire comment évoluaient les cellules au cours du temps. Ils les voyaient grandir et se diviser en deux autres cellules, et voulaient comprendre par quel mécanisme biologique cela se produisait.

C'est par le procédé de coloration mentionné ci-contre qu'ils ont vu apparaître les **chromosomes** juste avant la phase de séparation de la cellule en deux cellules-filles. Le mot *chromosome* signifie d'ailleurs que c'est une figure colorée, sans préfigurer de sa fonction ni de sa composition. À ce stade de vie de la cellule, cette figure a l'apparence de 2 faisceaux en éventail ou en étoile (fig.7).



*Fig.7- Phase de division de la cellule en 2 cellules-filles. La membrane du noyau n'est plus visible.*

*Microscope optique. Coloration*



*Fig.8- Chromosomes dans le noyau pendant la division de la cellule humaine.*

*Microscopie optique  
coloration au giemsa  
Merci au Pr J.M. Dupont,  
Faculté de Médecine, Cochin,  
Paris*

*Fig.9- Caryotype humain montrant les 23 paires de chromosomes. La 23e détermine le genre masculin (XY, ici) ou féminin (XX).  
Merci à Wikipedia*

La figure évolue rapidement et les chromosomes deviennent distincts les uns des autres pendant un bref instant. C'est à ce moment qu'on peut les observer le plus commodément et les photographier au microscope optique. Cela demande certains traitements chimiques. On fixe la cellule dans son évolution, on la gonfle, on la colore. La figure 8 présente la photographie des chromosomes d'un être humain et plus précisément d'un homme. Il est possible de découper l'image (cela se fait par ordinateur) pour isoler chacun des chromosomes et les disposer les uns à côté des autres. Puis on les dénombre et on observe leur forme. Enfin on les classe par ordre de grandeur décroissante. La figure obtenue s'appelle le **caryogramme** de la cellule (fig.9). Or **toutes les cellules d'un même individu présentent ce même caryogramme**. Le caryogramme est donc typique d'un individu et pour cette raison on le nomme aussi un **caryotype**.

## Des procédés pour mieux distinguer les structures

Notez que le noyau présente à peu près le même aspect, à l'œil, que le reste de la cellule. On ne peut le distinguer que parce que son contour a été renforcé visuellement. La façon dont **on renforce les éléments à peine visibles d'une image** est cruciale pour la découverte des structures internes de la cellule. Il existe de multiples façons d'obliger ces structures à se montrer en augmentant leur contraste visuel, mais elles relèvent de deux types de méthodes.

L'un consiste à agir sur l'**éclairage** de l'objet examiné et sur l'optique de formation de l'image. Cela a donné naissance à plusieurs variantes de microscopie (à contraste de phase, à contraste interférentiel comme dans l'image ci-dessus, à fluorescence, etc.).

L'autre consiste à injecter dans la cellule un **colorant** qui se répand partout, mais se fixe préférentiellement (avec une plus grande concentration) sur certaines parties, par exemple le noyau. Il existe plusieurs colorants employés couramment.



Dans le **caryotype des humains**, on remarque tout d'abord qu'il y a 2 exemplaires identiques de chacun des chromosomes, à une exception près. On peut donc les classer par paires. Il y a **22 paires de chromosomes identiques et une 23<sup>e</sup> paire qui est composée de 2 chromosomes qui diffèrent pour l'homme et pour la femme**. Chez la femme, les 2 chromosomes de la 23<sup>e</sup> paire sont également identiques. On les a nommé X. Chez l'homme l'un est ce chromosome X et l'autre un chromosome bien plus petit nommé Y. Chacune des paires est repérée par son numéro d'ordre.

En réalité, les chromosomes d'une même paire ne sont pas tout à fait identiques, mais seulement **homologues**. Dans chacune des paires, l'un des chromosomes est hérité du père et l'autre de la mère, au moment de la fécondation et de la formation des premières cellules de l'embryon. Mais cette différence ne peut être distinguée qu'en analysant leur composition moléculaire en ADN et protéines, et en décrivant l'ADN à l'échelle moléculaire, comme nous allons le faire.

À ce stade d'observation, rien ne nous indique que ce sont les chromosomes qui sont les porteurs des informations héréditaires. Nous devons d'abord découvrir la molécule d'ADN. Puis en examinant les mécanismes de l'hérédité, nous pourrions déterminer que l'ADN en est le transmetteur.

## Au cœur des chromosomes, l'ADN

Toute matière est faite d'un assemblage de molécules et les chromosomes ne font pas exception. L'analyse chimique d'**un chromosome** révèle qu'il **est constitué d'ADN et de protéines**.

Ce qui est remarquable, c'est que **l'ADN du chromosome est constitué d'une seule molécule**, donc cette molécule est énorme. Elle a la forme d'un filament souple comme une ficelle qui prend différentes dispositions selon les moments de la vie cellulaire. Il peut se replier en boule, ou s'allonger en partie.

Le filament d'ADN le plus long du corps humain est celui du chromosome n°1 qui, une fois déroulé, mesure environ **8 cm**. C'est énorme quand on sait que les molécules synthétiques les plus longues des matières plastiques mesurent à peine 1 centième de millimètre (*voir mon article Molécules des polymères*). Le noyau de chaque cellule humaine contient 46 chromosomes, donc 46 molécules d'ADN. Si on pouvait les dérouler et les mettre bout à bout, elles totaliseraient une longueur de plus de **1 mètre**.

Dans certaines circonstances, il est possible, après un traitement spécifique, de photographier des filaments d'ADN par microscopie électronique (fig.10). **Leur diamètre est estimé à 2 nanomètres** (millionièmes de millimètre).

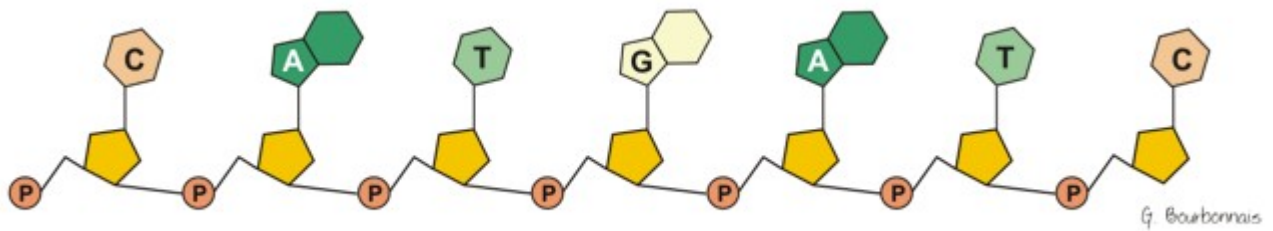


*Fig.10- Par un traitement spécifique, le filament d'ADN d'une bactérie (le haricot central d'environ 1 µm de long) s'est répandu tout autour d'elle (le fil jaune) Microscopie électronique en transmission. Couleur jaune artificielle ajoutée par informatique*

## Structure de la molécule d'ADN - l'Acide Désoxyribo-Nucléique

Diverses techniques d'analyse chimiques et physiques ont permis de dresser les caractéristiques de la molécule d'ADN. Elle est semblable à un fil sur lequel on aurait enfilé des perles. L'image du fil doit être corrigée en précisant qu'il est composé à la manière d'une **chaîne, un assemblage de chainons**

**identiques.** Les chainons sont un petit motif moléculaire appelé **désoxyribose** (fig.11), alternant avec un groupement de phosphate. Notons en passant que la petite molécule de ribose dont est dérivé le désoxyribose est nommée ainsi parce qu'elle a été étudiée au Rockfeller Institute of Biochemistry (RIB).



*Fig.11- Schéma de la molécule d'ADN. Elle est composée d'une chaîne centrale, faite de l'assemblage linéaire de motifs identiques (les pentagones oranges articulés par le groupement P ), sur laquelle sont fixés des groupements C, A, T et G  
Merci à G. Bourbonnais*

Sur cette chaîne, sont fixées les **perles**. Non, elles ne coulissent pas. Sur chacun des groupements désoxyriboses est fixée l'une de ces perles, nommée en chimie une **base azotée**. Les groupements ont le choix entre 4 catégories de perles qui diffèrent par leur composition chimique. Autrement dit, elles ne sont pas composées avec les mêmes atomes. Deux des catégories sont plus grosses. Ce sont les perles **A (adénine)** et **G (guanine)**. Les deux autres sont plus petites: **T (thymine)** et **C (cytosine)**.

D'où vient ce nom d'**ADN**? Il a été forgé selon la nomenclature usuelle chez les chimistes. ADN est l'abréviation de **Acide Désoxyribo-Nucléique**. Il fait référence à sa composition chimique, mais pas du tout à sa fonction génétique. Le **désoxyribo-** renvoie au désoxyribose des chainons.

Son côté **acide** ne fait pas référence à son goût, mais aux atomes de phosphore P et d'oxygène O qui sont accrochés en appendice aux chainons (sur la fig.11, l'ensemble des atomes P et O est représenté par le symbole **P** qui signifie phosphate). Ce groupement acide intervient au moment où la molécule est construite (synthétisée) dans le noyau. Les chainons s'ajoutent un à un à l'extrémité de droite (sur la figure 11) et les groupements **P** servent de liens entre les chainons.

Enfin l'adjectif **nucléique** indique que cette molécule est extraite du noyau (nucleus) de la cellule. En fait, par la suite, on a aussi trouvé de l'ADN dans certaines petites inclusions de la cellule situées en-dehors du noyau, les **mitochondries**.

Les chimistes utilisent également le terme nucléotide. Un **nucléotide** désigne l'ensemble de la base azotée (la perle) et du chainon à laquelle elle est accrochée (un désoxyribose et un groupement P - voir fig.11).

**Les molécules d'ADN ne sont pas toutes identiques.** Il n'y a pas qu'une seule molécule d'ADN possible comme il y a une seule molécule de soude ou d'ammoniaque. Même si toutes les molécules d'ADN sont construites sur le même schéma de structure dont on vient de prendre connaissance, elles diffèrent entre elles par deux aspects. D'abord, par le nombre de chainons. **La longueur de la molécule d'ADN peut être très variable.** Elle est différente d'une paire de chromosomes à l'autre, et c'est pourquoi les chromosomes ont des tailles différentes. Le plus long (chromosome 1) comporte 263 millions de chainons. Enroulés sur eux-mêmes dans les chromosomes, les ADN longs sont plus volumineux que les ADN plus courts.

D'autre part, **l'ordre de succession des bases azotées, A, C, G, T le long de la chaîne est lui-aussi extrêmement variable.** Il n'y a pas de régularité dans leur arrangement. Elles semblent se succéder au hasard. Toutefois, ce n'est qu'apparence, car l'ordre de leur disposition répond à un sens. C'est sur cet ordre variable que repose le code génétique qui est inscrit dans l'ADN comme on va le voir.

### L'ADN est un polymère

Les molécules qui sont composées d'une chaîne d'un grand nombre de motifs semblables sont appelées des **polymères** (poly = plusieurs; mère = le motif qui génère la molécule).

Il existe des **polymères naturels** tels que l'ADN, les protéines ou la cellulose, et des **polymères synthétiques** tels que les matières plastiques, les peintures ou les gels (voir mon article [Les polymères](#)).

**L'ADN est un polymère de nucléotides.**

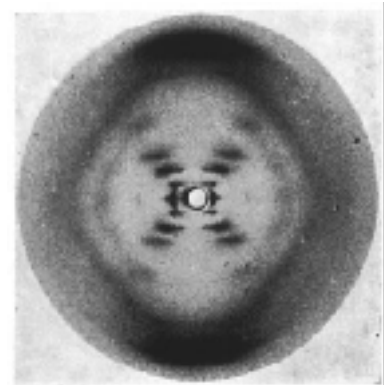
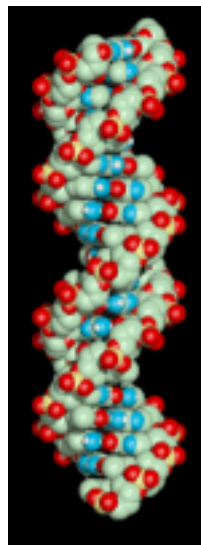
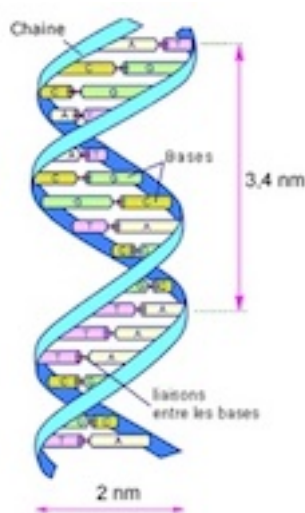
## Deux brins associés en double hélice

Nous venons de décrire la nature et la succession des chainons. Reste à savoir comment la chaîne est disposée globalement. Allongée, en pelote ou autrement? C'est ce qu'on nomme sa **configuration**. Quelle figure adopte-t-elle? La détermination par les scientifiques de la composition de la chaîne telle qu'on vient de l'exposer a été effectuée morceau par morceau sur des fragments d'ADN et le schéma de la fig.11 en présente les résultats comme si la molécule était étirée. En réalité, ce n'est pas le cas.

Comme on l'a mentionné, extérieurement, le filament d'ADN ressemble à un tube souple et flexible d'un diamètre de 2 nanomètres. Mais **quelle est la disposition de la molécule dans ce tube?** Avez-vous déjà vu ces guirlandes lumineuses de Noël, constituées de petites ampoules reliées par un fil électrique, fourrées dans un tube en plastique transparent? Imaginez que le fil électrique, au lieu d'être droit le long de l'axe du tube, s'enroule en spirale à l'intérieur. Maintenant imaginez qu'il y a **deux fils enroulés en spirale avec un léger décalage**. Et bien, nous avons une image approchée de la figure de la molécule. Précisons.

D'abord, le schéma de la figure 11 ne montre que la moitié de la molécule. Le diamètre du tube est suffisant pour loger **deux brins parallèles**. Ces deux brins sont comme les montants d'une **échelle**. Les **barreaux** sont **les bases azotées qui s'accouplent**. Les brins se trouvant face à face, il est facile pour chaque base de s'agripper à la base qui se trouve en face sur l'autre brin.

Enfin, ces brins sont enroulés en **hélice**, c'est-à-dire en spirale le long du tube. Bien sûr, il n'y a pas de tube qui enveloppe les brins comme dans la guirlande. Le tube est la silhouette extérieure que dessinent les deux brins (fig.12). Qu'est-ce qu'une hélice? Un exemple concret d'hélice que vous avez peut-être touchée, c'est la reliure des cahiers dits spirales, ou les ressorts à boudin (*pour en savoir plus sur les spirales et les hélices, voir mon article sur ce sujet*). Imaginez que vous prenez 2 ressorts de ce type et que vous les emboîtez l'un dans l'autre. C'est exactement la structure que prend l'ADN. C'est la **double hélice**.



*Fig.12- Forme de la molécule d'ADN  
Les 2 brins sont enroulés en hélice autour d'un axe commun, et réunis par des liaisons horizontales entre bases azotées*

*Fig.13- Diagramme de diffraction des rayons X par un échantillon d'ADN  
Reproduit avec l'aimable autorisation de Macmillan Publishers Ltd: Nature 171, 740  
© Copyright 1953*

En résumé, imaginez une petite échelle souple déformable que vous prenez aux deux extrémités et vous la tordez comme un linge qu'on essore. Vous obtenez la forme en double hélice. Oui, mais on peut la tordez dans un sens ou dans l'autre. **L'ADN est une hélice qui tourne sur la droite**. Ça veut dire que si c'était un tire-bouchon, vous tournez à droite pour le faire avancer, comme le tire-bouchon normal. Idem avec une vis ou un boulon. L'ensemble de ces informations est représenté sur la figure 12.

## Les liaisons entre bases azotées

Revenons aux barreaux de l'échelle. Les bases azotées ne s'accouplent pas avec n'importe qui. On rencontre seulement deux types d'associations: les bases A+T et les bases C+G. Il y a une stricte complémentarité entre les deux brins.



Comme dans toute association, les liens de couple sont plus ou moins solides. La force de liaison entre bases azotées est relativement faible de sorte que les couples peuvent à volonté se faire et se défaire selon les circonstances. Si ça chauffe, ou si le couple est soumis à des tiraillements provenant du milieu ambiant, les liens peuvent facilement se défaire.

Quelle est donc la nature physique de cette force de liaison? **C'est une affinité d'ordre électrique.** Car les molécules sont faites d'atomes qui eux-mêmes sont constitués de grains d'électricité. La molécule est un monde d'électricité qui circule et oscille. Des échanges électriques ont lieu entre molécules, révélant attirances et répulsions plus ou moins marquées. Cet aspect est développé dans le quatrième chapitre, L'ADN électrique.

## Les formes changeantes de l'ADN

La popularisation de l'image de l'ADN en double hélice a l'inconvénient de la présenter comme une structure immuable. Mais non, l'ADN a une vie. L'ADN bouge, se transforme selon ses tâches quotidiennes, autrement dit selon les phases de la vie cellulaire. **Les brins peuvent se séparer partiellement, sur une petite longueur, ou totalement.** [Pause pour un

*couplet sémantique: les biologistes appellent cette séparation une dénaturation. La séparation n'est-elle pas naturelle? Exemple parmi bien d'autres de la négligence avec laquelle les mots sont choisis généralement en anglais par les chercheurs, repris en chœur par ses collègues, puis traduits en français.]*

Par d'autres types d'investigation, on en arrive actuellement à la conclusion que **la forme en double hélice est la plus courante dans la cellule, mais qu'il en existe d'autres variantes.** Des doubles hélices moins ou plus serrées. Des formes en croix, en épingle à cheveux. Des formes où 3 brins s'assemblent sur une partie. Et une forme à 4 brins accolés. (*Voir des précisions en annexe*)

## Les caractères héréditaires sont transmis par l'ADN

Comment en est-on arrivé à conclure que le code génétique est inscrit dans l'ADN? Par une autre série d'investigations qui portent sur l'hérédité et son fonctionnement. Qu'est-ce que l'**hérédité**?

Il est d'observation courante que **certaines caractéristiques de notre corps sont héritées de nos parents.** Nous ressemblons à notre père ou notre mère, à notre grand-mère ou notre grand-père. **Ces ressemblances portent sur des caractères physiques.** La forme du nez ou de la bouche, la couleur des yeux, celle des cheveux, la taille, etc. Quelquefois, c'est une **tare physique** qui est transmise dans une famille par-delà les générations, ou une maladie. Comment cette transmission est-elle possible? Il faut admettre que notre programme de développement physique, notre code génétique, inclut certaines informations qui proviennent de nos parents. Biologiquement, c'est au cours de la fécondation que **le nouvel être hérite des programmes de ses parents.** La fécondation consiste à créer la première cellule du nouvel être à partir d'une cellule du père (le spermatozoïde) et une cellule de la mère (l'ovule). **C'est au moment de la fécondation que se constitue le code génétique du nouvel être, à partir de chromosomes provenant du père et d'autres provenant de la mère.** Puis la cellule initiale se multiplie jusqu'à devenir un organisme complet dans lequel chacune des cellules porte le même code génétique.

## Au cœur de l'ADN, les gènes

Les conclusions des recherches expérimentales des biologistes ont conduit à proposer le schéma suivant sur la nature et la structure des gènes.

### La réalité de l'information sur la structure en double hélice

Pour mieux comprendre la valeur de cette information sur la structure, peut-être est-il utile de préciser la façon dont elle est déterminée par la **diffraction des rayons X** (fig.13). Non, la détermination n'est pas possible sur un seul filament d'ADN tel que le montre la photographie en microscopie électronique (fig.10). Il faut que l'échantillon d'ADN analysé ait un volume suffisant, environ un dixième de millimètre minimum. C'est petit pour nous, mais très gros à l'échelle moléculaire.

Alors les chercheurs ont extrait de l'ADN d'une cellule (de thymus de veau) avec grand soin et l'ont arrangé en un empilement serré presque cristallin (exactement une structure de fibre). Techniquement, c'est un exploit. Historiquement, c'est Signer en Suisse, qui l'a réalisé, Wilkins, Franklin et Gosling (Angleterre) qui en ont obtenu le diagramme X en 1953 et l'ont interprété partiellement, et Watson et Crick (Angleterre) qui l'ont interprété complètement. Reste à savoir si cet ADN extrait a la même configuration que lorsqu'il est dans la cellule.

Un gène est une portion de chromosome, ou plus exactement une **portion de l'ADN** qui le constitue, une portion **qui porte une instruction déterminant un caractère physique de l'organisme vivant**, végétal, animal ou humain. Exemple: chez l'humain, l'instruction concernant la couleur des yeux est inscrite à un emplacement précis du chromosome 15.

Or pour certaines personnes, le gène de la couleur des yeux donne l'instruction pour la couleur bleue et pour d'autres pour la couleur brune, par exemple. Cela signifie qu'elles n'ont pas le même gène. Mais alors comment le corps sait-il que dans les deux cas, c'est le gène qui code la couleur des yeux? C'est l'emplacement du gène qui détermine quelle en est la fonction. **Le gène possède un marqueur de début qui indique que là commence l'instruction "Couleur des yeux" et un marqueur de fin.** Plus loin, nous verrons quel est le langage utilisé pour coder ces instructions.

### Démonstrations expérimentales de la localisation du code génétique dans l'ADN

L'idée et les preuves expérimentales que le code génétique est situé dans l'ADN est le résultat des recherches effectuées par un ensemble de scientifiques depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle, conjuguées avec la mise au point de techniques sophistiquées d'analyse, ainsi que l'apparition des manipulations génétiques. Les chercheurs scientifiques n'échappent pas aux sentiments humains qui se manifestent dans toutes les activités humaines: admiration, engouement, besoin de reconnaissance, controverse, incrédulité, dogmatisme, jalousie, orgueil... et ce n'est que peu à peu que cette connaissance a obtenu le consensus de la communauté scientifique.

Les observations ont été menées parfois sur des cellules humaines, mais le plus souvent sur des cellules végétales ou animales choisies pour leurs avantages expérimentaux. Par exemple, les mouches se reproduisent très vite et on peut observer leur descendance quelques jours ou quelques semaines après seulement. Les vers étudiés ont peu de chromosomes, ce qui facilite la compréhension de leurs transformations, etc. On observe les aspects physiques (couleur des yeux, forme des ailes des mouches, couleur du pelage de la souris) ou encore des anomalies héréditaires du fonctionnement métabolique du corps.

Dans les années 1860, Mendel observe les caractères d'une variété de pois et la façon dont ils se transmettent au cours de croisements entre deux espèces différentes. Un **croisement** consiste à prendre du pollen d'une variété et le déposer sur le pistil d'une autre pour le féconder. Il n'y a pas manipulation génétique directe, mais une accélération manuelle de ce que fait habituellement la nature. Mendel examine des caractères bien visibles tels que la couleur de la graine. Il découvre que la couleur de la descendance est soit verte soit jaune, mais pas de couleur intermédiaire. De l'étude de la statistique d'apparition des couleurs dans la descendance, il déduit que **chaque caractère est forcément transmis par des supports concrets distincts et indépendants**, les facteurs, qu'on appellera plus tard les gènes. Par exemple, il y a un gène pour la couleur verte et un autre pour la couleur jaune.

D'autres chercheurs (Sutton, Morgan) montrent dans les années 1900 - 1930 que **les gènes sont localisés dans les chromosomes**, par une observation fine de la forme de ces chromosomes au cours de la division de la cellule en deux cellules filles, en particulier en mettant en relation l'hérédité propre à chacun des sexes et le rôle des chromosomes sexuels X et Y.

Puis, dans les années 1930 - 1950 d'autres chercheurs (Griffith, Avery) travaillent sur des bactéries dont une variété est mortelle pour la souris et l'autre non. L'agent virulent, lié à la présence d'une coque autour de la bactérie, est codé par un gène. Or les chercheurs ont été capables de transmettre ce gène de la variété virulente à l'autre non virulente et de la rendre virulente, en prenant l'ADN à la population virulente pour l'ajouter à la population non virulente.

**C'est donc bien l'ADN qui porte les gènes.**

Ainsi, on peut se représenter **un chromosome comme une suite d'emplacements** que nous assimilerons à des cadres d'affichage. Comme si dans le couloir d'une société, toutes les portes de bureau sont équipées de la même plaque où est inscrit le numéro du bureau. La fonction de la plaque est la même, c'est le numéro, mais l'information diffère d'une porte à l'autre. Et, sous cette plaque, il y en a deux autres, l'une donnant le nom, l'autre la spécialité (secrétaire, etc). Les plaques sont disposées de la même façon sur chacune des portes, aux mêmes emplacements. Dans les chromosomes, c'est la même chose, à chaque

emplacement est affectée une fonction, par exemple la couleur des yeux. Ces emplacements bien précis sur les chromosomes sont nommés loci (un **locus**) par les biologistes.

## La fécondation et les chromosomes appariés

**Pour quelle raison les chromosomes existent-ils par paires?** (Attention, ne pas confondre avec le fait que la molécule d'ADN d'un chromosome a deux brins). Pourquoi l'organisme juge-t-il bon d'avoir des paires de chromosomes identiques?

Identiques au moins en ce qui concerne leur forme apparente, car au niveau moléculaire, il se révèle qu'ils ne sont pas complètement identiques. **Dans des chromosomes homologues, les emplacements ou loci sont identiques**, les instructions données, les gènes, le sont pour une grande partie, mais pas tous. Car l'un des chromosomes vient du père et l'autre vient de la mère. C'est au cours de la création de la première cellule d'un être, au cours de la fécondation d'un **ovule** et d'un **spermatozoïde**, que se produit l'appariement des deux chromosomes.

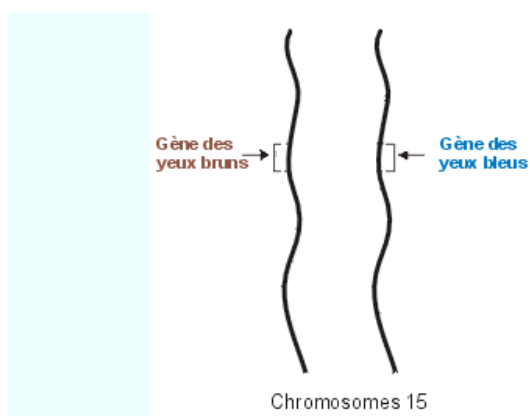
Les cellules sexuelles, ovules et spermatozoïdes, sont des cellules différentes des autres cellules parce qu'elles ne possèdent que 23 chromosomes. **Mises à part ces cellules sexuelles, toutes les cellules d'un être humain possèdent le même ensemble de 23 paires de chromosomes et les mêmes gènes**. Or dans les organes de production des cellules sexuelles (ovaires, testicules), ces cellules se divisent en deux cellules filles d'une façon spéciale. Les paires de chromosomes homologues se dissocient en deux ensembles de 23 chromosomes qui sont affectés à chacune des cellules filles sexuelles.

**Les cellules sexuelles d'un même individu ne sont donc pas toutes identiques par leurs gènes** puisque ceux-ci peuvent provenir soit de l'un soit de l'autre chromosome homologue. Bien plus surprenant, il se produit même à ce moment un contact et des **échanges de gènes entre les deux chromosomes** avant la séparation complète.

Au cours de la fécondation, c'est le processus inverse. Deux cellules sexuelles de 23 chromosomes (l'ovule et le spermatozoïde) fusionnent pour donner une cellule nouvelle de 23 paires de chromosomes. **Un chromosome de l'ovule s'associe avec le chromosome homologue du spermatozoïde**. C'est la cellule initiale de l'être.

Si l'on compare les chromosomes homologues, on constate que la plupart des gènes de l'un sont les mêmes que ceux de l'autre. Ce sont eux qui déterminent les **caractéristiques communes aux êtres humains**. Ce sont les gènes de l'espèce humaine, et ceux de la race du corps que nous habitons.

Mais **il existe aussi de subtiles différences entre les gènes des chromosomes homologues**. Par exemple, sur la paire 15 (fig.14), l'un des chromosomes peut porter le gène codant pour des yeux bleus alors que l'autre porte, au même endroit, un gène codant pour des yeux bruns. Les deux gènes codent pour une même fonction (la couleur des yeux), mais ne codent pas pour la même couleur. Finalement, quelle est la couleur des yeux de cette personne? Il apparaît que l'un des gènes a une fonction **dominante** par rapport à l'autre qui est qualifié de **récessif**. Comment? Mystère! Peut-être ce mystère deviendra-t-il moins mystérieux lorsque nous évoquerons l'architecture de l'ADN et la fonction des zones entre les gènes. (voir le troisième chapitre Architecture de l'ADN)



*Fig.14- Dans les paires de chromosomes homologues, l'un vient du père, l'autre de la mère. Certains gènes peuvent être différents de l'un à l'autre.  
Merci à G. Bourbonnais*

## Les protéines, ouvrières du corps

À ce stade du chapitre, nous savons que les gènes contenus dans l'ADN des chromosomes codent pour un caractère physique. Comment est-ce possible? **Comment un bout de molécule d'ADN peut-il déclencher une machinerie qui va fabriquer les cellules de l'iris de l'œil d'une certaine couleur**, par exemple? La réponse se trouve dans le rôle que jouent certaines grosses molécules du corps, les protéines.

Peut-être connaissez-vous les protéines dans l'**alimentation**? Les aliments que l'on classe parmi les **protides** sont les aliments riches en protéines: protéines d'origine animale telles que oeufs, fromages, chair animale, mais aussi protéines issues de végétaux telles que les légumineuses (lentilles, pois, soja, haricots) ou les noix diverses (noix, noisettes, amandes).

Les protéines ont d'abord été reconnues par l'importance de certaines substances comme l'hémoglobine dans le fonctionnement du corps. *Protéine* signifie d'ailleurs d'importance primordiale. L'hémoglobine se trouve dans les globules rouges du sang. Elle se recharge en oxygène dans les poumons au moment de l'inspiration et elle va le livrer dans tout le corps, toutes les cellules. C'est la démonstration du rôle essentiel d'une molécule dans le bon fonctionnement de l'organisme entier.

Peu à peu, les scientifiques ont découvert que **de nombreuses fonctions dans les cellules sont assurées par des protéines**. Certaines sont les matériaux de construction de la cellule et du tissu qui les entoure. Parmi leurs nombreux rôles, les **hormones** et les **enzymes** sont des éléments essentiels du métabolisme humain. Les enzymes sont les facteurs qui régulent tous les processus de vie en intervenant dans les réactions chimiques d'absorption, digestion, assimilation, et croissance au niveau des cellules.

Bien que les rôles et les dimensions des protéines soient très divers, elles présentent une structure chimique commune. Comme l'ADN, elles sont constituées d'un collier de perles. Les types de perles sont au nombre de 20 (au lieu de 4 pour l'ADN), et ce ne sont pas des bases azotées, mais des groupements que l'on appelle des **acides aminés**. En langage chimique, **les protéines sont des polymères constitués de l'assemblage de nombreux acides aminés pris parmi 20 types différents** (ou plus rarement 22).

Où ces informations nous mènent-elles? La vie des cellules est régulée par des protéines... Les caractères physiques sont élaborés par les protéines comme ouvrières spécialisées... Donc les gènes déterminent les caractères physiques parce qu'ils commandent la fabrication des protéines.

En définitive, **un gène est une portion de l'ADN qui porte le code de fabrication d'une protéine**.

## La carte chromosomique des gènes ou génotype

Si nous brosons une vue d'ensemble des gènes humains, avec leur fonction, et leur localisation dans les chromosomes, nous aboutissons à une carte nommée le **génotype**. Le génotype est constitué de **l'ensemble des gènes qui ont été repérés comme codant pour une protéine**, qui a été identifiée (fig.15).

### Comment sait-on que tel gène code pour telle protéine?

La détermination du rôle des protéines et de leur codage par les gènes a demandé un certain temps chez les scientifiques. Elle a profité de la convergence de nombreuses techniques modernes d'analyse chimiques (marquage par des molécules radioactives, découpage de l'ADN par des enzymes, ..) et physiques (détermination de la structure des protéines par la diffraction des rayons X).

Morgan parvient à localiser les gènes de la mouche sur les chromosomes en observant leurs recombinaisons au cours de la fécondation et leur manifestation dans la descendance. Muller découvre le moyen de provoquer un fort taux de mutation (modification) des gènes en irradiant les mouches avec des rayons X.

Beadle et Tatum montrent que la production d'enzymes (qui sont des protéines) dans des cellules de champignons peut être rendue déficiente par irradiation et que la déficience est transmise génétiquement. Ils montrent qu'à un gène correspond un enzyme.

### Les ARN messagers

Dans les cellules, on trouve des molécules d'ARN, sorte de fragments courts d'ADN. **Cet ARN joue le rôle d'un moule en creux du gène**. Il reproduit le gène par complémentarité des bases: **C** est reproduit en **G** par exemple. **A** est reproduit, non en **T**, mais en une variante spécifique à l'ARN appelée uracile (**U**). Ainsi le codon CGA de l'alanine est moulé en GCU. Les introns sont dans un premier temps transcrits, puis rapidement évacués. Puis cet ARN se déplace et va créer la protéine dans son atelier (d'où son qualificatif de messenger).

En mettant des acides aminés en présence d'une molécule d'ARN, Khorana obtient des protéines dont la séquence en acides aminés est le reflet de la séquence des codons de l'ARN. En synthétisant d'autres ARN messagers, et en utilisant des molécules marquées, on a pu déchiffrer tous les gènes.



Le séquençage complet du génome humain a été terminé en 2004, soit il y a quelques années seulement. Compte tenu de la complexité de l'organisme humain et du nombre de types de protéines nécessaires à son bon fonctionnement, les chercheurs s'attendaient à un nombre très important de gènes. La surprise a été de taille quand ils ont appris qu'il y en avait en fait très peu. On en a dénombré environ 25'000 répartis dans les 23 paires de chromosomes. Les protéines qui leur correspondent contrôlent d'une part certains **caractères physiques**, et d'autre part certains types de **maladies héréditaires**. Le petit nombre de gènes a appelé l'attention sur le rôle des autres parties, non-codantes, de l'ADN (*voir le chapitre Architecture de l'ADN*).

**Il est surprenant que les biologistes aient exprimé le génotype par les déficiences organiques.** On se serait attendu à ce qu'une protéine code pour un potentiel, une fonction d'épanouissement ou d'intégrité corporelle. C'est comme si on définissait l'oeil par la cécité et le foie par la cirrhose. Les biologistes préfèrent se centrer sur les défauts des protéines et les manques de l'organisme. C'est révélateur d'une mentalité!

## La carte chromosomique des bases azotées ou génome

Puisqu'un gène est une portion de l'ADN et que l'ADN est un enchainement de bases azotées (fig.11), **un gène est une courte séquence de bases azotées**. Cette séquence comporte un début et une fin. Concrètement les **indicateurs de début et de fin de gène** sont une séquence particulière de 3 bases azotées.

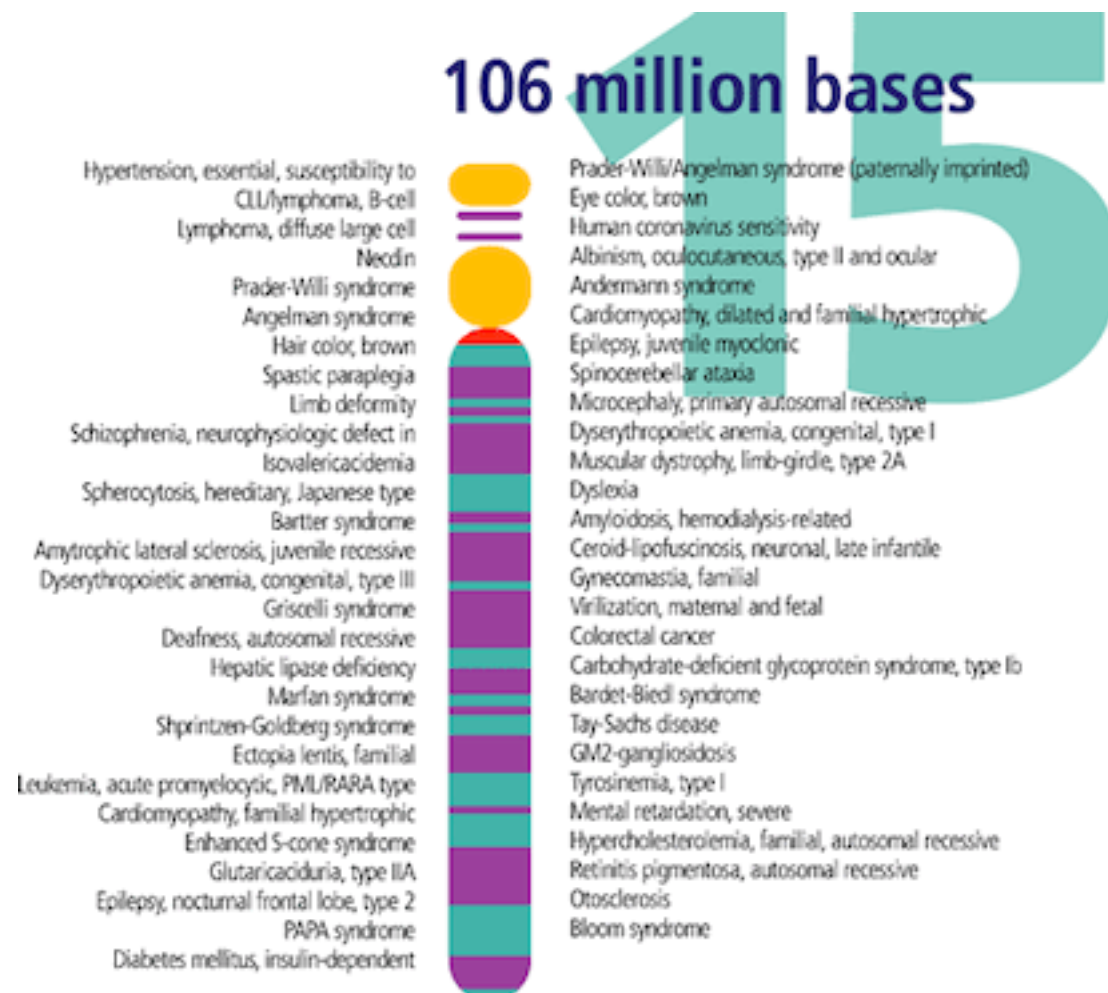


Fig.15- Carte génique du chromosome 15. Chaque bande colorée représente un gène. En face est inscrite sa fonction, qui est la détermination d'un trait physique ou d'un désordre organique.

(Extrait du site [Human Genome Project](http://www.human-genome-project.org) où l'on peut trouver la carte de tous les chromosomes)

Au total, la séquence d'un gène comprend ces indicateurs, des bases qui codent pour une protéine, et aussi d'autres suites de bases non-codantes, qui sont intercalées dans les régions codantes du gène. Ces séquences de bases non-codantes à l'intérieur des gènes sont appelées **introns**. Les régions codantes sont nommées **exons**.

Lorsqu'on examine les emplacements de tous les gènes d'un chromosome, on constate qu'ils n'occupent qu'une faible partie de l'ADN. De longues régions non-codantes séparent les gènes. Au total, on a des régions non-codantes à l'intérieur des gènes (introns) et entre les gènes. Finalement, **les régions codantes de l'ADN sont en faible proportion - seulement 1,3% chez les humains** - ce qui laisse 98,7% de régions non-codantes.

Pendant des années, ces régions non-codantes ont été taxées d'inutiles et même de déchet ou de poubelle (junk), d'après l'expression d'un chercheur, S. Ohno en 1972 (*So Much, Junk DNA in our Genome*). Depuis quelques années, il est devenu clair qu'elles ont des fonctions importantes de régulation (*voir le chapitre 3: Architecture de l'ADN*).

Le **génome**, c'est l'ensemble de toutes les séquences de bases azotées de l'ADN de la totalité des chromosomes (le caryotype, fig.9), qu'elles soient codantes ou non. Le **génotype** est la partie du génome qui est codante, constituée de l'ensemble des exons.

## Le langage codé de l'ADN

Dans la compréhension du code génétique, il nous reste à décrypter comment un gène se fait entendre. Par quel langage exprime-t-il l'ordre de fabriquer une protéine précise?

Souvenons-nous que les protéines sont des chaînes constituées de l'assemblage de 20 types d'acides aminés. Le gène déroule **la liste ordonnée des acides aminés qui doivent être convoqués et assemblés** pour construire la protéine correspondante. Après l'indicateur de début de gène, vient l'instruction de convoquer le premier acide aminé, puis le deuxième qui sera accroché au premier et ainsi de suite, jusqu'à l'indicateur de fin.

La question est donc maintenant la suivante. Par quel langage le gène exprime-t-il l'ordre de convoquer un acide aminé précis? Il le fait au moyen d'un code.

**Chaque acide aminé est représenté (nommé) par un mot de 3 lettres** prises parmi un ensemble de 4 lettres. Ces lettres, ce sont les bases azotées, A, C, G et T. Autrement dit un acide aminé est convoqué par la succession dans un ordre précis de 3 bases sur la chaîne d'ADN. Ce mot de 3 bases est appelé un **codon**.

Par exemple, la séquence GAC commande l'appel de la leucine. Le codon ACC commande l'appel du tryptophane et le codon CGA celui de l'alanine.

Or l'ADN étant constitué de deux brins complémentaires, un codon a son complément en miroir. Lequel des deux est opérant? On a pu établir que **l'information pour un codon donné n'est portée que par un seul des deux brins**. Le miroir sur le second brin joue le rôle de stabilisateur. Cependant porter des codons n'est pas le privilège d'une seule chaîne. On trouve des codons sur les deux.

Concrètement, le gène est transcrit en une molécule d'**ARN** de même longueur, puis les séquences correspondant aux introns sont éliminés, et c'est cette **molécule raccourcie d'ARN** ou **ARN messager** qui va transporter le code (*voir encadré*). Le code de l'ARN est complémentaire du code ADN. Ainsi, le code ADN de la leucine qui est GAC, est transcrit en CUG dans l'ARN, U étant complémentaire de A dans l'ARN. Généralement, les auteurs fournissent des tables du code de l'ARN.

Chacun des 20 acides aminés est commandé par un code, mais ce code n'est pas obligatoirement unique. **Certains acides aminés ont reçu plusieurs codes qui sont équivalents**. Par exemple, l'alanine est codée non seulement par GCU, mais alternativement par GCC, GCA ou GCG. Le nombre de codons équivalents peut varier entre 1 et 6 selon les acides aminés.

Puisqu'une **protéine** est constituée de l'enchaînement de plusieurs acides aminés, le gène qui code pour cette protéine est constitué de l'enchaînement d'autant de codons. Toutefois, rappelons qu'**en plus des codons, le gène inclut des introns et des indicateurs de début et de fin**. On a également découvert d'autres indicateurs tels que l'**opéron**, qu'on évoquera dans le deuxième chapitre.

Revenons au principe du codage. Désigner un acide aminé par un code de 3 lettres est un procédé astucieux et simple. **La nature, comme les êtres humains, emploie des langages pour communiquer**. Toutefois, les langages de la nature et de l'univers semblent plus conformes à des codes symboliques, mathématiques ou géométriques qu'à la syntaxe du langage parlé humain (*voir article Codes et rayonnements*).

## Unité et diversité des êtres vivants

Le code de fabrication des acides aminés est le même pour tous les organismes vivants, du moins tant que l'on considère seulement l'ADN des noyaux. C'est l'un des fondements de l'**unité biologique des êtres vivants**. Qu'est-ce qui fait leur **diversité**? C'est d'abord la variété de la façon dont les codons sont combinés pour former les mots et les phrases, autrement dit les chromosomes.

| le code génétique         |   |                    |     |     |     |                      |      |     |      |                            |
|---------------------------|---|--------------------|-----|-----|-----|----------------------|------|-----|------|----------------------------|
|                           |   | Deuxième lettre    |     |     |     |                      |      |     |      | Troisième lettre (côté 3') |
|                           |   | U                  |     | C   |     | A                    |      | G   |      |                            |
| Première lettre (côté 5') | U | UUU                | Phe | UCU | Ser | UAU                  | Tyr  | UGU | Cys  | U                          |
|                           |   | UUC                | Phe | UCC | Ser | UAC                  | Tyr  | UGC | Cys  | C                          |
|                           |   | UUA                | Leu | UCA | Ser | UAA                  | Stop | UGA | Stop | A                          |
|                           |   | UUG                | Leu | UCG | Ser | UAG                  | Stop | UGG | Trp  | G                          |
|                           | C | CUU                | Leu | CCU | Pro | CAU                  | His  | CGU | Arg  | U                          |
|                           |   | CUC                | Leu | CCC | Pro | CAC                  | His  | CGC | Arg  | C                          |
|                           |   | CUA                | Leu | CCA | Pro | CAA                  | Gln  | CGA | Arg  | A                          |
|                           |   | CUG                | Leu | CCG | Pro | CAG                  | Gln  | CGG | Arg  | G                          |
|                           | A | AUU                | Ile | ACU | Thr | AAU                  | Asn  | AGU | Ser  | U                          |
|                           |   | AUC                | Ile | ACC | Thr | AAC                  | Asn  | AGC | Ser  | C                          |
|                           |   | AUA                | Ile | ACA | Thr | AAA                  | Lys  | AGA | Arg  | A                          |
|                           |   | AUG                | Met | ACG | Thr | AAG                  | Lys  | AGG | Arg  | G                          |
|                           | G | GUU                | Val | GCU | Ala | GAU                  | Asp  | GGU | Gly  | U                          |
|                           |   | GUC                | Val | GCC | Ala | GAC                  | Asp  | GGC | Gly  | C                          |
|                           |   | GUA                | Val | GCA | Ala | GAA                  | Glu  | GGA | Gly  | A                          |
|                           |   | GUG                | Val | GCG | Ala | GAG                  | Glu  | GGG | Gly  | G                          |
|                           |   | codon d'initiation |     |     |     | codon de terminaison |      |     |      |                            |

Merci à Cell Biology Promotion

Unité et diversité s'expriment aussi dans l'espèce humaine. Comment les individus peuvent-ils être à la fois tous semblables et identifiables en tant qu'humains, et uniques? L'ADN est presque le même pour tout le monde et c'est ce qui fait l'espèce humaine. **Les individus de la même espèce ont le même plan de développement**. Mais l'ADN comporte aussi quelques différences entre les individus sur certains loci.

Le génome humain compte 3 milliards de bases dont on estime que seulement 3 millions, soit 1 pour 1000, diffèrent selon les individus. Toutefois ces différences sont rarement localisées dans les séquences codantes. Ces différences semblent plutôt provenir de la façon dont ce code s'exprime sous diverses influences, certaines fournies par les zones non-codantes.

Si notre évolution est dirigée par un programme de développement interne, le génotype, cela pose une question fondamentale de conscience. **Quelle liberté avons-nous dans notre développement? Qu'est-ce qui est prédéterminé et qu'est-ce qui est malléable?** Bien entendu, il s'agit du développement physiologique et physique.

Une partie de la réponse est que le mode d'expression de ce programme est éminemment variable. Pour nous en rendre compte, il suffit d'observer que toutes les cellules d'un individu possèdent le même ADN, le même génotype, et que pourtant **les cellules se différencient dans le corps selon leur fonction**. Ainsi les cellules du foie sont bien différentes des cellules de l'iris avec le même code génétique. L'explication est qu'**il existe des facteurs dans la cellule qui contrôlent la façon dont ce code se manifeste**. Même si les cellules ont le même potentiel, celui-ci s'exprime seulement partiellement, en fonction de son environnement.

On a retenu comme gènes les parties de l'ADN qui codent pour des protéines. Or il existe d'autres modes d'expression génétique inscrits dans l'ADN liés aux introns et aux autres **zones non-codantes**. Cette expression est modulée par des facteurs environnementaux (*voir chapitre suivant*). Que dire de notre **développement émotionnel et mental**? Nos pensées, nos émotions, notre conscience ont-elles une influence sur notre développement physique? Reconnaissons que nous ne savons pas grand chose de ces mécanismes et que nous devons garder une attitude humble.

## 2. L'ADN et ses modes d'expression

### -Impact de l'environnement sur l'expression des gènes -Transmission par hérédité - Épigénétique-

**Résumé:** Contrairement à l'idée répandue selon laquelle nous sommes programmés par notre code génétique, des scientifiques ont montré que celui-ci est en réalité un stock de données qui peuvent être activées ou non selon nos conditions de vie (nutritionnelles et psychiques). La science de l'**épigénétique** a montré que cette activation était due à des modifications chimiques réversibles du gène. Chacun de nous est donc dans un état épigénétique qui lui est propre et qui se modifie avec l'âge. Dans certaines circonstances, cet état est transmissible à la **descendance**, et cela bouleverse les idées figées des scientifiques sur l'évolution des espèces par la sélection naturelle. D'autres observations nous démontrent que l'ADN et les gènes ne sont pas des assemblages constitués de façon fixe et définitive. L'ADN se recompose en partie lorsque certains fragments (les **transposons**) changent de place. La **plasticité des cellules nerveuses** est un autre exemple qui montre combien nos cellules ne sont pas constituées une fois pour toutes, mais possèdent la capacité étonnante de s'adapter au changement et d'inventer de nouvelles formes.

Dans le premier chapitre, nous avons fait connaissance avec la molécule d'ADN au sein des noyaux des cellules, et nous avons découvert que certains fragments de cette molécule appelés gènes portaient des instructions codées pour le développement physique du corps. L'ensemble de ces instructions est appelé le code génétique. Il contrôle la fabrication des protéines, grosses molécules qui sont les ouvrières du fonctionnement et de la croissance du corps. Mais nous sommes arrivés à l'observation que ces instructions ne sont pas forcément mises en œuvre. **Il est des circonstances où le code génétique se manifeste et d'autres non.** De quelle façon et pourquoi? C'est ce que nous explorons dans ce deuxième chapitre.

### L'illusion du tout-génétique

La formidable découverte de l'existence du code génétique inscrit dans l'ADN et le décodage de son langage a popularisé l'idée que le fonctionnement du corps est programmé. Comme si nous avions un ordinateur dans nos cellules, qui déterminerait la fabrication de nos cellules et hormones, déclencherait nos maladies, et pourquoi pas, programmerait nos sentiments et nos pensées. Selon cette vision, nous ne serions pas responsables de notre vie puisqu'elle serait déterminée génétiquement, indépendamment de notre volonté. Nous ne serions là que pour subir notre destinée biologique sans possibilité de la changer.

Or cette représentation est fausse. Le code génétique constitue seulement un stock d'informations et une potentialité. **Un gène peut être activé ou désactivé.** La mise en œuvre de l'instruction portée par un gène (les biologistes emploient le terme d'expression du gène) se déclenche seulement si elle en reçoit l'ordre et si on lui en fournit l'énergie. Si l'on reprend l'image de l'ordinateur dans notre corps, **le code génétique est un ensemble de programmes ou d'outils qui peuvent être utilisés ou non, selon les circonstances et les besoins.**

L'idée couramment répandue qu'il existerait des gènes pour les principales caractéristiques structurales et fonctionnelles d'un être vivant est erronée. Tout ce que disent les très nombreuses expériences des généticiens, c'est simplement que la modification de gènes particuliers peut avoir des conséquences précises sur ces différentes caractéristiques. **Les gènes ne sont qu'une mémoire, qui permet de fabriquer les composants essentiels du vivant que sont les protéines.** (Michel MORANGE, biologiste moléculaire, La part des gènes, 1998)

Le séquençage récent du génome humain a révélé que le nombre de gènes est relativement restreint, moins de 30'000, pas plus qu'une plante! C'est bien peu pour expliquer la complexité du fonctionnement du corps. Il faut donc s'attendre à ce que d'autres mécanismes interviennent pour créer la diversité d'apparence, de comportement et d'expression des individus.

La société américaine connaît un formidable engouement pour les gènes et les interprétations biologiques des comportements. Les références aux traits génétiques abondent dans les



feuilletons, les téléfilms, les films, la presse, les magazines féminins,... ou dans le discours politique... Ce fantasme de la toute puissance du gène n'a guère cours qu'au sein d'une minorité de chercheurs, mais **leur discours est souvent entendu par les politiques et relayé sous forme de lieux communs par les médias et les propos de café**. Ils font aussitôt la une des journaux mais leur réfutation est plus discrète, voire sans incidence sur ces mêmes médias. (David LE BRETON Professeur de sociologie, Université de Strasbourg)

Ce cadre de pensée [du déterminisme génétique] a dominé les trente dernières années et a culminé avec le projet Génome humain. Il suffirait de déchiffrer ce «programme» pour comprendre la totalité de la nature d'un organisme. Mais l'idée que «tout est génétique» commence à être sérieusement ébranlée. On sait maintenant que **n'importe quel ADN peut être lu et interprété par n'importe quelle cellule, ce qui ramène l'ADN à de simples données interprétables par des «machines cellulaires» très différentes. L'important, c'est l'environnement cellulaire plus que l'ADN**. (Maurice PORCHET, Professeur de biologie, Université des Sciences et Technologies de Lille. D'après: La fin du «tout génétique», vers de nouveaux paradigmes en biologie, Henri ATLAN, INRA, Paris, 1999)

Il est clair que le nombre de gènes qui codent pour des protéines n'est pas en rapport avec la complexité relative. Par exemple, un simple ver nématode avec seulement 1000 cellules a presque autant de gènes codant pour des protéines (~ 19'300) que les humains et d'autres vertébrés (~20,000). Aussi, il doit y avoir un large ensemble d'informations additionnelles importantes, probablement pour la plupart de l'information de régulation, qui se tient en-dehors des frontières des exons des gènes conventionnels. (J. Mattick, *The Human Genome: RNA Machine - The Scientist*, 2007)

Si les organismes étaient entièrement programmés par le code génétique de l'ADN, alors tous les organismes possédant le même ADN et le même code (plantes issues de graines semblables, clones, jumeaux), toutes les cellules possédant le même ADN et le même code (celles qui appartiennent au même organisme) devraient se développer et se comporter de manière strictement identique. Or quelques observations toutes simples nous convaincront que **des codes génétiques identiques peuvent s'exprimer et donner lieu à des manifestations variées selon l'environnement de l'organisme**.

## **Des codes génétiques identiques se manifestent différemment selon l'environnement**

Des observations immédiates sur les plantes illustrent le fait que **les graines issues d'une plante donnée, donc possédant le même code génétique, produisent des plantes d'aspect bien différent selon le terrain où elles sont semées**, selon la façon dont on les a nourries et soignées. Certaines plantes bien nourries sont resplendissantes et d'autres qui manquent d'eau sont rabougries. Un exemple extrême (et regrettable) est la technique du bonsaï, par laquelle on obtient un arbre nain en le privant de sa nourriture normale. De même, tous les êtres vivants, tous les êtres humains dépendent de leur nourriture et de leur environnement pour se développer et s'épanouir.

La croissance d'un organisme dépend donc à la fois du code génétique et de sa mise en œuvre par des facteurs environnementaux adéquats (eau, nourriture, soins, etc.).

On peut comparer les instructions génétiques au **plan d'un architecte**. Celui-ci reste abstrait tant que les ouvriers ne sont pas présents et opérationnels, qu'ils ne disposent pas des outils et des matériaux nécessaires, et qu'ils ne lisent pas les instructions du plan. Dans le domaine biologique, le plan comporte de nombreuses options car il prévoit diverses circonstances en fonction du terrain et des matériaux. Donc, selon les matériaux, selon l'ardeur des ouvriers et selon le terrain, le bâtiment sera construit d'une façon ou d'une autre.

Mais qui sont les ouvriers et les matériaux? Les **matériaux** sont les molécules nécessaires à l'édification et au fonctionnement du corps. Elles sont parfois bien approvisionnées, parfois manquantes ou rares si la nutrition ou le métabolisme ne sont pas corrects. Les **ouvriers** sont un groupe de protéines qui sont produites spécialement pour actionner ces molécules-matériaux selon les instructions du code génétique (voir chapitre 1). Leur production et leur mise en œuvre sont influencées par les circonstances.

## Des codes génétiques identiques se manifestent différemment selon les cellules

Les considérations précédentes relatives à une plante et un organisme entier sont également pertinentes au niveau de la cellule. **Toutes les cellules de notre corps contiennent le même code génétique avec tous les gènes**, aussi bien les cellules du cœur que les cellules des yeux. Si les gènes déterminaient implacablement le développement biologique, toutes les cellules d'un même organisme devraient se développer de la même façon. Et pourtant, à partir de la première cellule, résultant de la fécondation, **les cellules se diversifient dans leurs formes, leurs structures et leurs fonctions**. Certaines deviennent des cellules nerveuses, d'autres des cellules de la peau, et d'autres des cellules de la muqueuse intestinale.

**Il existe donc des facteurs, autres que le code génétique lui-même, qui orientent et déterminent la croissance cellulaire**. Qu'est-ce qui influe ainsi sur la présence ou l'activité des protéines ouvrières de la cellule? On a découvert que ces influences opèrent au niveau des gènes en les activant ou en les désactivant.

Les gènes qui sont actifs ne sont pas les mêmes selon les organes et tissus. Dans les cellules du foie, les gènes qui fabriquent les cellules du cœur sont inactivés et inversement. Ainsi, dans chaque tissu biologique, seulement 10 à 20% des gènes sont actifs. **Les gènes qui sont spécifiques d'une cellule sont actifs et les autres sont réduits au silence**. Les gènes qui assurent les fonctions qui sont communes à toutes les cellules comme absorber de la nourriture, la transformer, grandir et se diviser, sont actifs dans toutes les cellules.

Certaines fonctions particulières des cellules **varient également dans le temps**, comme celles qui sont en rapport avec le développement de l'embryon ou certaines phases de la vie de l'individu. Les gènes correspondants sont actifs à ces périodes et désactivés par la suite.

Reste à savoir par quel facteur, par quel procédé un gène peut être rendu actif ou inactif selon son environnement. Des réponses relativement récentes sont fournies par ce qu'on appelle la science de **l'épigénétique**.

Notons que dès 1960, à une époque où le dogme génétique inculqué par Crick, le découvreur avec Watson de la conformation en double hélice de l'ADN, stipulait que l'information génétique circulait dans un seul sens, de l'ADN vers l'ARN, puis vers la protéine, deux biologistes français François Jacob et Jacques Monod ont proposé que des gènes peuvent être rendus actifs ou inactifs sous l'influence d'autres gènes, les **opérons**, par une sorte de dialogue entre ces molécules (*voir annexe*).

## L'épigénétique, complément de la génétique

**L'épigénétique étudie les modifications de l'ADN qui n'affectent pas la séquence des gènes**: changement de position, associations avec d'autres molécules. Elle examine comment ces modifications sont susceptibles de désactiver ou d'activer les gènes. C'est la génétique de la "surface" (épi-) de la molécule.

L'ADN est comme une bande magnétique porteuse d'information, mais qui ne sert à rien sans magnétophone. L'épigénétique joue en quelque sorte le rôle du magnétophone. (*Bryan Turner, Birmingham, RU*)

On peut sans doute comparer la distinction entre la génétique et l'épigénétique à la différence entre l'écriture d'un livre et sa lecture. Une fois que le livre est écrit, le texte (les gènes ou l'information stockée sous forme d'ADN) seront les mêmes dans tous les exemplaires distribués au public. Cependant, chaque lecteur d'un livre donné aura une interprétation légèrement différente de l'histoire, qui suscitera en lui des émotions et des projections personnelles au fil des chapitres. D'une manière très comparable, l'épigénétique permettrait plusieurs lectures d'une matrice fixe (le livre ou le code génétique), donnant lieu à diverses interprétations, selon les conditions dans lesquelles on interroge cette matrice. (*Thomas Jenuwein, Vienne, Autriche*)

L'épigénétique, comme la génétique, s'attache à comprendre le fonctionnement des gènes. Or ceux-ci interviennent dans deux domaines: d'une part le fonctionnement de notre corps; d'autre part l'hérédité - ce que nous transmettons à notre descendance ou ce que nous recevons de notre ascendance. En ce qui concerne le premier aspect, chacune des cellules est pilotée selon les instructions contenues dans ses

gènes, selon leur état d'activation. En ce qui concerne l'hérédité, le corps fabrique des cellules sexuelles ou **gamètes** (pour les humains, les spermatozoïdes et les ovules) qui contiennent également ces gènes. Au moment de la fécondation, union d'un ovule et d'un spermatozoïde, ces gènes sont transmis à l'enfant et vont piloter sa croissance et son fonctionnement. **L'épigénétique examine aussi dans quelle mesure les modifications de l'ADN sont transmises héréditairement par l'intermédiaire de ces gamètes.**

## Nos expériences de vie affectent l'état des gènes

Jusqu'à une époque récente, les scientifiques, relayés par la presse et les médias, considéraient que des maladies telles que cancers, diabètes, schizophrénie et autres étaient programmées par nos gènes et inéluctables, à moins de modifier les gènes par drogues, irradiation ou thérapie génique. Or pour le commun des mortels, c'est une évidence que **notre santé dépend de la qualité de l'air que nous respirons, de notre alimentation, de la consommation de tabac, drogues et produits toxiques, de l'exercice physique, de nos tensions mentales, des stress que nous subissons, de l'amour que nous recevons** (voir article *Santé naturelle*).

Depuis quelques années, la science démontre le bien-fondé de ce point de vue. Il y a une accumulation de preuves scientifiques sur le fait que la qualité de l'environnement et le vécu psychologique modifient l'état des gènes par la voie épigénétique, en les activant ou les désactivant.

Beaucoup de généticiens pensent désormais que le comportement de nos gènes peut être modifié par les expériences de la vie, et même que ces changements peuvent être transmis aux générations futures. Cette constatation peut transformer notre compréhension de l'hérédité et de l'évolution. (Dr. Mae-Wan Ho, *De quoi les gènes se souviennent-ils?* Prospect Magazine, 2008)



## Observations de jumeaux génétiquement identiques

La modification de l'état des gènes a été mise en évidence dans plusieurs types d'expériences effectuées par des équipes médicales et biologiques du monde entier. Par exemple, on a étudié des **jumeaux génétiquement identiques qui présentent néanmoins des différences de santé** (voir *Futura-Science*, et *Epigénome*). Au fur et à mesure qu'ils grandissent et se développent, ils vivent des expériences différentes, sont confrontés à un environnement physique et psychologique différent, et leur apparence change. Comment se peut-il que l'un soit en bonne santé et l'autre affecté d'un cancer par exemple? Cela s'explique par un mécanisme épigénétique dû aux conditions de vie. Le gène protecteur contre le cancer (nommé ainsi selon la vision des biologistes) a été désactivé chez l'un et pas chez l'autre. S'ils sont identiques génétiquement, ils ne le sont pas épigénétiquement.

Selon le Dr. Mae-Wan Ho (*Les régimes alimentaires influencent l'expression des gènes*), la plupart des généticiens concentrent toujours leurs efforts sur des séquences génétiques pour découvrir quelles sont les variantes de certains gènes qui seraient associées à telle ou telle maladie. Mais il y a de bonnes raisons de penser que ce soit une grossière erreur. Le Dr. Thomas Insel, Directeur de l'Institut national de la santé mentale, a remarqué que ces effets épigénétiques pourraient s'avérer être beaucoup plus importants que les séquences des gènes sur lesquels la plupart des généticiens sont encore focalisés. Le Dr. Arturas Petonis, un professeur de psychiatrie au Centre pour l'addiction et la santé mentale à l'Université de Toronto, croit également que l'épigénétique peut détenir la réponse concernant beaucoup de mystères qui sont déroutants pour la génétique classique: pourquoi un jumeau identique développe-t-il la schizophrénie et pas l'autre? Pourquoi certains gènes de maladie affectent-ils certains beaucoup plus que d'autres? Pourquoi des maladies comme l'autisme se rencontrent-elles toujours plus fréquemment chez les garçons que chez les filles?

## Maladies en rapport avec des altérations épigénétiques

La thèse qui a longtemps prévalu et perdure chez de nombreux scientifiques et médecins est que le cancer

est dû à une anomalie de certains gènes, liée à des mutations génétiques. Ces mutations peuvent être causées par l'exposition à des radiations et des produits toxiques tel que le tabac. Or il est maintenant reconnu que **des altérations épigénétiques interviennent et qu'elles sont souvent beaucoup plus importantes que les altérations des gènes eux-mêmes**. Certains gènes ont été activés ou désactivés par les conditions de vie.

Ces découvertes ont des répercussions importantes sur les thérapies du cancer. Car les altérations épigénétiques étant réversibles, il n'y a pas nécessité de tuer les cellules cancéreuses, mais seulement de rétablir l'activation correcte des gènes. Ces thérapies existent pour certaines formes de leucémie ou cancer du sang (voir [Dr JP. Issa](#)).

Les altérations des gènes d'une personne qui surviennent à l'état foetal ou dans sa **petite enfance** sont particulièrement influentes. Ce que vit l'enfant à cette période détermine son capital santé et ses chances d'épanouissement. Une mauvaise nutrition peut le prédisposer à des maladies chroniques qui se manifesteront plus tard dans sa vie. De plus, ces effets peuvent être transmis à sa descendance.

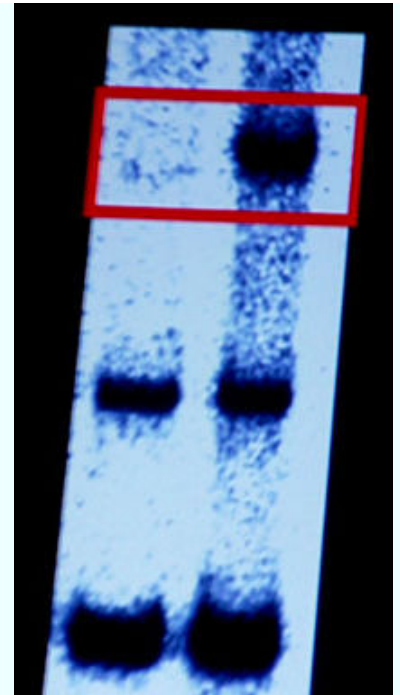
### Vieillesse et altérations épigénétiques

Au cours d'une vie normale, nos cellules sont renouvelées régulièrement. Certaines meurent, d'autres se divisent pour donner deux nouvelles cellules, et ce cycle se reproduit sans cesse. Mais au cours de ces divisions, à cause des agressions de l'environnement et des événements psychiques, **des altérations épigénétiques se produisent et elles s'accumulent avec l'âge**.

Il est possible de mettre en évidence les altérations épigénétiques d'un tissu cellulaire. On constate effectivement que les personnes âgées ont plus d'altérations épigénétiques que les jeunes (*voir figure ci-contre*). Il est même possible, si l'on se réfère au processus moyen de vieillissement des individus, d'estimer l'âge d'une personne seulement en regardant son diagramme épigénétique.

Pour le Dr Issa, le processus cancéreux est proche d'un phénomène de **vieillesse accéléré**. La division des cellules cancéreuses s'emballe, devient anarchique, ouvrant la porte à la production de nombreuses altérations épigénétiques.

**Sources:** Les lecteurs intéressés pourront trouver les détails biologiques dans les publications des travaux de diverses équipes de recherche. Parmi bien d'autres, je cite: *Diet Trumping Genes*, Dr. Mae-Wan Ho, site ISIS; *Epigenetic therapy*, Dr. Jean-Pierre Issa, Anderson Cancer Center; *Mother's diet can tinker with baby's genes, dietary supplement can make generations of mice obese*, Claire Ainsworth, *Nature*, 2006.



*Altérations épigénétiques (marquées par un contrastant sombre). Comparaison entre un enfant de 8 ans (à gauche) et une personne de 60 ans (à droite). Analyse par chromatographie.  
D'après Jean-Pierre Issa  
©NOVA/WGBH Educational Foundation*

### Les risques de défauts congénitaux sont accrus par la fécondation in vitro

Certains couples qui ne peuvent pas avoir d'enfant par le processus normal ont recours à la fécondation in vitro. On leur prélève ovules et spermatozoïdes qui sont mis en présence les uns des autres dans une éprouvette selon un protocole précis. Une fois la fécondation effectuée, l'œuf est réimplanté dans l'utérus de la mère où il continue son développement. Si les conditions d'environnement ont véritablement un impact sur l'expression du code génétique, alors **il est intéressant de se demander si les bébés qui sont créés en éprouvette se développent de la même façon que les autres**. Plusieurs équipes médicales se sont récemment penchées sur ce problème, soit par des observations suivies de ces enfants, soit par des expérimentations sur des souris.

Les chercheurs rapportent que **le pourcentage des enfants conçus en éprouvette qui souffrent de défauts congénitaux est deux fois plus grand que chez les enfants conçus naturellement**. Ces défauts incluent des anomalies musculaires, cardiovasculaires, des retards de croissance, des insuffisances du poids à la naissance, des syndromes Angelman. On a également observé que le syndrome de Beckwith-



Wiedemann (BWS) qui se manifeste par une croissance excessive et un surpoids, se produit 3 à 4 fois plus souvent que chez les bébés conçus naturellement.

Ces défauts ont été associés à des **altérations épigénétiques**. Pour avoir plus de précisions sur ces altérations, des observations ont été menées sur des *souris conçues in vitro* (Pr *Wolf Reik*), en particulier par la technique d'immunofluorescence. Elles ont montré que les modifications épigénétiques de certains gènes contrôlant la croissance de l'embryon retardait la production de certains types de protéines.

**Sources:** Les lecteurs intéressés pourront trouver les détails biologiques dans les publications des travaux de diverses équipes de recherche. Parmi bien d'autres, je cite: *What's wrong with assisted reproductive technologies?* Dr. Mae-Wan Ho, 2003, site ISIS; *IVF results in de novo DNA methylation and histone methylation at an Igf2-H19 imprinting epigenetic switch*, Li et coll, 2005; *Association of In Vitro Fertilization with Beckwith-Wiedemann Syndrome and Epigenetic Alterations of LIT1 and H19*, Debaun et coll, *The Amer. J. of Human Genetics*, 72, 1, 156-160; *Epigenetics and Assisted Reproductive Technology: A Call for Investigation*, EL Niemitz et coll; *In Vitro Fertilization May Increase the Risk of Beckwith-Wiedemann Syndrome*, C. Gicquel, *The Amer. J. of Human Genetics*, 72, 5, 1338-1341; *Stojanov et O'Neill*, *Biology of reproduction* 2001, 64, 696-705, Université de Sydney, Australie; Hansen et coll., 2002; Schieve et coll, 2002; Cox et coll, 2002; Maher et coll, 2003; Orstavik et coll, 2003; *Wolf Reik*, Babraham Institute, Cambridge, UK.

## La configuration épigénétique, un ensemble de commutateurs modifiables

Récapitulons. Le fonctionnement de notre corps est régi à la fois par le code génétique - un stock de gènes - et par la **configuration épigénétique** (on dit aussi **empreinte génomique**) - un ensemble de commutateurs qui activent ou désactivent ces gènes.

Le fonctionnement sain du corps avec tout son potentiel de vitalité et de développement est assuré par une **configuration optimale** de l'état des commutateurs pour un individu et à un moment donné. Je suggère qu'il n'y a pas qu'une seule configuration optimale valable pour tous et en tout temps, mais un ensemble de configurations adaptées à différents types d'environnements. Car le corps peut fonctionner pleinement dans différents types d'environnements. Dans ce cas, chacune des configurations représente une adaptation de l'organisme à son environnement.

Toutefois, lorsque cette adaptation se fait dans des environnements restrictifs qui n'assurent plus les besoins élémentaires de l'organisme, lorsque des expériences de vie traumatisantes n'ont pas permis au corps de s'épanouir dans tout son potentiel, elle devient un mécanisme de survie qui fonctionne au détriment de fonctions supérieures. Les configurations épigénétiques correspondantes diminuent les capacités du corps et entraînent des troubles de santé.

Le fait que l'environnement altère la configuration démontre à l'évidence qu'**une configuration n'est pas immuable**. Il faut insister sur cette caractéristique. Il suffit de changer des conditions de vie (alimentation, respiration, exercice physique, stress) pour qu'elle se dégrade. Mais alors, c'est également vrai dans l'autre sens. **Une configuration épigénétique qui n'assure pas une bonne santé peut être modifiée et améliorée par une bonne hygiène de vie**. Nous reviendrons sur cette possibilité plus loin dans cet article.

La nature des commutateurs a fait l'objet de nombreuses recherches. Ce sont des petites molécules qui viennent coiffer la tête du gène (*voir encadré page précédente*).

## Transmission héréditaire des altérations épigénétiques

Lorsqu'une configuration épigénétique s'est figée dans un état dégradé dans un organisme, la question qui se pose est de savoir si elle est transmise à la descendance, comme certaines observations ont pu le suggérer.

Puisque les altérations épigénétiques ne modifient pas les gènes eux-mêmes, les scientifiques croyaient qu'elles ne pouvaient pas être transmises à la descendance. Ils pensaient qu'au cours de la fécondation des cellules sexuelles du père et de la mère, l'ADN retrouvait une sorte d'état initial idéal sans altération épigénétique. Or les observations, les enquêtes et les expériences de plusieurs équipes de chercheurs, sur des populations humaines et des animaux, ont prouvé que **les configurations épigénétiques peuvent être transmises à la descendance**. Dans certaines circonstances, des états épigénétiques modifiés sont conservés dans le nouvel être. Autrement dit il y a une mémoire de la position des commutateurs, transmissible à la descendance. Il n'y pas de mécanisme de remise à zéro. D'ailleurs, il n'existe probablement pas d'état zéro unique initial.

## Abondance alimentaire et maladies en Suède

Au cours du 19<sup>e</sup> siècle, plusieurs famines ont eu lieu dans une petite commune du nord de la Suède, Överkalix, alternant avec des périodes d'abondance de nourriture, propices aux diabètes et aux maladies cardiovasculaires. Deux générations plus tard, certains individus souffrent de ces mêmes maladies alors qu'ils n'ont pas connu eux-mêmes l'alternance famine/abondance.

En fouillant dans les archives municipales, **Lars Olov Bygren** et ses collègues, chercheurs à l'université d'Umea en Suède, ont récolté des renseignements concernant les grands-pères et grands-mères de ces individus et ont réalisé une étude statistique sur 320 d'entre eux, nés en 1890, 1905 et 1920. Ils ont mis en évidence que **lorsque le grand-père avait bénéficié d'une surabondance de nourriture durant sa petite enfance, la mortalité des petits-fils par diabète était 4 fois plus élevée que la moyenne**. Par contre, si le grand-père avait connu la famine dans une autre période de sa vie, les descendants semblaient protégés des maladies cardiovasculaires et du diabète.

Comment une influence alimentaire sur le grand-père peut-elle être transmise au petit-fils? Après avoir examiné plusieurs hypothèses infructueuses, les chercheurs ont fait appel au professeur Marcus Pembrey, de l'University College de Londres, afin de suivre la piste d'une explication par l'épigénétique. La puberté pour un garçon est le moment où débute la spermatogenèse, c'est-à-dire la fabrication, dans les testicules, de ses cellules sexuelles, les spermatozoïdes. La spermatogenèse atteint son maximum vers 20-30 ans puis ralentit progressivement vers la quarantaine. Le phénomène de transmission observé pourrait s'expliquer parce que cette fabrication est sensible à l'environnement et à l'alimentation. Des **modifications épigénétiques pourraient être imprimées sur les cellules sexuelles** à ce moment-là.

C'est la première mise en évidence qu'une influence environnementale peut être transmise chez les humains.

Cette interprétation a fortement déplu à la communauté scientifique, imprégnée du concept dogmatique d'évolution tel qu'il a été forgé d'après les travaux de Darwin et qui

## Les molécules des commutateurs

Les commutateurs qui contrôlent l'activité des gènes sont de petites molécules qui se fixent sur certaines parties de l'ADN. Rappelons que la molécule d'ADN est constituée d'un enchainement de petites unités, et qu'elle peut prendre des formes variées à la manière d'un collier que l'on peut étirer, replier, enrouler, suspendre, etc. Certaines sections de la molécule d'ADN se recroquevillent autour de grosses protéines en forme de billes appelées **histones**, et cet amas est connu sous le nom de **chromatine**.

Les scientifiques ont découvert que l'ADN pouvait être modifié épigénétiquement en accrochant de petits groupes moléculaires sur deux parties différentes: soit sur **l'ADN** lui-même, soit sur les **histones** qui lui sont associées.

### Les coiffes de l'ADN

Dans le processus de méthylation de l'ADN, les enzymes (des protéines) présents à l'intérieur de la cellule déposent une petite molécule sur un gène en vue de le désactiver, à la manière d'une petite coiffe. Cette molécule est un **méthyle**, un groupement de 4 atomes (CH<sub>3</sub>- , 1 atome de carbone et 3 atomes d'hydrogène). Elle se fixe sur la cytosine des couples C-G de l'ADN . Cette modification a lieu dans les promoteurs (sorte d'en-têtes de lecture d'un gène). Elle rend illisible le gène qui se trouve en aval.

Les techniques d'analyse ont montré des différences notables en cartographiant la méthylation des résidus C-G. Les résultats concernant le chromosome 22 sont surprenants. Chaque type de cellule, hépatique, musculaire, sanguine, placentaire, épidermique, cardiaque, possède une signature spécifique avec des zones faiblement ou fortement méthylées. Ce qui ne surprend guère car pour qu'une cellule devienne fonctionnelle et différenciée, il faut bien que l'information génétique, voire épigénétique, soit exécutée et interprétée de manière spécifique. *Bernard Dugué, Le 21ème siècle sera-t-il épigénétique? Agoravox, 11/12/2008*

### Les coiffes des histones

Les histones peuvent aussi être méthylées. Dans ce cas, elles se ferment et sont enrobées par l'ADN, empêchant l'accès au gène et son expression. D'autres modifications chimiques comme l'acétylation, la méthylation, la phosphorylation, la polyADP-ribosylation, etc, sont possibles et étudiées.

Il existe une interdépendance entre la méthylation de l'ADN et celle des histones: il a été montré une interaction entre certaines protéines à activité de méthylation de l'ADN et un système de méthylation des histones. *Épigénétique, encyclopédie Wikipedia*

### Traitement des maladies épigénétiques

Alors qu'on imaginait récemment encore que les maladies étaient dues essentiellement à la génétique, il est maintenant clair que de nombreuses pathologies telles que certaines formes de cancer sont dues à des altérations épigénétiques, et cela change complètement les perspectives de traitement. Il est nettement plus facile de modifier la méthylation de l'ADN que de changer la séquence d'ADN sous-jacente.

rejette la **thèse de Lamarck sur la possibilité que des caractères acquis puissent être transmis à la descendance** (voir encadré ci-dessous et mon livre numérique [Une autre histoire de la Terre](#)). L'interprétation de Bygren et Pembrey redonnait une certaine crédibilité à Lamarck et c'était inacceptable. Aussi, pour être sûr que l'interprétation est correcte, il a fallu la vérifier par des expériences et des observations où les conditions du phénomène sont bien définies. Voici donc des résultats complémentaires.

Une nouvelle analyse des dossiers d'Överkalix par des chercheurs britanniques (dans le cadre du projet [ALSPAC](#)) a montré que l'approvisionnement alimentaire des **grands-pères paternels** au cours de l'enfance est en effet lié à un risque de décès chez les petits-fils, mais **pas chez les petites filles**. En revanche, l'état nutritionnel de la **grand-mère paternelle** n'a pas eu d'influence sur les petits-fils, alors qu'il avait affecté les petites filles.

La période sensible où la grand-mère inscrit son empreinte dans ses cellules sexuelles est avant sa naissance, dans l'état de **foetus**, au moment de la fabrication dans les ovaires de ses ovocytes, les cellules qui se transformeront en ovules par la suite.

Il devient donc clair que les expériences vécues au cours d'une période cruciale de la vie peuvent avoir une influence sur plus d'une génération et s'exprimer de façon différente et spécifique en fonction du sexe.

**Sources:** Lars Olov Bygren et coll., *European Journal of Human Genetics*, novembre 2002, 10, 682; rapporté dans *Inf'OGM*, bulletin 38, janvier 2003; commentaires d'Hervé Morin parus dans le journal *Le Monde*, 28 décembre 2002, [Une étude suédoise questionne le darwinisme](#); texte complet dans *RTFlash*. Dr. Mae-Wan Ho, [Hérédité épigénétique: De quoi les gènes se souviennent-ils?](#) *ISIS Report* 12/01/09.

### Jean-Baptiste Lamarck et l'hérédité des caractères acquis

L'épigénétique ressuscite l'idée que des caractères acquis par un individu au cours de sa vie peuvent être transmis à sa descendance. S'il est bien connu et accepté que le fœtus dans le ventre de la mère subit les effets de l'environnement, les scientifiques répugnent à accepter l'idée d'une transmission de caractères acquis par l'intermédiaire des spermatozoïdes du père. Elle rappelle trop les théories de Lamarck, qui ont été bannies, 50 ans plus tard, par les travaux de Darwin, pour lequel le moteur de l'évolution était la **sélection naturelle** due à la lutte pour l'existence. (voir les réfutations de cette théorie dans mon e-book [Une autre histoire de la Terre](#))

Naturaliste français, Jean Baptiste de Lamarck (1744-1829) est connu pour être l'auteur d'une théorie de l'évolution des espèces stipulant que les caractères acquis par une espèce au cours d'une génération, par suite de l'influence du milieu dans lequel elle vit, étaient transmissibles à la génération suivante.

**Voir:** [Hérédité épigénétique](#), Dr. Mae-Wan Ho; [Lamarck](#), Wikipedia

### Maladie de Beckwith-Wiedemann et maladie de Prader-Willi

Le même professeur **Marcus Pembrey** (University College de Londres) a étudié deux maladies humaines chez l'enfant, le syndrome de Beckwith-Wiedemann et le syndrome de Prader-Willi. Ils ont pour origine le même chromosome défectueux. Je rappelle que notre patrimoine génétique est constitué de 23 paires de chromosomes. Dans chaque paire, l'un est fourni par le spermatozoïde du père et l'autre par l'ovule de la mère (voir [Chapitre 1](#)). Aussi, le chromosome défectueux peut être soit celui qui vient du père, soit celui qui vient de la mère.

Or ce qui est curieux, c'est que le syndrome de Prader-Willi se développe si le chromosome défectueux provient du père alors que le syndrome de Beckwith-Wiedemann se développe si le chromosome défectueux provient de la mère. Pourtant, **génétiquement, ces deux chromosomes sont identiques. Ce qui est différent, ce sont leurs états épigénétiques**. L'un est la marque des conditions de vie alimentaires et émotionnelles du père, l'autre celle des conditions de vie de la mère.

Cette découverte est la preuve que **la configuration épigénétique du chromosome du père ou de celui de la mère a été gardée en mémoire même après la fécondation**.

**Référence:** Pr. Marcus Pembrey, *Les péchés des pères et de leurs pères*, *European Journal of Human Genetics*, 2006

### Des souris et des rats

Des effets similaires d'hérédité épigénétique ont été observés dans un grand nombre d'études chez des animaux.

Le même Pr [Wolf Reik](#) qui a mis en évidence les effets de la fécondation in vitro sur la configuration

épigénétique des souris (*voir plus haut*) est allé plus loin en examinant ce qui se passait dans leur descendance. Il a montré que **les régulateurs génétiques qui avaient été activés étaient également présents dans la 2<sup>e</sup> génération de souris**. Cela signifie que le souvenir d'un événement peut se transmettre de génération en génération. Les changements de la position des commutateurs sont transmissibles.

Une série d'études montre qu'une seule exposition des rats au stade de fœtus à un fongicide, la vincozoline, peut provoquer une série de maladies graves et des anomalies chez les adultes et que ces événements sont transmis aux trois générations suivantes.

**Références:** Dr. Mae-Wan Ho, *Hérédité épigénétique: De quoi les gènes se souviennent-ils?* ISIS Report 12/01/09.

## Transmission de l'état de stress

Chez le rat, 12 heures après la naissance, la négligence maternelle lors du toilettage de ses petits (léchage, nettoyage) engendre des ratons particulièrement anxieux en grandissant. Cette anxiété serait due à la baisse de production d'une protéine réceptrice aux glucocorticoïdes. Quel est le rôle de cette protéine? Exercer un frein sur une cascade de réactions induites par le stress. Le promoteur du gène codant la protéine en question subirait des changements épigénétiques dans les heures suivant la naissance des ratons... Les modifications épigénétiques étant par définition réversibles, les chercheurs ont démontré la réversibilité du processus chez le rat devenu adulte lors de l'activation du promoteur du gène par suppression de la méthylation de son ADN. (F. Lotstra, *Psychanalyse et neuroscience: la fin d'un schisme?* Revue Médicale de Bruxelles, 2007, 28, 91)

Les expériences sur les rats révèlent que ce ne sont pas seulement des maladies qui peuvent être transmises aux générations suivantes, mais aussi des comportements ou des états émotionnels de calme ou d'anxiété. Une autre série d'études montre qu'il en est de même chez les humains.

**Rachel Yehuda**, psychologue à l'école de médecine de Mount Sinai à New York, et le Dr Jonathan Seckl, résidant à Edinbourg en Écosse, se sont penchés sur le stress subi par des femmes enceintes se trouvant dans ou à proximité du World Trade Center à New York au moment de leur effondrement provoqué le 11 septembre 2001. Ils ont mesuré le taux de cortisol, indice du niveau de stress (appelé par les scientifiques État de Stress Post-Traumatique ou PTSD). Chez l'enfant un fois né, ils ont trouvé un taux de cortisol plus élevé, prouvant que l'état de stress était transmis à l'enfant.

Toutefois, dans ce cas, on peut aussi suggérer que les enfants ont été imprégnés directement par le stress en tant que fœtus. Or, R. Yehuda a également étudié des personnes qui ont survécu aux camps de concentration lors de l'holocauste, et leurs enfants nés bien après. Elle a découvert que la fréquence des PTSD chez ces enfants est beaucoup plus importante (trois fois plus) que dans la population générale. Or ces enfants, aujourd'hui adultes, n'ont pas connu les camps en dehors de ce qu'on leur en a dit. Ils n'ont pas été plus exposés à des événements traumatiques que la population normale. Est-ce dû au fait que les traumatismes ont été évoqués devant eux par leurs parents? Si cela est en partie vrai, cela ne peut expliquer tous les cas. Car même des bébés de moins d'un an, à qui on n'a pas encore parlé des événements, présentent ce taux élevé de cortisol.

**L'état de stress chez ces personnes est donc directement lié au traumatisme psychique antérieur chez leurs parents. Elle a été transmise en l'absence de tout événement traumatique chez les enfants par des voies épigénétiques.**

**Sources:** *Les mémoires traumatiques de Rachel Yéhuda*, Renaud de Beaurepaire, Revue Dépression, 10, 1998, Psydoc-France; *Caring Mothers Reduce Response to Stress for Life*; *Caring Mothers Strike Fatal Flow against Genetic Determinism*; *Epigenetic Toxicology*

## L'ADN changeant et modulable: les transpositions

À ce stade de notre étude, notre image de l'ADN est un assemblage linéaire de gènes et de zones non codantes, avec des gènes qui peuvent être allumés ou non. Toutefois, nous imaginons habituellement que cet assemblage est aussi fixe qu'une charpente, ou plutôt qu'une chaîne de maillons métalliques si bien accrochés les uns aux autres qu'ils ne peuvent pas se détacher et migrer. Or c'est pourtant le cas. Au cours



des processus de croissance et de renouvellement des cellules, **des fragments d'ADN peuvent changer de place, l'ADN peut se recomposer, le code génétique peut subir des modifications.**

Dans le processus de **transposition**, un fragment d'ADN appelé **transposon** se détache ou se recopie, puis va se replacer dans un autre endroit du génome. Cela crée des réarrangements ou **recombinaisons** chromosomiques. Le nouvel endroit du génome se situe dans une partie codante **ou non codante**, sur le même brin d'ADN ou sur un autre. Le transposon est aussi nommé élément mobile ou élément transposable; également gène sauteur ou gène mobile, s'il est un gène.

Les premiers transposons ont été découverts dans les années 40 dans le maïs par **Barbara McClintock** (1902 - 1992) aux États-Unis. Elle tentait de comprendre pourquoi certains grains du maïs avaient la couleur violette, tandis que les autres étaient blancs ou jaunes. Elle a compris que l'ADN de tous les grains possédait un gène responsable de la couleur violette, ordinairement rendu inactif par un autre fragment d'ADN placé à côté de lui, un inhibiteur.



Barbara McClintock en 1947  
Merci à Wikipedia

Dans les grains de couleur violette, **le gène redevient actif parce que l'inhibiteur a changé de place par transposition et n'agit plus.** Plus tard, B. McClintock a émis l'hypothèse que la transposition était un moyen rapide de réorganiser les gènes en réponse à un stress environnemental. Pour ces découvertes, elle a reçu le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1983.

Un peu plus tard Roy Britten et Eric Davidson (1969) ont suggéré que l'existence de transposons pouvaient expliquer pourquoi les cellules d'un organisme, qui détiennent exactement le même génome, se développent pourtant de façon différenciée selon leur fonction: cellules nerveuses, cellules du foie, du muscle, etc. Le transposon pourrait déclencher le signal selon l'endroit où il se localise dans l'ADN (non-codant pour des protéines).

**Une partie importante de l'ADN est composée d'éléments transposables.** Chez l'homme, ils constituent plus de 45 % du **génome**. Lorsqu'on sait que les gènes ne constituent environ que 5% du génome, cela signifie que **la plupart des transposons sont localisés dans les parties non-codantes, en-dehors des gènes.**

Toutefois, une partie de ces éléments sont localisés dans des parties codantes, ou s'y insèrent par transposition, ce qui **modifie le code génétique** et la fabrication de certaines protéines.

La modification des **parties non-codantes** n'est pas sans conséquence. Jusqu'à une époque récente, on pensait que ces parties étaient inutiles (!!!). On commence seulement à comprendre que même si elles ne portent pas de code pour les protéines, elles ont d'autres fonctions indispensables (*voir chapitre suivant: Architecture de l'ADN*).

## Prenons soin de notre ADN

Puisque l'expression de notre code génétique dépend de la façon dont nous vivons, cela change complètement notre rapport avec l'ADN. Il n'est plus suffisant de nous dire que tout est joué d'avance et qu'il n'y a plus qu'à subir notre destinée, y compris les maladies. **Nous sommes responsables de la bonne utilisation de notre ADN.** C'est en nous nourrissant correctement, en respirant largement, en apprenant à être décontracté, bref en sachant utiliser à bon escient tous les facteurs de santé (*voir article Santé naturelle*) que **nous pouvons nous constituer un épigénome favorable à notre santé et notre épanouissement.**

Dans ces facteurs de santé, il faut inclure notre façon de penser. Nos stress sont directement liés à la façon dont nous appréhendons la vie. Nos peurs, angoisses, inhibitions sont créées par les pensées que nous avons vis à vis des événements que nous vivons. **Nos pensées agissent donc sur notre ADN.** Nous pouvons apprendre à diriger nos pensées pour créer la confiance en nous-mêmes et en la vie, et retrouver notre plein potentiel de créativité et d'action (*voir article Ma vie, reflet de ma pensée*).

**Notre responsabilité s'étend également à la santé de nos enfants et de nos petits-enfants** puisque la qualité de notre épigénome est susceptible de leur être transmise. Cela est surtout important avant la conception de l'enfant et pendant sa vie intra-utérine. Ceux qui s'intéressent aux moyens naturels

de santé et à la préparation naturelle à la naissance ne seront pas étonnés (voir article [Préparation naturelle à la naissance](#)). Mais il est intéressant de noter que la science valide cette influence et en précise le processus au niveau moléculaire.

La recherche révèle que les parents ont un rôle d'ingénieurs génétiques pour leurs enfants pendant les mois précédents la conception. Dans les derniers stades de maturation de l'ovule et du sperme, un processus appelé "imprégnation génomique" ajuste l'activité de groupes spécifiques de gènes, qui vont façonner le caractère de l'enfant non encore conçu (Surani 2001, Reik 2001).

La recherche suggère que **ce qui se passe dans les vies menées par les parents pendant le processus d'imprégnation génomique a une profonde influence sur le corps et l'esprit de l'enfant**. Cela fait une différence d'être conçu dans l'amour, l'urgence ou la haine, et que la mère désire être enceinte... Les parents fonctionnent mieux lorsqu'ils sont dans un environnement calme et stable, libre de dépendances, et qu'ils sont soutenus par leur famille et leurs amis. (Bruce Lipton, *Nexus magazine*, 2006, 44, 47)

La qualité de notre vie intra-utérine, dans ce domicile provisoire, préalable à notre naissance, programme notre vulnérabilité aux maladies cardiovasculaires, aux infarctus, au diabète, à l'obésité et à une multitude d'autres conditions ultérieures. Il existe de plus en plus d'éléments prouvant que **la programmation de notre santé sur le long terme, par les conditions de notre vie intra-utérine, est tout aussi, voire plus importante que l'influence de nos gènes**, et que cette vie intra-utérine est déterminante pour notre comportement ultérieur, aussi bien psychologiquement que physiquement, et ceci tout au long de notre vie. Une myopie du gène, c'est ainsi qu'on pourrait au mieux décrire le point de vue actuellement le plus répandu, selon lequel notre santé et notre destinée ne seraient déterminées que par nos gènes... Par contraste avec le fatalisme relatif d'une telle myopie, pouvoir comprendre les mécanismes d'une telle programmation - liée à la qualité de notre vie intra-utérine - nous permet d'améliorer le départ que nos enfants prendront dans la vie. (Dr Peter W. Nathanielsz, *Vie intra-utérine: les origines de la santé et de la maladie*, 1999, cité dans *Nexus magazine*, 44, 39)

## Chainons mobiles et liens chimiques

Les chainons de l'ADN sont constitués par des groupements d'atomes (les bases azotées), reliés par des **liens chimiques**. La chimie décrit les liens entre molécules et atomes par l'énergie qu'il faut pour les séparer (**énergie de dissociation**). Ces énergies ont des valeurs diverses selon la nature du lien. Certaines sont très faibles, d'autres beaucoup plus fortes, mais, sauf cas exceptionnels, on peut toujours exercer une force suffisante pour dissocier le lien dans certaines conditions.

Par exemple, les liens qui maintiennent les deux brins de l'ADN parallèles se relâchent facilement au cours du cycle de croissance de la cellule, pour permettre à l'ADN de se dupliquer. On peut aussi obtenir artificiellement cette séparation des deux brins en chauffant (ce que les biologistes nomment une dénaturation). De la même façon, les liens entre bases peuvent se dissocier dans le cas de la transposition, et de nouveaux liens peuvent se reconstruire avec d'autres atomes ou groupements d'atomes.

**Ces attirances et ces ruptures de liens entre atomes sont semblables aux relations entre personnes**. Imaginons des personnes qui se tiennent la main. En se serrant les unes contre les autres, elles forment un groupe bien solidaire. Mais dans certaines circonstances, elles peuvent desserrer ou lâcher leurs mains. Imaginons que la température s'élève anormalement et qu'elles aient trop chaud. Elles ont besoin de se desserrer en écartant les bras, tout en gardant leurs mains en contact. Imaginons encore qu'elles sont dans l'eau, en bord de mer, heureuses. Soudain, des vagues plus fortes arrivent, et les personnes doivent se lâcher pour nager séparément. Elles peuvent également attraper les mains d'une autre personne. Transcrites dans le cas de l'ADN, les vagues représentent une modification de l'environnement chimique qui induit une dissociation des liens.

Quelle est au juste la nature de la force des **liaisons chimiques**? C'est une **attirance électrique entre atomes**, qui dépend de la nature des atomes et de leur éloignement. Fondamentalement, atomes et molécules sont constitués d'électricité sous forme d'électrons et de protons, et cette électricité est mouvante et interagissante (voir [quatrième chapitre: l'ADN électrique](#)).

## Un regard élargi sur l'ADN

L'épigénétique est maintenant relativement bien connue et acceptée chez les scientifiques, et pas seulement par les pionniers. Mais curieusement, la presse et les médias en parlent très peu (avec cette magnifique exception sur Arte, *Un fantôme dans nos gènes*, février 2007). Même les généreux sites-web éducatifs sur l'ADN et l'hérédité se limitent à la pensée dominante du code génétique et de son déterminisme, tels qu'ils ont été exposés dans le premier chapitre *L'ADN et le code génétique*.

Une des intentions de cet ouvrage est donc également de participer modestement à la diffusion de cette connaissance. C'est pourquoi j'ai développé la démonstration et les preuves un peu plus que le demanderait une simple compréhension pédagogique. Toutefois, l'intention principale de cet ouvrage reste un effort éducatif, non une synthèse scientifique. Je ne prétends pas délivrer une nouvelle vérité, car les données rapportées sont évolutives et sujettes à révision. Je me contente de **donner des éléments de réflexion**, d'ouvrir des brèches dans les barrières rigides de l'esprit, de le rendre plus disponible à l'inattendu.

Avec ses nouvelles facettes (états épigénétiques, gènes mobiles), l'ADN apparaît bien plus fluide, bien plus vivant, plus "inventif" que ce qu'on imaginait avant. Mais ce n'est pas tout. D'autres facettes vont accentuer cet aspect et élargir encore plus notre regard (la structure des parties non codantes, la nature électrique et électromagnétique de l'ADN). Elles sont abordées dans les chapitres suivants.

# 3. Architecture et structure de l'ADN

## -Les 98,7% d'ADN "non-codants" ont un rôle fonctionnel-

Si tous ces ARN qui ne codent pas pour des protéines sont fonctionnels, comme les faits le suggèrent de façon croissante, alors une grande partie et peut-être la presque totalité du génome humain est fonctionnel.

Si oui, la programmation génétique des organismes supérieurs a été mal comprise pendant les 50 dernières années, à cause de la supposition [...] que l'information génétique est transmise par les protéines. (J. Mattick, 2007)

**Résumé:** Les parties codantes des gènes de l'ADN, qui détiennent les codes de fabrication des protéines qui régulent notre corps, n'occupent que 1,3% environ de la totalité de l'ADN. Les zones non-codantes dans et entre les gènes intriguent les scientifiques par leur présence énigmatique. Ayant abandonné l'idée que ces zones sont inutiles, ils commencent à mettre en évidence leurs fonctions possibles. Ces zones ont des rôles de régulation et de contrôle. Les zones intergènes comportent des séquences caractéristiques pour chaque individu, au point qu'elles ont été retenues par la législation comme base de l'empreinte génétique. Il existe donc une architecture significative dans l'ADN. Par des méthodes d'analyse statistique, des mathématiciens ont mis en évidence un ordre fractal qui varie selon le type d'ADN.

Dans le premier chapitre de cet ouvrage, nous avons fait connaissance avec la molécule d'ADN au sein des noyaux des cellules, et nous avons découvert que certains fragments de cette molécule appelés gènes portent des instructions pour le fonctionnement et le développement physique du corps. L'ensemble de ces instructions est appelé le code génétique. Il contrôle la fabrication des protéines, grosses molécules qui sont les ouvrières du fonctionnement et de la croissance du corps. Mais nous avons remarqué que les gènes humains n'occupent que 10% de la molécule d'ADN. Pourquoi alors la présence des autres 90%? Quelle est leur fonction? Dans cette troisième partie, nous allons mettre en évidence que la chaîne est structurée par une sorte d'architecture, aussi bien dans les gènes qu'en-dehors d'eux et que cette architecture est le signe d'une fonctionnalité.

Comme indiqué dans le premier chapitre, nos cellules renferment dans leur noyau 23 paires de chromosomes, qui sont chacun constitués d'un filament d'ADN, décoré d'autres éléments tels que les grosses protéines appelées histones. Un filament ou molécule d'ADN est formé de l'enroulement en hélice de 2 brins qui se font face. La totalité des filaments d'ADN de l'ensemble des chromosomes s'appelle le génome.

Chaque brin d'ADN est constitué de l'enchaînement en grand nombre de nucléotides. Un nucléotide désigne l'assemblage d'une base azotée, du "pentagone" sur lequel elle est fixée (voir figure 1) qui représente le désoxyribose, et du groupement phosphate de la chaîne centrale. Les bases azotées sont prises parmi 4 types qu'on représente par les lettres C (cytosine), A (adénine), T (thymine), G (guanine). Les deux brins du filament sont associés chimiquement par les bases face à face. Celles-ci se révèlent être complémentaires l'une de l'autre, car la base C s'associe à G et la base A s'associe à T.

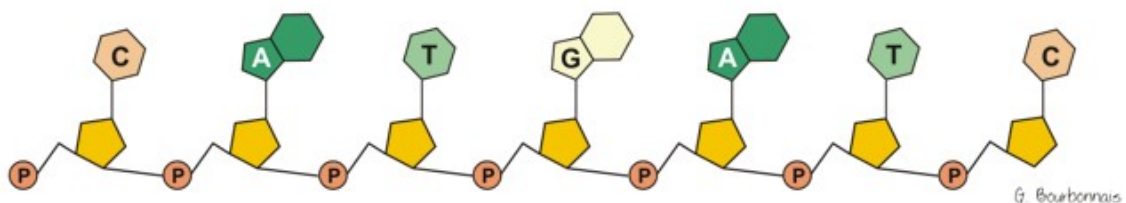


Fig.1- Schéma d'un brin d'ADN. Il est composé d'une chaîne centrale, faite de l'assemblage linéaire de motifs identiques (les pentagones oranges représentant le désoxyribose, articulés par le groupement phosphate P), sur laquelle sont fixés des groupements C, A, T et G

Merci à G. Bourbonnais



Si l'on considère les 2 brins assemblés, la molécule d'ADN est constituée d'un enchainement de **paires de bases**. Si donc on décrit l'enchainement des bases de l'un des brins, il est inutile de préciser l'autre, car il s'en déduit par complémentarité. On a donc coutume d'évaluer la longueur d'un segment d'ADN en nombre de paires de bases (ou bp).

## Les zones qui portent le code génétique et les autres

Lorsque nous observons la molécule d'ADN et l'enchainement des nucléotides, aucune structure particulière ne se distingue. Par exemple, on ne constate aucune discontinuité dans la succession des nucléotides, qui pourrait mettre en évidence le début d'un gène. Celui-ci est seulement signalé par un code qu'il est nécessaire de connaître pour pouvoir le repérer. Les bases se suivent dans un ordre qui peut sembler aléatoire, mais un comptage plus fin employant des méthodes statistiques se révélera instructeur.

### Gènes

C'est seulement par leur rôle génétique que les gènes se distinguent dans la molécule, non par leur aspect. En effet, un **gène** est une portion du filament d'ADN qui commande la production d'une **protéine** déterminée, protéine qui joue un rôle indispensable au fonctionnement et à la croissance des cellules. On dit que le gène code pour la protéine.

**Le code d'un gène pour la fabrication d'une protéine est donné par l'ordre de succession de ses nucléotides.** Sachant qu'une protéine est faite de l'enchainement d'acides aminés, le code commande la fabrication successive de chacun des acides aminés. Le code pour un acide aminé est fait d'un groupe de 3 nucléotides successifs (un **codon**).

### Zones intergènes

Si l'on comptabilise la totalité des gènes reconnus dans les chromosomes, ils n'occupent qu'une faible partie de l'ADN, environ 10% du génome chez l'homme (l'estimation varie selon les chercheurs). Entre les gènes, se trouvent de longues **zones non-codantes**, ce qui signifie qu'on ne leur a pas trouvé de fonction de fabrication d'une protéine. On les appelle **zones intergènes** ou encore **séquences espaceurs**. Elles représentent la plus grande partie du génome (environ 90 % chez l'homme).

### Introns

Mais ce n'est pas tout. À l'intérieur d'un gène, il existe aussi des zones non-codantes. Si l'on repère les suites de codons, il y a ceux qui codent pour les acides aminés, éléments de la protéine. Il y en a aussi quelques-uns qui codent pour des contrôles: par exemple, un codon en tête pour repérer le début de fabrication et un autre en fin pour en marquer l'arrêt. Il y en a quelques autres. Mais tous ces codons n'occupent qu'une faible partie du gène.

Insérés entre les codons, d'autres fragments d'ADN ne codent pas pour des acides aminés. On les nomme des **introns**.

### Zones non-codantes

Nous avons repéré des régions non-codantes à l'intérieur des gènes (les introns) et de bien plus grandes entre les gènes (les espaceurs). Au total, elles représentent **98,7% de régions non-codantes**. Il reste donc seulement une faible proportion de régions codantes dans un filament d'ADN, 1,3% environ. C'est très intrigant. Pourquoi la nature a-t-elle conçu ces régions non-codantes?

D'ailleurs sont-elles réellement non-codantes? Même si elles ne codent pas la production d'acides aminés, il est possible qu'elles portent des codes qui contrôlent d'autres fonctions. Le mot **code** a un sens très général et très profond, beaucoup plus étendu que le simple fait de coder pour une protéine (*voir article [Code, information et mémoire](#)*). Lorsque nous employons un mot, il est important de sentir qu'il peut enfermer notre pensée dans une habitude.

Depuis quelques années, les scientifiques entrevoient des **fonctions possibles des zones "non-codantes"**. Les termes de ADN déchet, ADN poubelle, ou junk DNA, encore employés il y a quelques années, ont été abandonnés par la communauté scientifique au profit de séquences non-codantes pour des protéines. Puis-je proposer le terme non-protéinocodantes ou npc? Prenons connaissance de ces nouvelles pistes de réflexion.

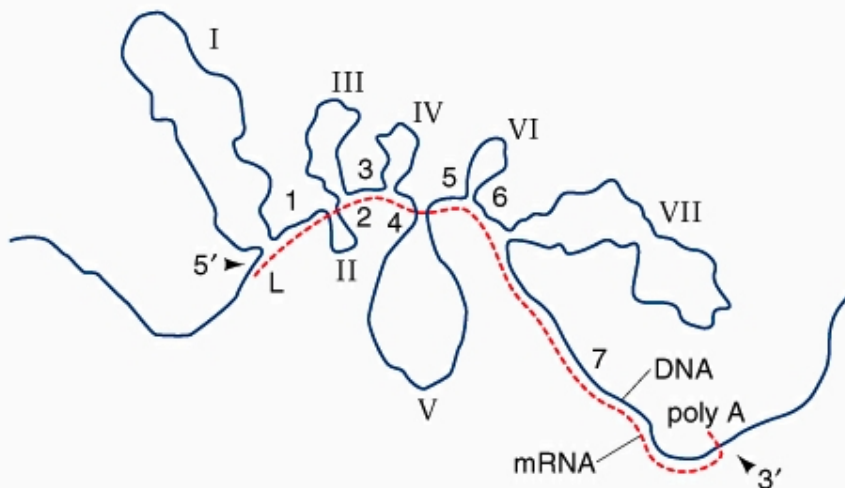
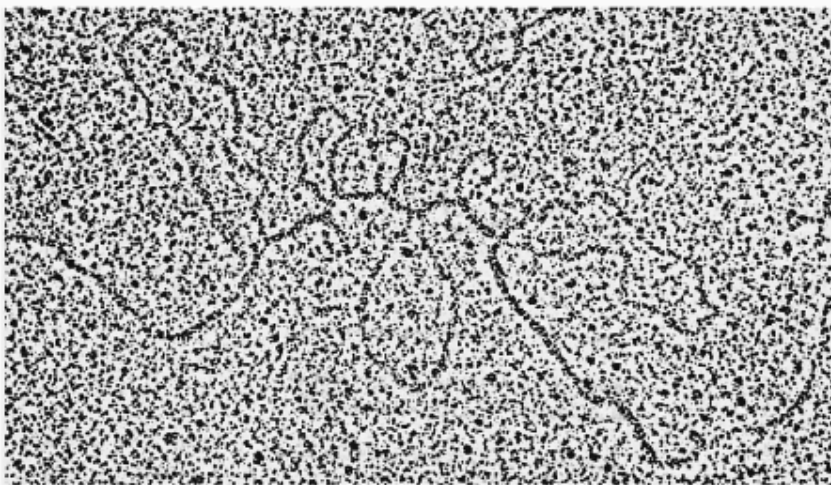
## Les introns: des zones sans code génétique incluses dans les gènes

Les séquences de nucléotides dans les gènes ont tout d'abord été observées et analysées sur des bactéries, organismes composés d'une seule cellule, sans noyau (**procaryotes** - ce qui signifie en gros: "pas encore de noyau, mais ça viendra"). Ce sont ces observations qui ont conduit à démontrer que chaque groupe de 3, le codon, contrôle la fabrication d'un acide aminé, et que l'enchaînement des acides aminés de la protéine est calqué sur l'enchaînement des codons du gène.

Or lorsqu'on s'est penché sur des organismes plus élaborés tel que l'être humain, dont les cellules comportent un noyau (organismes appelés **eucaryotes** - ce qui signifie: "avec un vrai noyau"), il est apparu que seules certaines parties du gène sont des séquences codantes. **Le gène est constitué d'une suite alternée de séquences codantes (les exons) et de séquences non codantes (les introns).**

### Élimination des introns dans la molécule ARN messagère

Comment sait-on que les introns ne sont pas impliqués dans le codage des acides aminés? En suivant le procédé par lequel une protéine est élaborée à partir du gène.



From Chambon, P., *Sci. Am.* 244(5), 61 (1981).  
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

*Fig.2. En haut, le gène d'ovalbumine (protéine du blanc d'œuf) vu en microscopie électronique. En bas, sa représentation schématique: En bleu, l'ADN du gène tel qu'il est vu en microscopie électronique. En rouge, l'ARN messager (mRNA) après excision des introns. Les boucles I à VII sont des introns. Les fragment L, et 1 à 7 sont les exons. L est le début de lecture du gène.*

Tout d'abord, **le gène est transcrit en une copie moléculaire**, à la façon d'une empreinte complémentaire. La molécule de cette empreinte est de l'ARN (**Acide RiboNucléique**). Elle diffère de l'ADN, d'une part par une légère différence chimique dans le pentagone de la chaîne centrale (fig.1) qui est ici un ribose au lieu d'un désoxyribose (d'où le **R** d'ARN au lieu du **D** d'ADN), et d'autre part par le remplacement de la thymine (**T**) par l'uracyle (**U**).

Observer cette empreinte en ARN est un moyen de repérer le gène, ses extrémités et sa longueur. L'empreinte ARN (appelée **pré-ARN**) est élaborée à partir du gène par complémentarité des bases, elle est moulée dessus. Elle a donc exactement la longueur du gène. La base **C** du gène est reproduite en **G** et la base **A** est reproduite en **U**, et ainsi de suite. Ainsi le codon CGA de l'ADN qui code pour l'alanine est reproduit en GCU dans l'ARN. Dans une deuxième étape, le pré-ARN est remanié. **Des fragments d'ARN sont découpés et éliminés** (excision), puis les extrémités des fragments restants sont ressoudées. Ce mécanisme est nommé **épissage**.

L'ARN restant qui en résulte est envoyé en mission hors du noyau, dans l'usine de production de la cellule (les **ribosomes**) où il est décodé en acides aminés pour produire la protéine. On le nomme **ARN messager**.

C'est le modèle classique en vigueur depuis les années 1950, dans lequel les instructions circulent dans un seul sens, de l'ADN vers la protéine. Ce modèle a été nommé **dogme central de la génétique moléculaire** par Francis Crick lui-même, le découvreur de la structure en double hélice, dans un article publié en 1958 par le journal *Nature*.

Les parties du pré-ARN éliminées au cours de l'épissage ne servent donc pas au codage de la protéine. Par définition, **les introns sont les parties du gène qui sont éliminées lors de la formation de l'ARN messager** (nommés ainsi par le biologiste américain *Walter Gilbert* en 1978).

En définitive, bien qu'il forme un ensemble compact avec deux extrémités, **un gène est morcelé**: des séquences qui sont traduites en protéines sont incorporées dans une matrice de régions silencieuses.

## Nombres et longueurs des introns

En examinant des organismes variés, des plus simples comme les bactéries, jusqu'aux plus élaborés comme l'être humain, les chercheurs se sont aperçus que les mêmes protéines avaient des rôles semblables d'un organisme à l'autre. De plus une même protéine est codée par un même ARN messager, qui est issu de gènes analogues dans l'ADN de chacun des organismes.

Mais alors que les gènes analogues comportent les mêmes exons, leur teneur en introns est différente. **Plus les organismes sont élaborés et plus leurs gènes contiennent d'introns**. Par exemple, un gène analogue peut contenir 0 intron dans une levure, et 5 à 50 chez l'homme.

Prenons l'exemple du gène de l'ovalbumine chez la poule. Il contient 8 exons, séparés par 7 introns (voir fig.2). La longueur totale du gène est d'environ 7700 paires de bases, réparties en seulement 1870 environ dans les exons et 5830, soit **75%, pour les introns. La longueur totale des introns est donc environ 3 fois celle des exons**.

Les introns constituent souvent une partie importante du gène. Ce ne sont pas seulement quelques petits "blancs".

La **longueur** d'un intron est typiquement de 65 à 20'000 nucléotides. Elle descend à 31 dans un des gènes du virus SV40. Le gène humain de la dystrophine qui a une longueur de 2,5 millions de nucléotides, est composé de seulement 11000 nucléotides environ pour les exons, et de plus de 75 introns dont le plus long a 210'000 nucléotides. Cela fait **0,5% d'exons et 99,5% d'introns**.

**Les gènes humains sont composés en majorité d'introns**. Au total les zones non-codantes de l'être humain couvrent environ 90% de l'ADN en zones intergènes, + environ 90% des gènes, le total étant estimé à **98,7%** de zones non-codantes.

**Sources:** *Pierre Chambon, les gènes en mosaïque. Des gènes aux protéines; dossier Pour la Science*, éd. E. Belin, 1987. *Jerry Bergman, The Functions of Introns: From Junk DNA to Designed DNA*

## À quoi servent les introns?

Puisque les introns sont éliminés au cours du processus d'épissage du pré-ARN, pourquoi existent-ils? Ont-ils une fonction?

Certains chercheurs, n'entrevoyant aucun rôle apparent aux introns, en sont restés à cette apparence. Ils ont émis l'idée que ces introns ne servent à rien. En 1972, S. Ohno a qualifié les zones non codantes d'**ADN rebut ou superflu** (*So Much ? Junk DNA in our Genome*). Pour justifier leur présence, ils ont imaginé que c'étaient des résidus d'ADN de nos ancêtres qui se sont incorporés dans le génome à une lointaine époque. Ils y vivent par eux-mêmes, pour eux-mêmes, comme un parasite inoffensif. Ces chercheurs l'ont donc qualifié d'**ADN égoïste** (suivant Richard Dawkins). Mais si c'était le cas, répondent d'autres, les exons qui sont séparés par ces introns colonisateurs du gène devraient correspondre à des sous-structures de la protéine codée par ce gène. Or c'est rarement le cas.

Quand les introns ont été découverts il y a 30 ans, on a immédiatement et universellement supposé que ce vaste amoncellement de séquences non-codantes pour des protéines insérées dans les gènes était non-fonctionnel, en dépit du fait qu'elles sont transcrites. Leur présence a été rationalisée en tant que restes d'une évolution ancienne des gènes. En même temps, la découverte qu'une part importante du génome des mammifères (45% chez les humains) dérive des transposons qui sont censés être principalement des nomades parasites, a conduit au concept d'ADN égoïste. Cela a renforcé la vue

conventionnelle dominante que les génomes des eucaryotes complexes est largement constitué de débris évolutifs accumulés. (J. Mattick, 2007)

Pourtant, il est bien connu que **certaines séquences d'un gène ont une fonction autre que celle de coder pour un acide aminé**. Par exemple, la **séquence de tête d'un gène** est faite de quelques dizaines de nucléotides décomposés en deux codes: une zone activatrice ou inhibitrice de la transcription en ARN, et un promoteur qui indique le début de la transcription. On dit que c'est le début du **cadre de lecture**. Quant à la **séquence de fin**, c'est un codon (3 nucléotides) qui dit "stoppez la lecture". Ce sont des exemples qui montrent que des séquences peuvent ne pas coder pour un acide aminé et avoir cependant des rôles d'instructeurs.

Des zones de régulation ont été mises en évidence dès les années 1960 par les biologistes français **François Jacob** (né en 1920) et **Jacques Monod** (1910 - 1976). Ils ont montré que certains gènes des bactéries, appelés **opérons**, ne codent pas des protéines, mais déclenchent l'activation de la fabrication de l'enzyme de digestion du lactose normalement inactif, lorsque l'environnement nutritif est anormal (*voir chapitre précédent*). Le modèle de régulation par l'opéron démontre clairement qu'il existe une information rétroactive vers l'ADN, là où se trouve le code d'activation et d'inhibition.

Depuis quelques années, et surtout depuis que le programme **Génome humain** a livré ses conclusions en 2004, les chercheurs découvrent, non seulement de nouvelles fonctions des introns, mais aussi la part que jouent les ARN dans leur fonctionnement. Ils ont été amenés à repenser leur vision des gènes et des introns.

Ne pas avoir reconnu l'importance des introns pourrait bien se révéler comme la plus grande erreur de l'histoire de la biologie moléculaire. (J. Mattick dans *The Gems of "Junk" DNA*, 2003)

Examinons cela.

**Sources:** J. Mattick, *The Human Genome: RNA Machine* - *The Scientist*, 2007, 21, 10, 61

A. Stoltzfus, D. Spencer, M. Zuker, J. Logsdon, Jr. W. Doolittle, *Testing the Exon Theory of Genes: The Evidence from Protein Structure*, *Science*, 1994, 265, 202

Jacob F, Perrin D, Sánchez C, Monod J, Edelstein S. *The operon: a group of genes with expression coordinated by an operator*. *C.R.Acad. Sci. Paris*, 1960, 250

## À la fois intron et exon - l'épissage alternatif

La définition d'un intron a dû être élargie et relativisée avec la découverte d'un autre phénomène. La définition usuelle d'un intron provient de l'observation de son élimination dans le processus de transcription. Or de cette observation, on peut seulement déduire que l'intron n'est pas employé à ce moment, et non qu'il ne sert à rien en permanence. Dans une usine, le chauffeur de camion est inoccupé tant que la fabrication des produits à livrer n'est pas terminée. Observer son inactivité à ce moment ne signifie pas qu'il n'a aucune fonction à un autre moment. De même un intron qui ne joue pas de rôle dans la production d'une protéine, peut en jouer un dans d'autres circonstances.

C'est le cas lorsque le gène se met à coder pour une autre protéine. Contrairement à ce que l'on croyait, on s'est aperçu que les gènes pouvaient coder la fabrication de plusieurs protéines, en induisant la transcription de plusieurs ARN messagers. Au départ, l'ARN transcrit est l'empreinte fidèle du gène (le pré-ARN), mais ensuite, selon le choix des segments qui sont éliminés par excision lors de l'épissage, il peut donner divers ARN messagers. Un certain épissage conduit à un type d'ARN et à la protéine correspondante, et d'autres épissages conduisent à d'autres protéines. On appelle cela l'**épissage alternatif**.

Or si un intron est éliminé au cours de la synthèse de la protéine 1, mais pas au cours de celle des protéines 2 ou 3, cela signifie qu'il est un exon pour les protéines 2 ou 3. **Un intron n'est pas un intron en soi, mais seulement en rapport avec la production d'une protéine donnée**. De même que l'ouvrier inoccupé est aussi chauffeur, l'intron peut se retrouver un exon.

**Grâce à l'épissage alternatif, un gène peut coder pour plusieurs protéines**. Aujourd'hui, il est admis que près de 60% des gènes chez l'être humain subissent l'épissage alternatif. Selon les biologistes, la croissance et le fonctionnement du corps sont régis par un nombre considérable de protéines, elles-mêmes induites par les gènes. Comment le génome humain, qui ne contient que 25'000 gènes environ, peut-il gérer toutes ces fonctions? Peut-être parce que le phénomène de l'épissage alternatif permet de fabriquer bien plus de protéines.



Reste à savoir comment le gène reçoit le signal de fabriquer la protéine 1 ou la protéine 2. Les fonctions de contrôle, de sélection et de régulation apparaissent comme fondamentales. **L'importance des introns** comme sources de régulation est maintenant reconnue et de nombreuses recherches sont effectuées.

En réalité, cette recherche sur les fonctions de régulation incluent **toutes les zones non-codantes**, introns et régions intergènes. Aussi, faisons d'abord connaissance avec les zones intergènes.

## Des séquences répétées dans l'ADN non-codant

Nous portons notre attention sur **l'enchaînement des bases le long d'un brin d'ADN dans son entier**. Rappelons que les deux brins de la molécule d'ADN étant complémentaires, la séquence de l'un se déduit de l'autre et qu'il suffit d'en décrire un seul.

Nous remarquons que de nombreuses sections du brin d'ADN sont constituées de la **répétition de séquences plus ou moins longues**. Par exemple:

TTCCTTCCTCCCTTCCTTCCTTCCTTTCTTTCTTCCTTCC

On les trouve dans les génomes des **eucaryotes** (cellules avec noyau comme chez les animaux et les êtres humains) et aussi quelquefois dans les **procaryotes** (cellules sans noyau comme chez les bactéries). **Ces sections sont situées dans les parties non-codantes, essentiellement dans les zones intergènes. Mais on en trouve également dans les introns des gènes.**

Ces zones à répétitions présentent des structures variées. Les chercheurs les ont **classées** en catégories dont les plus étudiées sont celles nommées curieusement **satellites** [Ordinairement, le mot "satellite" a le sens d'objet qui accompagne un autre objet principal]. Ils distinguent les **microsatellites** et les **minisatellites**.

Les **satellites** sont constitués d'un **motif** qui se répète en **tandem**, ce qui signifie par juxtaposition, en tête à queue. La longueur de ce motif peut aller de 1 nucléotide à une centaine. La répétition est plus ou moins stricte, c'est-à-dire que **le motif comporte quelques variantes**, comme dans l'exemple ci-dessus que je réécris avec des blancs pour séparer les motifs et les rendre plus lisibles.

TTCC TTCC TCCC TTCC TTCC TTCC TTCC TTTC TTTC TTCC TTCC

Les **microsatellites** sont composés de motifs courts de 1 à 6 nucléotides, avec une moyenne de 4. Le nombre de répétition est de 2 à 10, quelquefois plus. On les appelle aussi **STR** (Short Tandem Repeats). Les **minisatellites** sont composés de motifs qui comportent de 10 à quelques dizaines de nucléotides, en moyenne une vingtaine. Ils se répètent un grand nombre de fois, peut-être 5 à 50 ou plus, mais c'est très variable selon les individus. On les appelle aussi **VNTR** (Variable Number of Tandem Repeats).

Il existe aussi un certain nombre de **répétitions géantes**, dont le nombre de motifs peut être très grand. La taille de ces séquences peut aller de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de nucléotides.

En-dehors des satellites, les chercheurs ont également répertorié chez les vertébrés des **séquences dispersées** répétées à plusieurs endroits différents sur les chromosomes: nommées petits éléments nucléaires intercalés ou **SINE** et longs éléments nucléaires intercalés ou **LINE**.

**Remarque:** Pour la suite de l'ouvrage, il est inutile de retenir ces distinctions. Je les ai données ici brièvement pour ceux qui désirent approfondir et lire des articles scientifiques. Ils vont se trouver en face de textes qui emploient ces mots sans les définir en supposant qu'ils sont connus du lecteur. Les articles scientifiques sont écrits pour la communauté scientifique spécialisée. Il est difficile de trouver des articles pour les non-spécialistes, sauf... modestement dans ce livre.

## Variabilité individuelle des satellites

Nous savons que la molécule d'ADN est constituée de l'enchaînement de nucléotides à la manière d'une suite de lettres prises parmi 4 (A, T, C, G). Mais nous savons aussi que cette suite est structurée en une sorte d'**architecture** comportant des emplacements ou cadres ou, en terme de biologie, un **locus**. C'est par exemple l'emplacement d'un gène donné. C'est une partie du chromosome qui est repérable de la même façon sur les chromosomes de tous les individus de la même espèce, disons l'être humain.

Ce cadre est rempli de nucléotides qui peuvent être identiques chez tous les individus, ou différents en partie. Chacune des versions possibles du locus s'appelle un **allèle**. Les allèles qui sont identiques chez tous les êtres humains portent les caractères propres à l'espèce humaine. Les allèles variables portent les caractéristiques propres à un individu, comme la couleur de ses cheveux.

## Empreinte génétique et test ADN

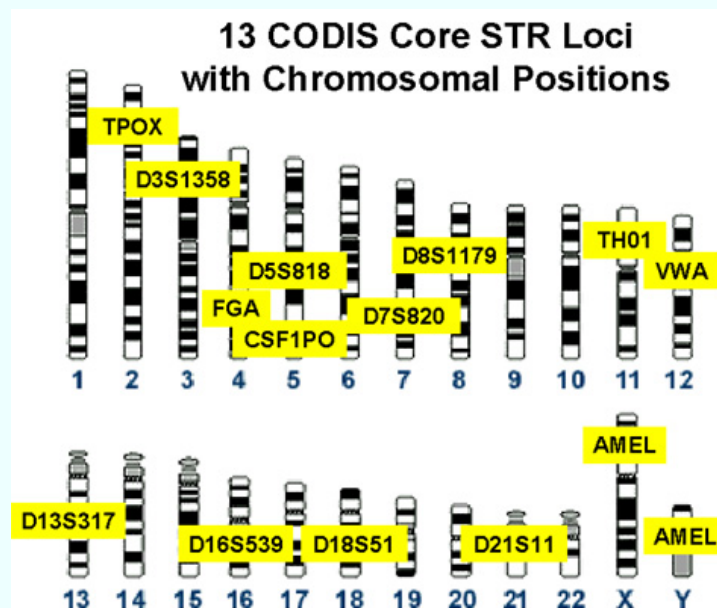
Notre génome comporte 3,2 milliards de paires de nucléotides dont 3,2 millions diffèrent de celles des autres, c'est-à-dire 0,1 %. Ce sont ces différences dans notre génome qui constituent notre **empreinte génétique**.

Lorsque la police scientifique cherche à identifier un individu à partir de son ADN, les laboratoires d'analyse ne déterminent pas l'ensemble des parties variables de son génome, car ce serait bien trop long et trop coûteux. Pour simplifier la tâche, on ne retient que quelques **satellites**, ceux qui peuvent être aisément amplifiés pour l'analyse, qui sont suffisamment simples et qui présentent une grande variabilité d'un individu à l'autre.

Les **minisatellites** présentent cette grande variabilité et sont les meilleurs candidats pour caractériser un individu. Les **microsatellites** présentent moins de variations, ont donc plus de chance d'être semblables chez 2 individus. Mais ils sont plus aisément amplifiables par les techniques routinières de laboratoire et sont donc plus souvent employés dans les tests ADN.

Dans une parenté, la probabilité des microsatellites (ou STR) d'être identiques chez 2 individus n'est pas nulle. On a plus de chance de faire la distinction entre deux individus si on examine plusieurs loci. C'est pourquoi la législation a retenu un nombre minimum de microsatellites (10 ou plus), situés à des loci déterminés et normalisés, dont le choix est variable selon les normes des pays.

En France, les empreintes génétiques sont rassemblées dans le *Fichier national automatisé des empreintes génétiques* (FNAEG), destiné à l'origine à recueillir les empreintes des personnes condamnées pour infractions à caractère sexuel, mais dont **l'usage s'est rapidement étendu à toutes sortes de délit**. En Amérique du Nord (USA, Canada), la norme CODIS est la plus utilisée.



*Localisation des 13 microsatellites dans les 22+2 chromosomes humains, qui constituent l'empreinte génétique selon la législation Codis*

*Merci à Wikipedia - Source: Short Tandem Repeat DNA Internet DataBase*

Les zones non-codantes sont elles-aussi structurées en loci, avec leur début et leur fin. On peut repérer un même satellite chez des individus différents par leur emplacement ou locus. On constate que **les satellites d'un même locus sont très variables d'un individu à l'autre. Ce qui varie, c'est le nombre de répétitions de son motif.**

De telles modifications se produisent pendant la formation des chromosomes au cours de la division des cellules, provoquant le raccourcissement ou l'allongement d'un satellite. Cela affecte également les cellules sexuelles, entraînant des changements de longueur de l'allèle d'une génération à l'autre. De ce fait, **il est possible de définir une sorte de profil génétique d'un individu par la carte des nucléotides de ses satellites** (voir encadré).

**Sources:** [Guillaume Achaz](#), *Etude de la dynamique des génomes; les répétitions intrachromosomiques*.

[Les empreintes génétiques en pratique judiciaire](#), Christian Doutremepuich, Bull. Acad. Natle Méd., 2012, 196, 6, 1117-1130

[Matt Ridley](#), *Chromosome 8, l'intérêt personnel*

## Les séquences non-codantes plus nombreuses dans les organismes supérieurs

Depuis longtemps, on pressent que les zones non-codantes pour des protéines ont un rôle indispensable.

Dans son ouvrage *La Statue intérieure* (1987), F. Jacob se rappelle l'un des plus vieux problèmes en biologie: dans des organismes faits de millions, voire de milliards de cellules, chacune des cellules possède l'ensemble complet de gènes. Comment se fait-il alors que tous les gènes ne fonctionnent pas de la même façon dans tous les tissus? Pourquoi **les cellules d'un organisme, qui détiennent exactement le même génome, se développent-elles pourtant de façon différenciée selon leur fonction**: cellules nerveuses, cellules du foie, du muscle, etc?

Une autre question est devenue cruciale depuis le séquençage du génome humain. Selon les biologistes, la croissance et le fonctionnement du corps sont régis par un nombre considérable de protéines (dont de nombreux enzymes, qui sont des protéines), elles-mêmes contrôlées par les gènes. On s'attendait donc à découvrir un grand nombre de gènes chez l'humain. Or il est apparu qu'il en a beaucoup moins que ce qu'on supposait. **Seulement 25000 gènes couvrant 1,3% de l'ADN codent pour des protéines. C'est insuffisant pour expliquer la complexité de l'organisme** avec ses nombreuses fonctions.

Par comparaison, le ver *Caenorhabditis elegans* le plus simple des organismes évolués (eucaryotes) possède 19300 gènes environ, soit presque autant que les humains. Mais ils couvrent 24% de l'ADN, le maximum pour les eucaryotes, car les zones non-codantes y sont bien moins abondantes.

Chez les procaryotes, la quantité de zones codantes monte à 88% (bactérie E. Coli). Les zones non-codantes y sont rares et le génome est court.

Nous savons maintenant que les séquences codantes couvrent 80% ou plus du génome des procaryotes, mais par exemple moins de 2% chez les humains. Une bactérie telle que E. Coli a environ 4000 gènes, dans un génome de 4 millions de nucléotides, tandis que les génomes humains ont seulement 2300 gènes selon la dernière estimation, alors que la quantité totale de nucléotides de l'ADN est de 3 milliards. Donc il y a dans ce cas **une relation inverse entre la complexité des organismes et le rapport ADN codant/ ADN non codant**.

(M. et M. Buiatti, 2008)

Plus l'organisme est évolué et complexe, plus nombreuses sont les zones non-protéinocodantes. Cela implique que **les séquences non-protéinocodantes sont en rapport avec des fonctions élaborées de gestion et d'instruction dans les organismes complexes**. Les chercheurs à l'heure actuelle font preuve d'humilité et n'emploient plus le terme d'ADN rebut. Ils admettent qu'il y a encore beaucoup de choses à découvrir et à comprendre dans le fonctionnement de l'ADN.



*Le ver Caenorhabditis elegans a presque autant de gènes que nous!  
Merci à AJC1*

## Le réseau de régulation des gènes

La découverte de la structure de l'ADN a profondément transformé la biologie, catalysant le séquençage du génome humain et a engendré une nouvelle vision de la biologie en tant que science de l'information... L'ADN a 2 types d'information numérique - les gènes qui codent pour les protéines, qui sont les machines moléculaires de la vie, et **le réseau de régulation des gènes qui spécifient le comportement des gènes** (Hood L, Galas D., 2003).

John S. Mattick, biologiste à l'Institut pour la Bioscience moléculaire (université de Queensland, Australie), écrit: **Le dogme central de la biologie affirme que l'information génétique passe normalement de l'ADN à l'ARN, puis à la protéine. En conséquence, on a généralement supposé que les gènes codaient généralement pour des protéines, et que les protéines remplissaient des fonctions non seulement structurales et catalytiques, mais aussi régulatrices, dans toutes les cellules, des microbes aux mammifères. Toutefois, cela pourrait ne pas être le cas dans les organismes complexes (John S. Mattick, 2003).**

La preuve des fonctions régulatrices des zones non-codantes se trouve dans le fait que **certaines maladies proviennent de déviations des informations issues de séquences non-codantes**. Des millions, pour ne pas dire des centaines de millions de personnes mourraient de maladie de l'ADN "rebut" tandis qu'officiellement 98,7% de l'ADN humain était considéré comme intouchable (A. Pellionisz). Sont ainsi concernées des maladies du système nerveux, cardiovasculaires, cancer, et bien d'autres (voir une [liste ici](#))

On commence à comprendre avec quels outils est effectuée cette régulation. On découvre la réalité et la complexité de toute une nouvelle gamme d'acteurs: pour l'essentiel, les **transposons** et diverses catégories d'**ARN**. Voyons de quoi il s'agit.

**Sources:** Hood L, Galas D., *The digital code of DNA*, Nature, 2003, 23, 42

John S. Mattick, *Challenging the dogma: the hidden layer of non-protein-coding RNAs in complex organisms*, BioEssays 2003, 25, 10; *The Human Genome: RNA Machine*, The Scientist, 2007, 21, 10, 61

A. Pellionisz, *Hereditary Diseases: « Not all is in the genes »*, compilation par International HoloGenomics Society

Buiatti M. et M., *Chance vs. Necessity in Living Systems: A False Antinomy*, Biology Forum, 2008, 101, 29; Menconi G., Bencia V., Buiatti M., *Data compression and genomes: a two dimensional life domain map*, J Theor Biol. 2008, 21, 253

## Des séquences mobiles, les transposons

Dans le chapitre précédent, j'ai déjà exposé ce que sont les transposons et comment ils ont été découverts par B. McClintock, puis oubliés. Dès 1965, elle a suggéré que les transposons pourraient jouer un rôle de régulation en indiquant à quel moment un gène doit devenir actif. **Les transposons sont des séquences d'ADN qui sont copiées et insérées dans une autre partie non-codante du génome**. En 1969, pour expliquer la différenciation des cellules d'un organisme, Britten et Davidson ont suggéré que le transposon pourrait déclencher un signal d'activation ou de désactivation selon l'endroit où il se localise dans l'ADN (non-codant). Actuellement, on estime que les transposons occupent **plus de 40% du génome humain**.

Les séquences dispersées répétées SINE décrites plus haut, dont la longueur varie de plusieurs centaines à plusieurs milliers de nucléotides, sont de tels transposons. En 2002, des chercheurs japonais (Ogiwara, 2002) ont étudié une nouvelle famille de séquences répétitives **SINE** chez les vertébrés. En comparant les divers vertébrés, ils ont constaté combien ces SINE ont été bien conservés d'une espèce à l'autre pendant des années, ce qui est hautement significatif **de leur rôle indispensable**.

En 2003, [Gill Bejerano](#) et ses collaborateurs (Université de Standford, USA) ont découvert une autre famille de SINE exceptionnellement stable depuis des millions d'années chez les coelacanthes, poissons indonésiens. Ils ont confirmé le **rôle de régulation** de certains transposons, en constatant la façon dont la couleur du poisson est transmise. Le transposon active à distance le gène de la couleur.

**Sources:** Leslie Pray, *Transposons, or Jumping Genes: Not Junk DNA?* Nature Education 2008, 1, 1

J. Mattick, *The Human Genome: RNA Machine*, The Scientist, 2007, 21, 10, 61

Ogiwara I, Miya M, Ohshima K, Okada N., *V-SINEs: a new superfamily of vertebrate SINEs that are widespread in vertebrate genomes and retain a strongly conserved segment within each repetitive unit*; Genome Res. 2002, 12, 2

G. Bejerano, C.B. Lowe, N. Ahituv, B. King, A. Siepel, S.R. Salama, E.M. Rubin, W.J. Kent and D. Haussler. *A Distal Enhancer and an Ultraconserved Exon are Derived From a Novel Retroposon*. Nature, 2006, 441, 7089

C. Wills, "Exons, Introns, and Talking Genes: The Science Behind the Human Genome Project", ed. Basic Books, 1991, 239, cité dans *The Functions of Introns: From Junk DNA to Designed DNA*, par Jerry Bergman, 2001

[Introns: a Mystery](#)

Steven Zimmerly, Huatao Guo, Phillip S. Perlman and Alan M. Lambowitz, *Group II Intron Mobility*



*Occurs by Target DNA-Primed Reverse Transcription, Cell, 1995, 82, 545*

*Jian Yang, Steven Zimmerly, Peter Perlman and Alan M. Lambowitz, Efficient integration of an intron RNA into double-stranded DNA by reverse splicing, Nature, 1996, 381, 332.*

## La communication par les ARN non-codants

Les questionnements évoqués plus haut - origine de la différenciation des cellules d'un même organisme, rôle des zones non-protéinocodantes et des transposons - trouvent des réponses dans les nombreuses avancées effectuées dans l'analyse de la transcription de séquences d'ADN non-protéinocodantes en ARN (npcARN).

**Un nombre impressionnant de nouveaux ARN non-protéinocodants qui ont un rôle génétique ont été découverts** dans les organismes complexes tels que les mammifères et les humains.



John Mattick

Les ARN non-protéinocodants semblent être particulièrement abondants dans des rôles qui demandent une reconnaissance hautement spécifique des acides nucléiques sans catalyse complexe, telle que diriger la régulation post-transcriptionnelle de l'expression des gènes ou guider les modifications de l'ARN (Eddy, 2001). **Les npcARN dominent l'expression génomique des organismes supérieurs et contrôlent l'architecture chromosomique, le flot des ARN messagers, et le timing de l'expression de protéines, et pourraient aussi réguler la transcription et l'épissage alternatif.** (J. Mattick, 2003).

Les npcARN sont impliqués dans les maladies évoquées plus haut relatives aux zones non-protéinocodantes.

Le fonctionnement correct des npcARN est également important pour la santé humaine: des changements dans les npcARN ont été impliqués dans **des attaques cardiaques, et des maladies comme le cancer.** Beaucoup sont visibles dans le cerveau et au moins un est impliqué dans des attitudes comportementales [chez la souris]. (Mattick 2007)

### Les micro-ARN

Vers 2000, personne n'avait encore entendu parler des micro-ARN. Puis on en a découvert dans la biologie des vers, et cela a été considéré comme étrange. Ce sont de petits npcARN. En fait, ils sont très abondants et contrôlent l'expression des gènes dans tous les animaux et les plantes, et même quelques virus. Les scientifiques les ont repérés dans tous les systèmes organiques majeurs.

En 3 ans, des chercheurs ont découvert des centaines de microARN, dont plus de 150 chez les humains. Ils semblent un moyen bien établi pour les organismes de moduler les gènes. Plusieurs sortes d'ARN travaillent: catalyse, signalement, activation comme n'importe quelle protéine. (Wayt 2003)

Certains micro-ARN agissent sur les ARN messagers qui vont porter les codes génétiques des protéines dans les ribosomes de la cellule. Ils sont capables de les inhiber. Ils ont aussi bien d'autres fonctions: *Presque tous les gènes importants et les voies de synthèse sont régulés à de multiples niveaux par une variété de micro-ARN. C'est vraiment une strate entièrement nouvelle de la biologie* (Deepak Srivastava, University of California, San Francisco, USA). (Phillips 2007)

Il y a de bonnes raisons de penser que ces micro-ARN représentent une strate de régulation jusqu'à maintenant cachée qui encode le programme de développement des eucaryotes et partant, s'est largement répandue dans les organismes complexes. Il est de plus en plus reconnu que les npcARN, y compris ceux qui proviennent des introns, sont impliqués dans tous les aspects des processus de régulation cellulaire, y compris le changement de conformation de la chromatine et la mémoire épigénétique, le transport des enzymes du noyau, et l'activation ou répression de la transcription...

Les micro-ARN connus et autres petites séquences ARN sont seulement un faible pourcentage de ce que comprend probablement le transcriptome fonctionnel des npcARN. (Mattick, 2007)

Il est clairement établi que **toutes les parties de l'ADN ont un rôle dans la machinerie génétique**, une machinerie qui se révèle très complexe. Les parties qui ne codent pas pour les protéines exercent un contrôle sur le développement et les traits distinctifs de tous les organismes, des bactéries jusqu'aux humains. Les micro-ARN en sont les acteurs.

Si tous ces npcARN sont fonctionnels, comme les faits le suggèrent de façon croissante, alors **une grande partie et peut-être la presque totalité du génome humain est fonctionnel**. Si oui, la **programmation génétique des organismes supérieurs a été mal comprise pendant les dernières 50 années**, à cause de la supposition - largement vraie pour les procaryotes, mais pas dans les eucaryotes complexes - que l'information génétique se manifeste et est transmise par les protéines. (Mattick, 2007)

Le sens donné habituellement aux termes **gène** et **code génétique** n'est peut-être plus adéquat. Ils devraient être redéfinis. Le terme **gène** a toujours été quelque chose de mal défini; ces gènes pour ARN élargissent sa signification. Pour éviter toute confusion, dit Claes Wahlestedt (Karolinska Institute, Suède), "nous tendons à ne plus parler de "gènes"; nous disons d'un segment d'ADN transcrit en ARN qu'il est une **unité de transcription**". (G. Wayt, 2003)

**Sources:** Eddy SR., *Non-coding RNA genes and the modern RNA world*, Nat Rev Genet. 2001, 2, 919

Mattick John S., *The Human Genome: RNA Machine*, The Scientist, 2007, 21, 10, 61

Mattick John S., *Challenging the dogma: the hidden layer of non-protein-coding RNAs in complex organisms*, BioEssays, 2003, 25, 10

Phillips Melissa Lee, *MicroRNAs: An emerging portrait*, The Scientist, 2007, 21, 55

Gibbs W. Wayt, *The Gems of "Junk" DNA*, Scientific American, 2003, November

Buiatti M et M, *Towards a statistical characterisation of the living state of matter*, Chaos, Solitons and Fractals 2004, 20, 55

## L'information itérative

Pour András Pellionisz, un biophysicien anciennement à l'université de New York, les 100% de l'ADN fournissent des informations codées qui entrent en jeu à certaines phases des processus biologiques en échangeant des informations **de façon itérative**.

Lorsqu'une cellule est en construction, par exemple une cellule neuronale du cerveau ou cellule de Purkinje, un squelette de protéine est d'abord construit selon le modèle classique de la transcription: gène > ARN messager > protéine. Mais avant la transcription en ARN, il y a un signal, une instruction qui est donnée: *Activer le gène*.

Lorsque cette instruction a été lue et effectuée, un marqueur sous forme de protéine se lie à l'ADN pour signifier *Éteindre le gène*. Pour le désactiver, le marqueur accroche un groupe méthyle sur la partie adéquate du gène, comme il a été vu dans le chapitre *Expression de l'ADN et épigénétique*. L'**épigénétique** est ainsi replacée dans une perspective plus large, l'**hologénétique**. Ajoutons que les **microARN** sont des acteurs de ces instructions.

Ceci est la première étape, dont le résultat est un embryon de protéine.

Puis cet embryon va chercher un deuxième lot d'instructions pour continuer son assemblage. **Ces instructions auxiliaires sont fournies par une séquence de l'ADN située dans une partie non-protéinocodante, une de ces séquences quasi-répétitives** dont on a parlé plus haut. Justement, les variantes du motif de répétition sont hautement significatives et font partie des instructions.

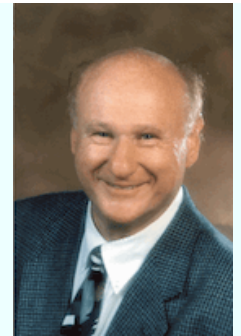
À la troisième étape, la protéine en construction va chercher un autre lot d'instructions complémentaires dans une autre séquence non-codante, et ainsi de suite. L'entité se construit par étapes, et à chacune d'elle, elle se développe avec une hiérarchie fractale, de la protéine au corps entier en passant par la cellule et le tissu.

Plus loin, nous allons explorer la structure fractale de l'ADN non-codant. La hiérarchie fractale de l'entité biologique en est le reflet. Ce processus itératif est appelé l'**hologénétique**. Ainsi, tout l'ADN est sollicité dans la construction du corps, y compris les 98,7% d'ADN non-codant. Il fournit le plan d'assemblage.

Les maladies hologénétiques seraient dues à des erreurs des constructions fractales. Selon Pellionisz, on peut diagnostiquer ces défauts en mesurant la structure fractale des séquences génomiques non-codantes. Il a breveté cette méthode.

**Sources:** Andras J. Pellionisz, *The Principle of Recursive Genome Function*, The Cerebellum, 2008, 7

Hal Plotkin, *Junk DNA: Revisited Silicon Valley startup claims to have unlocked a key to its hidden language*. San Francisco Chronicle, 2002, 21

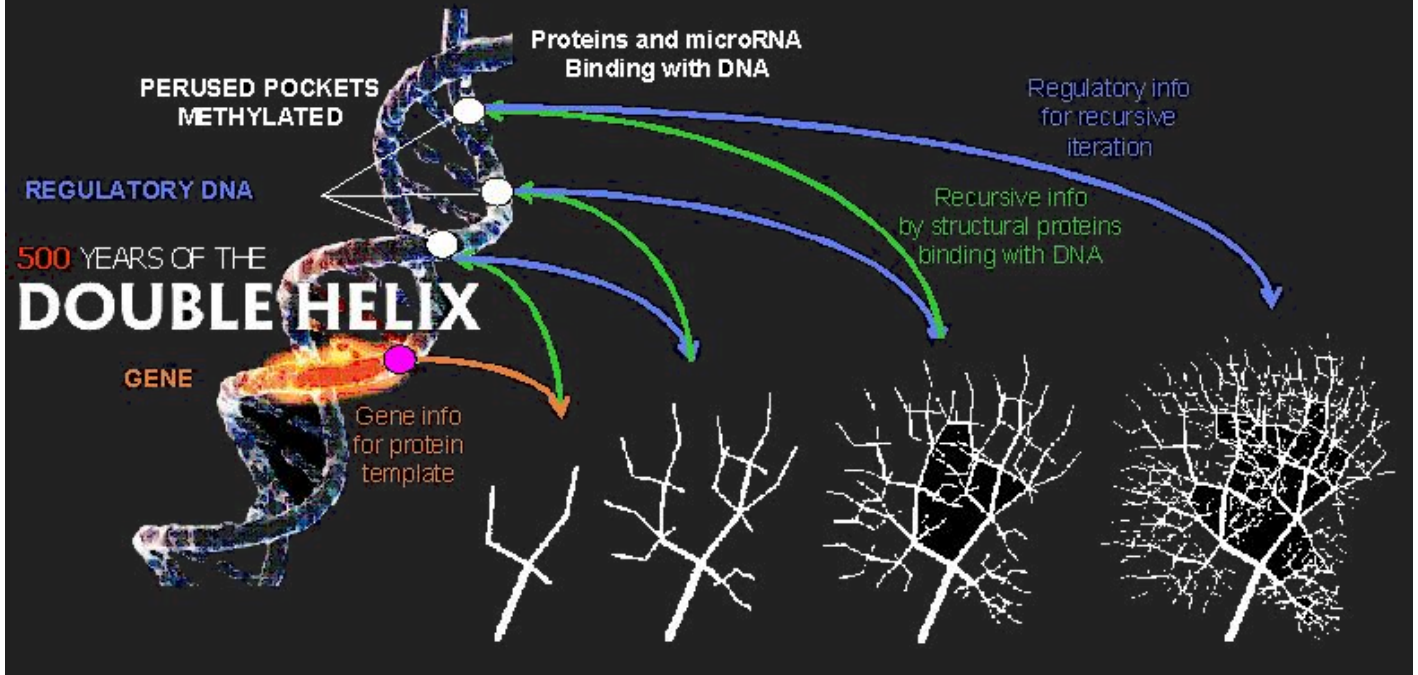


Andreas Pellionisz

# PRINCIPLE OF RECURSION ITERATIVE ACCESS TO REGULATORY DNA

## FractoGene

Patent Submitted 1<sup>st</sup> Aug. 2002



## Un ordre global dans l'ADN

Toutes les avancées dans la recherche des fonctions de l'ADN que j'ai présenté jusqu'à présent reposent sur le même type d'investigation, à savoir qu'on porte son regard sur le comportement des séquences. Il s'agit d'un regard local, morceau par morceau. Or un autre type d'approche a été entrepris depuis 1992 environ. Il envisage l'architecture globale du brin d'ADN, dont les propriétés statistiques ont été intensément étudiées. Le regard est porté sur l'ensemble. S'en dégage-t-il des formes, des ordonnancements?

Les recherches ont été stimulées par la publication progressive du séquençage des gènes, dont les résultats ont été mis à disposition dans des banques de données. L'effort le plus important pour fournir ces données a été fait dans le cadre du [Projet génome humain](#) international, qui a été terminé en 2004.

## Le décompte statistique

Certains ont utilisé des statistiques en comptant les différents éléments de l'ADN et en calculant comment ils se distribuent. Quels éléments?

Si on ignore la distinction entre zones codantes et non-codantes, on peut considérer l'ADN comme une chaîne continue de nucléotides. Si l'on reconstruit mentalement cette chaîne, on place d'abord un élément, puis un deuxième et se pose alors la question: le choix du prochain élément à poser est-il régi par une règle? Y a-t-il un ordre, ou bien les éléments sont-ils posés au hasard?

En science, le **hasard** est défini de la façon suivante. Nommons les éléments constitutifs sous la forme de 4 lettres, A, T, C, G, et imaginons qu'elles sont inscrites sur des carrés de scrabble en nombre illimité, avec une répartition égale des 4 lettres. Tirons au sort la première lettre, nous avons autant de chance d'avoir une lettre qu'une autre. Pour la seconde et toutes les suivantes, même chose. En définitive, chacune des lettres a 1 chance sur 4 d'apparaître dans le filament **quelle que soit sa place**. Si le filament est long, il y aura en moyenne autant de lettres de chaque espèce, 1/4 de A, 1/4 de T, etc. Donc, **dans le cas du hasard, la fréquence d'apparition des lettres est la même et égale à 25%**. Ou, autre façon de le présenter, la fréquence de A par rapport à TCG est de 1/3 (**0,33**).

Ainsi, une méthode statistique d'analyse rudimentaire est de dénombrer la **fréquence d'occurrence des lettres**. Si cette fréquence s'écarte notablement de la valeur 0,33, cela montre qu'un processus autre que le hasard est en œuvre. Il crée les enchainements selon une autre règle, une certaine logique, et par là il installe un ordre.

Au lieu de considérer les éléments constitutifs, les briques élémentaires, comme étant une seule lettre à la fois, on peut les définir comme une groupe de lettres. Ainsi, comme nous savons que les codons sont des groupes de 3, on peut définir l'ADN comme une chaîne de groupes de 3, au moins dans les parties codantes. Ou même des groupes de 2, 4 ou 10. Les résultats peuvent être différents selon le groupement envisagé.

Une autre façon consiste à compter ensemble la somme des C et G d'une part et la somme des A + T d'autre part. En effet, les chercheurs ont remarqué que **les nombres de C et de G étaient sensiblement les mêmes**. De même pour A et T. C'est une sorte de symétrie étonnante de l'ADN.

### À la recherche du nombre d'or

Imaginons que la base T se trouve systématiquement tous les 10 emplacements. Ce serait un ordre très régulier qui nous interpellerait. Il existe de telles sortes d'ordres, mais plus flous. Par exemple, au 10<sup>e</sup> emplacement, on a une chance plus élevée de trouver T que les autres bases. On dit que les emplacements des T sont **corrélés** entre eux. On mesure ainsi la probabilité de trouver telle base à telle distance d'un point de départ.

C'est une analyse de ce type qu'a entreprise le mathématicien Jean-Claude Pérez pour mesurer la fréquence d'apparition des bases sur des segments de différentes longueurs. Il a trouvé que **les fréquences de répartition des nucléotides ne sont pas dues au hasard**.

La méthode semble toutefois curieuse, car au lieu de rechercher la valeur de ces fréquences, il en fixe une a priori et il recherche si elle se produit. La valeur de fréquence recherchée d'une base par rapport aux 3 autres est 0,618. Cette valeur est traditionnellement nommée le **nombre d'or** (*voir en annexe Le nombre d'or dans la géométrie de l'ADN*). Il est indéniable que lorsque cette valeur, qui est presque le double de la valeur du hasard 0,33, apparaît dans les résultats du calcul, cela signifie que la distribution des nucléotides ne tient pas du hasard.

Chaque fois que cela se produit, le mathématicien considère cette occurrence comme une résonance positive à sa quête, et il dénombre ces résonances. Le total constitue une mesure de l'ordre. Les résultats révèlent des résonances abondantes. Pérez constate alors que l'ordre est différent selon les segments. Il décroît fortement quand des parties y sont insérées artificiellement comme c'est le cas dans les OGM (*voir L'ADN décrypté, J.C. Pérez, Ed. Résurgence*).

### Des corrélations dans les parties non-codantes de l'ADN

L'examen de milliers et millions de bases dans un segment pour trouver des corrélations est fastidieux. Mais les mathématiques offrent des outils qui permettent d'extraire les corrélations d'un ensemble d'éléments. Ce sont au fond des façons de présenter les ensembles d'objets d'une façon telle que le cerveau peut mieux appréhender les structures globales.

Ces analyses ont été effectuées sur des séquences de longueurs variées, de gènes courts à des filaments entiers, sur des zones codantes et non-codantes.

**Pour les connaisseurs**, je citerai quelques-unes de ces méthodes. Les **transformées de Fourier** permettent de mettre en évidence les répétitions ou les périodicités d'une courbe, un procédé qui est couramment employé pour détecter les harmoniques d'un son (*voir exemple dans Nature du son et Timbre et Harmoniques*). Les **fonctions de corrélation** permettent de mesurer si des corrélations existent entre les éléments de la structure analysée. On emploie aussi la transformée en ondelettes, et des méthodes de calcul d'entropie.

Le résultat qui en émerge est que **l'ADN est caractérisé par des corrélations à courte portée et des corrélations à longue portée**.

Précisons un peu ce que signifie une corrélation dans ce cas. Si on trouve une base T à un certain emplacement, cela influe sur la probabilité d'avoir un G (ou une autre base) à un autre emplacement, que ce dernier soit situé 100 nucléotides plus loin sur la chaîne, ou 1000, 10'000 ou plus. Comme le dit I. Amato (*Revue Science, 1992*), c'est comme si, sachant qu'il fait beau le 14 janvier de chaque année, on savait mieux prévoir s'il y aura du brouillard le 8 septembre. Une telle corrélation ne donne pas d'explication sur le type de lien entre les emplacements. On se contente de constater qu'il y a un lien de probabilité, mais on ne sait pas quelle en est la cause.

Ces corrélations sont très différentes dans les zones codantes et dans les zones non-codantes. **Dans les**



**exons (séquences codantes), on ne trouve pas ou peu de corrélations.** Les nucléotides sont disposés selon un ordre, certes, qui est celui du code génétique, mais il est localisé précisément. Par contre, **dans les zones non-codantes, on trouve des corrélations à longue portée.**

La répartition des bases le long du brin d'ADN n'est donc pas le fruit du hasard, y compris et surtout dans les zones non-codantes.

#### Sources:

Li, W. and Kaneko, K. 1992. Long-range correlation and partial 1/f spectrum in a noncoding DNA sequence. *Europhys. Lett.*, 17, 655-660; Li W., Marr T.G., Kaneko K., [Understanding long-range correlations in DNA sequences](#), 1994, *Physica D* 75, 392; Li W., [The Study of Correlation Structures of DNA Sequences - A Critical Review](#), 1997, *Computers & Chemistry* 21, 4, 257; Li W. [Universal 1/f noise, crossovers of scaling exponents, and chromosome-specific patterns of guanine-cytosine content in DNA sequences of the human genome](#), 2005, *Phys. Rev. E* 71

Voss R., [Evolution of long-range fractal correlations and 1/f noise in DNA base sequences](#), 1992, *Phys. Rev. Letters*, 68, 3805

Amato I., [DNA shows unexplained patterns writ large](#), 1992, *Science* 7, 257, 5071, 747

[Noisy Nucleotides, DNA sequences show fractal correlations](#), 1992, *Scientific American* Sept 92

Peng C. -K., S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger, 1994, *Phys. Rev. E*, 49, 1685; Peng C. -K., S. Havlin, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger, [Long-range correlations in nucleotide sequences](#), 1995, *Chaos*, 5, 82; Havlin S., S. V. Buldyrev, A. L. Goldberger, R. N. Mantegna, C.K. Peng, M. Simons and H. E. Stanley, [Statistical Properties of DNA Sequences](#), 1999

Buiatti M. et M., [Towards a statistical characterisation of the living state of matter](#), 2004, *Chaos, Solitons and Fractals* 20, 55

Selvam A.M., [Universal spectrum for DNA base C+G frequency distribution in Human chromosomes 1 to 24](#)

## L'ordre fractal

Dans la recherche de corrélations, les chercheurs ont constaté que le degré de corrélation reste le même pour des portions courtes de 1000 nucléotides, ou longues de 10'000 ou 100'000, donc quelle que soit l'échelle d'observation. C'est aussi ce qu'a constaté J.C. Pérez pour l'existence des résonances. Autrement dit l'architecture de l'ADN a un visage semblable quelque soit l'échelle à laquelle on l'analyse.

Par définition, une structure qui présente la même forme à différentes échelles est nommée **structure fractale**. Le degré de corrélation est sa dimension fractale (voir [Les images fractales](#)).

En comparant la dimension fractale de gènes de différents organismes, R. Voss ([Revue Science, 1992](#)) a trouvé que chaque catégorie génétique d'êtres vivants (primates, invertébrés, organelles, etc.) avait chacune sa dimension fractale particulière. Les organismes les moins évolués tels que les bactéries sont peu corrélés, la corrélation est de plus en plus forte en montant sur l'échelle de complexité. Cela provient du fait que la quantité de zones non-codantes augmente.

## Des similitudes avec le langage humain

Certaines équipes ont comparé la structure fractale de l'ADN avec celle du langage humain. La **fractalité du langage humain** repose sur des études faites par [Georges Zipf](#) (1902-1950) qui a compté la fréquence avec laquelle chaque mot apparaît dans un texte littéraire. Il en a déduit que cette fréquence est inversement proportionnelle au rang du classement de ce mot. Par exemple, la fréquence du mot qui vient au 3<sup>e</sup> rang a sa fréquence d'apparition 3 fois moindre que celle du mot en première position. Par la suite, Mandelbrot a corrigé cette loi sans la remettre fondamentalement en cause.

Elle a été vérifiée dans plusieurs langues: anglais, turc ([Luděk Hřebíček 1992, Hacinliyan](#)), etc. La structure est présente parce que cette loi d'occurrence est vraie quelle que soit la longueur du texte, du moins au-dessus d'un nombre minimum de mots qui permet de faire une statistique.

Selon différentes équipes, les lois de corrélation des bases de l'ADN sont semblables à la fractalité du langage. Il faut seulement définir ce qu'est un mot dans le texte de l'ADN. Dans les parties codantes, il est clair que c'est le codon, comprenant 3 lettres, les 3 nucléotides qui codent pour un acide aminé. Pour les parties non-codantes, les chercheurs de l'équipe de Stanley et Mantegna (1992) ont testé des mots de 3 à 8

paires de nucléotides. Dans tous les cas, ils ont trouvé que la fréquence d'apparition des mots dans les zones non-codantes suit effectivement la loi de Zipf-Mendelbrot.

Une autre caractéristique commune au langage humain et à l'ADN, c'est la **redondance**. Le caractère de redondance dans le langage humain signifie qu'une phrase peut être comprise même si certains mots sont déformés ou manquants. Le nombre de lettres et de mots contenus dans une phrase est plus grand que le minimum requis pour en percevoir le sens. En appliquant une analyse statistique selon la théorie de l'information de Shanon (1950), la même équipe de chercheurs a trouvé que les zones non-codantes contiennent 3 à 4 fois plus de redondance que les zones codantes.

**Sources:**

Mantegna RN, Buldyrev SV, Goldberger AL, Havlin S, Peng CK, Simons M, Stanley, *Linguistic features of noncoding DNA sequences*, Phys Rev Lett. 1994, 5, 73, 23, 3169

*Noisy Nucleotides, DNA sequences show fractal correlations*, 1992, Scientific American, Sept

Luděk Hřebíček, *Text as a Self-Similar Structure*, 1992, Text in Communication, Quantitative Linguistics Vol. 48, Universitätsverlag, Bochum, 1992; Luděk Hřebíček, *Fractals in language*, 1994, Journal of Quantitative Linguistics, 1, 1, 82; Avadis Hacınlıyan, Murat Erentürk, and Gökhan Şahin, *Possible Chaotic Structures in the Turkish Language with Time Series Analysis*, 2008, Unifying Themes in Complex Systems, Part III:, Pages 618-625

## Le code génétique électromagnétique

La structure fractale démontre que **l'ADN est construit selon un ordre**, autrement dit une organisation. Toute organisation porte en elle une information, car enregistrer une information dans la matière suppose une certaine forme d'arrangement codé de cette matière (*voir mon article Codes et information*).

Des chercheurs russes sous la direction de P. Gariaev ont étudié l'information génétique que cette organisation pouvait enregistrer. Et ils ont trouvé des pistes très intéressantes. Ils n'ont pas traqué des molécules éventuellement capables de lire ces informations, comme l'ont fait toutes les autres investigations présentées jusqu'ici dans ce chapitre.

Ils ont trouvé que le brin d'ADN pouvait être lu avec une onde électromagnétique, comme un rayon laser lit des signaux enregistrés sur un CD. On envoie une onde de caractéristiques adéquates sur l'ADN. **En parcourant l'ADN, cette onde électromagnétique est modulée par la structure et transporte l'information codée ailleurs dans l'organisme.**

Les 98,5% [non codant pour des protéines] de la totalité de l'ADN contiennent des programmes de niveau significativement supérieur (*P. Gariaev et coll, 2002*)

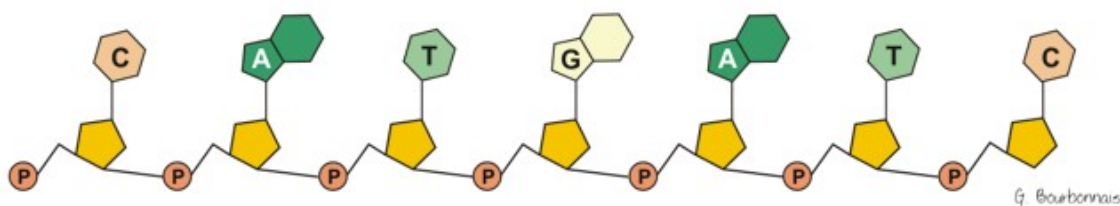
Pour étudier cela, nous devons auparavant faire connaissance avec le champ électromagnétique de l'ADN, ce que nous faisons dans le chapitre 5.

## 4. L'ADN électrique

**Résumé:** On représente habituellement la molécule d'ADN sous forme de volumes géométriques: hélices, rubans et segments. Au-delà de son occupation dans l'espace, une vie électronique intense se manifeste dans les molécules, responsable de leurs attirances, associations et assemblages. De nombreuses recherches ont été conduites sur la conductivité électrique de l'ADN nu, donc en-dehors du corps. Récemment, il a été démontré que l'ADN est électro-conducteur et peut être considéré comme un minuscule fil électrique. Ces recherches sont motivées par la possibilité d'utiliser l'ADN comme constituant de nano-circuits électroniques (à l'échelle du nanomètre). Des ordinateurs à base d'ADN ont été construits et testés. L'ADN participe ainsi à la grande course des nanotechnologies qui permettent de fabriquer des puces et autres dispositifs de taille très inférieure à celles élaborées avec le silicium. Une technologie qui se répand pour le meilleur et pour le pire.

Depuis sa découverte dans les années 50, la présence d'ADN dans le noyau de nos cellules est bien connue, ainsi que sa fonction de support du code génétique. Les enseignements scolaires, universitaires et les médias diffusent abondamment les représentations de la structure de cette molécule, faites de **2 brins enroulés en double hélice**, et comment l'information génétique est codée dans certains segments, les **gènes**. Mais ce n'est là qu'un aspect limité de l'ADN. Les 3 chapitres précédents ont déjà complété cette description en montrant combien le rôle du code génétique doit être nuancé et modulé. Ces compléments sont toutefois restés dans le cadre habituel de la description moléculaire de l'ADN et des gènes. Le présent chapitre sort de cette représentation, ou plus exactement y pénètre de façon plus profonde et plus fine pour **découvrir une image différente de l'ADN: sa constitution électrique et ses manifestations**.

Rappelons que chaque **brin d'ADN** est constitué d'une chaîne centrale - le **squelette** - sur lequel sont accrochées les **bases azotées**. Le squelette est fait de l'enchaînement répétitif d'un même motif, lui-même fait d'un "pentagone" (le désoxyribose) et d'un complexe phosphate (voir figure 1). Sur ce squelette, un peu à la façon des dents d'un peigne, sont fixées les bases azotées, prises parmi 4 types, qu'on représente par les lettres **C** (cytosine), **A** (adénine), **T** (thymine), **G** (guanine). Les 2 brins sont enroulés en hélice l'un autour de l'autre et s'assemblent par l'accouplement des dents qui se font face. Elles s'accouplent par la liaison des 2 bases azotées complémentaires de chacun des brins (*pour plus de détails, voir le premier chapitre*).



*Fig.1- Schéma d'un brin d'ADN. Il est composé d'une chaîne centrale, faite de l'assemblage linéaire de motifs identiques (les pentagones oranges représentant le désoxyribose, articulés par le groupement phosphate P), sur laquelle sont fixés des groupements C, A, T et G  
Merci à G. Bourbonnais*

Dans cette représentation, les atomes et les molécules sont envisagés comme des volumes plus ou moins déformables qui se rapprochent, s'emboîtent et s'assemblent. Cette vision, quoique fructueuse et juste sous un certain regard, est incomplète. Elle ignore l'aspect électrique des atomes, même s'il est implicite dans la notion de liaison chimique. C'est en effet **la nature électrique des atomes qui est responsable des interactions entre atomes**. Or ces liaisons sont nécessaires à la constitution des assemblages d'atomes qui forment la matière. On peut donc dire que **la nature électrique des atomes est le fondement de l'existence de la matière, de sa cohérence et de sa dynamique**.

## Les molécules sont des assemblages de particules électriques

Toute molécule, y compris la molécule d'ADN, est faite d'un assemblage d'**atomes**. Un atome est constitué d'un **noyau** chargé d'électricité positive, et d'**électrons** de charge électrique négative qui gravitent autour du noyau. Or, **une charge électrique crée un champ électrique tout autour d'elle**, c'est-à-dire une sphère d'influence électrique qui exerce des forces sur les autres charges électriques. On peut donc dire que tout atome est un espace de charges électriques et d'influences électriques.

Dans une **molécule**, les atomes sont maintenus en place par des liaisons électriques plus ou moins élastiques, plus ou moins souples (liaisons *covalentes*). Toute **molécule** est aussi un espace de charges électriques et d'influences électriques. Sa forme même résulte des interactions entre ses différentes parties. Par exemple si deux parties un peu éloignées d'une même molécule s'attirent, cette force d'attraction provoque la courbure ou le repliement de la molécule. **La molécule est structurée par l'électricité et fonctionne grâce à elle.**

L'électricité est aussi la force qui maintient les **assemblages de molécules** sous forme de matière, liquide ou solide. Entre elles, les molécules peuvent s'attirer ou se repousser à cause de leurs influences électriques. Lorsqu'elles s'attirent, elles peuvent se coller, s'emboîter, par des liaisons électriques plus faibles que celles qui unissent leurs atomes constitutifs (liaisons de type *Van der Waals*, liaisons *hydrogène*). Cette association reste légère, relativement libre et facilement défaire, par élévation de température par exemple, ou par l'intervention d'ions.

La nature électrique de la matière se manifeste aussi au niveau de la **cellule**. La membrane qui enveloppe la cellule est polarisée comme une pile entre l'intérieur et l'extérieur. Les charges électriques sont mobiles et circulent dans la cellule. C'est ainsi que les neurones, cellules du système nerveux, transmettent l'influx électrique d'une cellule à l'autre dans les nerfs. En réalité, **les organismes vivants sont des "machines" électriques extrêmement élaborées.**

## La molécule d'ADN comme composant électronique

Puisque la molécule d'ADN est composée d'électricité, certains chercheurs se sont demandés si elle était capable de conduire le courant électrique comme un fil minuscule. Le but est intéressé. Les recherches sur la conductivité sont menées dans l'espoir d'en trouver des applications technologiques.

### L'électronique moléculaire

S'il est possible de **fabriquer des microcircuits qui emploient des fils moléculaires**, alors les fabricants pourraient s'affranchir du silicium et élaborer des appareils, en particulier des ordinateurs, dont le volume pourrait être 1000 fois plus petit que les appareils courants (voir un *exemple d'étude*). Parmi les molécules qui sont susceptibles d'être employées comme fil électrique, celles d'ADN possèdent de nombreux avantages. Elles ont la faculté de s'assembler spontanément en ensembles ordonnés (auto-assemblage), de se dupliquer et d'adopter des conformations variées.

Les **électrons** qui gravitent autour des atomes sur les orbites les plus éloignées sont très peu astreints à rester sur cette orbite et peuvent sauter d'un atome à l'autre. Dans les fils métalliques, ils sont tellement libres que lorsqu'ils sont soumis à une tension électrique, ils circulent en flot groupé, comme de l'eau soumise à une aspiration. C'est ce qui crée le courant électrique.

Dans les molécules organiques telles que l'ADN, les mécanismes sont plus complexes (sauts d'électrons, solitons, polarons, bipolarons), mais de toute façon, ces termes désignent des mouvements d'électrons. Certains chercheurs ont tenté de **calculer la**

L'aspect électrique des molécules est bien connu des chimistes. Une catégorie d'entre eux et de physiciens en ont fait leur monde quotidien de recherche en *électronique moléculaire*. Ils cherchent à construire et étudier des dispositifs électroniques miniatures (**nanotechnologie**), des machines dont la taille est de l'ordre du nanomètre (un millionième de millimètre) et qui peuvent se loger partout, y compris dans le corps, dans les cellules, dans le sang, pour le meilleur... ou pour le pire! Dans cette approche, on synthétise des molécules souvent linéaires ou cycliques, et on étudie comment elles se comportent en tant que minuscules fils électriques, diodes, condensateurs, ou antennes électro-magnétiques. De *nombreuses équipes* travaillent sur ce sujet qui a le vent en poupe dans la recherche et la faveur des grosses sociétés industrielles électroniques.

Il est donc surprenant que la nature électrique des molécules soit si peu abordée dans les descriptions de la biologie moléculaire, aussi bien dans l'enseignement que dans la recherche (sauf rares exceptions). Sans doute parce que la physique rebute le biologiste. Mais aussi parce qu'il existe un cloisonnement important entre les disciplines.

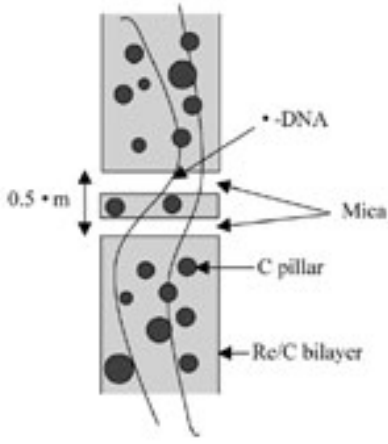
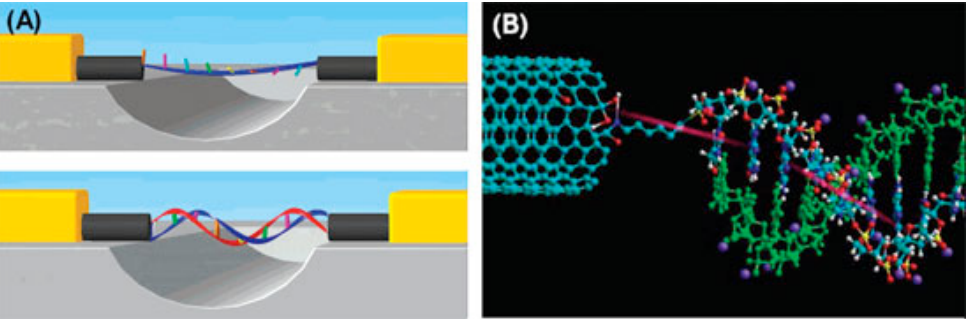
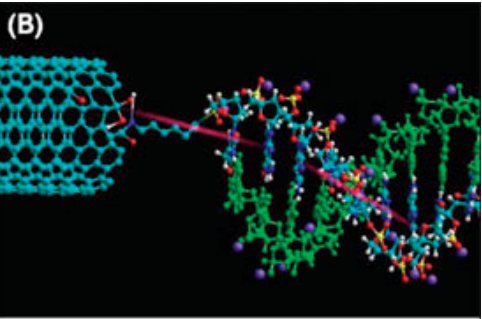


**conductivité théorique**, selon des modèles plus ou moins représentatifs de la réalité, sans conclusion nette.

## Mesures expérimentales de la conductivité de l'ADN

La vraie réponse est fournie par la mesure expérimentale. À condition de pouvoir le faire. La mesure de la conductivité d'une molécule d'ADN est un exploit technique. Il est facile de mesurer celle d'un fil électrique, d'un morceau de métal, en reliant chaque extrémité à un mesureur de résistance, un ohm-mètre. Mais quand il s'agit d'une molécule dont le diamètre est de 2 nanomètres (2 milliardièmes de mm) et la longueur de l'ordre du millimètre, comment relier ses extrémités à un appareil? C'est pourtant ce qu'ont réalisé plusieurs équipes de chercheurs, motivées par l'espoir des applications électroniques.

Généralement, ils mettent les molécules d'ADN en suspension dans un liquide, et déposent ce liquide sur une grille métallique aux mailles extrêmement serrées, avec l'espoir que certaines des molécules chevaucheront le trou à la manière d'un pont, ou seront posées entre deux plots dispersés sur une plaquette. Les résultats sont contradictoires d'une équipe à l'autre. Certaines trouvent que l'ADN est peu conducteur, et d'autres qu'il l'est un peu ou beaucoup. Le résultat des mesures est très dépendant de la qualité des contacts sur la grille.

|                                                                                    |                                                                                                                                                                                   |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |                                                                                                |  |
| <p>Dispositif de mesure de la conductivité de l'ADN</p>                            | <p>(A) Molécules d'ADN tendues entre 2 nanotubes de carbone distants de 27 nm.</p>                                                                                                | <p>(B) Attache de l'ADN sur un nanotube par l'intermédiaire d'une amine</p>          |
| <p>Dr H       Bouchiat, CNRS Info, Paris, 2001</p>                                 | <p>Reproduit de "Direct Electrical Measurements on Single-Molecule Genomic DNA Using Single-Walled Carbon Nanotubes", Roy et col. Copyright    2008 American Chemical Society</p> |                                                                                      |

La généralisation de l'emploi de nanotubes de carbone dans les recherches sur les nanotechnologies a fourni une nouvelle technique de contact entre la molécule et l'électrode. Des chercheurs de l'université de Miami, en Floride (Roy, [Choi](#) et col. USA) ont réalisé un dispositif dans lequel un nanotube de carbone est greffé aux deux extrémités de l'ADN. Ces tubes sont conducteurs et leur conductivité est analogue à celle du graphite.

En 2008, des [chimistes de l'université de Columbia](#) (Guo et col; USA) ont employé une méthode de préparation tout à fait différente. Ils ont inséré des molécules d'ADN à l'intérieur de nanotubes de carbone, dont le diamètre est comparable à celui des molécules d'ADN. Ils sont liés à l'ADN par des liaisons chimiques qui, elles aussi, propagent parfaitement le courant électrique. De manière convaincante, les mesures montrent que la résistance électrique de l'ADN est inférieure au million d'ohms, ce qui signifie que **ces molécules conduisent très bien l'électricité**. (H       Bouchiat, physicienne, CNRS, Paris)

**Références:** *Fils moléculaires conducteurs: la preuve par l'ADN; L'ADN dans les circuits intégrés, réalité de demain?* CNRS Info, mars 2001, 391. *Questions    H       Bouchiat: L'ADN conduit l'électricité;* La Recherche, mai 2008, 419. *Nanotubes measure DNA conductivity;* André Brown, 7 mars 2008. *Conductivity of a single DNA duplex bridging a carbon nanotube;* X. Guo, A.A. Gorodetsky, J. Hone, J.K. Barton, C. Nuckolls; *Nature Nanotechnology*, 2008, 3, 163-167 ([Version pdf](#)). *DNA electronics in nanotechnology;* Michael Berger, 2007 Nanowerk LLC. *Direct Electrical Measurements on Single-Molecule Genomic DNA Using Single-Walled Carbon Nanotubes*, Roy et col. *Nano Lett.*, 2008, 8, 26-30. *Proximity-Induced Superconductivity in DNA;* A. Yu. Kasumov, M.

Kociak, S. Guéron, B. Reulet, V. T. Volkov, D. V. Klinov, H. Bouchiat; *Science*, 12 January 2001, 291, 280-282. [Metallic Conduction through Engineered DNA: DNA Nanoelectronic Building Blocks](#); A. Rakitin, P. Aich, C. Papadopoulos, Yu. Kobzar, A. S. Vedenev, J. S. Lee, J. M. Xu; *Phys. Rev. Lett.* 2001, 86, 3670-3673. [DNA-based Nanowires and Nanodevices](#), prof. Alexander B. Kotlyar, Israel

## La conductivité de l'ADN dépend de sa composition moléculaire

En réalité, la conductivité n'est pas la même selon le type d'ADN que l'on mesure: ADN à double brin naturel, ADN modifié, ADN à simple brin, ADN court synthétique, etc..

Selon [l'équipe américaine de Miami](#), l'ADN à double brin est bon conducteur, mais pas celui à simple brin.

[L'équipe de Columbia](#) a constaté qu'un seul défaut de structure engendré par un mauvais appariement entre les deux nucléotides complémentaires d'un ADN double brin gênait la propagation des électrons. La conductivité devient alors, en moyenne, 300 fois moins importante.

Une [équipe espagnole](#) a trouvé que la valeur de la conductivité dépendait de la disposition de la succession des nucléotides. Lorsque les nucléotides sont disposés en forme répétitive ou périodique [donc dans les parties non-codantes de l'ADN, celles qu'on nomme les satellites, voir chapitre précédent], le transport d'électricité est meilleur.

Ces recherches intéressent les biophysiciens qui espèrent détecter les défauts de structure, les défauts d'appariements des brins, dont certains peuvent être à l'origine de cancers. Certains enzymes ont la faculté de réparer des défauts qui se produisent sous l'effet de l'environnement. **Comment les enzymes reconnaissent-ils les dommages subis par l'ADN?** Auraient-ils un moyen de détecter une rupture ou une modification dans la chaîne moléculaire de l'ADN, en étant sensible à sa conductivité?

**Références:** [Direct Electrical Measurements on Single-Molecule Genomic DNA Using Single-Walled Carbon Nanotubes](#), Roy et col. *Nano Lett.*, 2008, 8, 26-30. [La chaîne ADN peut être conductrice d'électricité](#); extrait du *Bulletin électronique Espagne* n° 57 du 15/11/2006, Ambassade de France en Espagne.

### Les mécanismes de la conduction

Comment les électrons circulent-ils le long de la molécule d'ADN? Puisqu'elle est constituée de deux brins enroulés en hélice, le courant est-il transmis le long des brins, c'est-à-dire sur leur squelette extérieur, ou bien dans le canal formé entre les deux brins à travers les bases?

De nombreuses études se sont concentrées sur les **transports d'électrons par les bases azotées**. Dans une base, les orbitales électroniques des atomes sont recombinées collectivement en une orbitale qui a la forme d'un anneau. Ces anneaux s'empilent comme une colonne qui forme un canal à l'intérieur de l'ADN, et c'est dans ce canal que passe le flux d'électrons.

Mais d'autres contestent ce modèle. Une équipe japonaise a trouvé, en mesurant les électrons émis par les atomes de phosphore de la chaîne, qu'un processus de conduction se produisait bien **le long du squelette**, avec une vitesse pour les électrons un millier de fois plus rapide au niveau du squelette qu'au niveau des bases.

**Référence:** [L'ADN est un bon conducteur d'électricité](#); Laurent Sacco, *Futura-Sciences*, 20 décembre 2007. [DNA goes electric](#); D Clery. *Science*, 3 March 1995, 267, 5202, 1270

## La conductivité de l'ADN en présence de métaux

Les études de conductivité rapportées précédemment ont été effectuées sur un ADN nu. C'est logique puisque le but est d'en tirer parti pour des nanocircuits électroniques et des nano-ordinateurs. Or il est connu que des molécules organiques autres que l'ADN sont conductrices de l'électricité, et ceci depuis les années 1970. Il s'agit de certains **polymères** (le nom chimique des constituants des matières plastiques et des gels) comme le polyparaphénylène, le polyacétylène, la polyaniline. Toutefois, leur molécule n'est pas conductrice lorsqu'elle est isolée et nue. Ils ne sont pas des conducteurs intrinsèques. Ils deviennent conducteurs lorsqu'on les "dope", c'est-à-dire lorsqu'on leur ajoute des ions (métalliques, chlore, iode, etc.) qui viennent se coller sur les molécules.

La conductivité de l'ADN est également très influencée par les ions métalliques. Ainsi, l'adjonction de ruthénium ou de rhodium augmente la conductivité de l'ADN de façon significative. Lorsqu'on place un seul atome de ruthénium à chaque extrémité d'un brin d'ADN (court), la conductivité du brin est multipliée par 10'000 ([David Paterson](#), *Scientific American*, mai 1995, 33).

Les métaux ont une importance cruciale pour le fonctionnement de l'ADN dans son environnement cellulaire. L'ADN baigne dans l'eau physiologique, chargée d'ions et d'autres molécules, qui peuvent s'approcher de l'ADN et se fixer sur lui. C'est de cette façon que certains ions métalliques jouent un rôle important dans l'ouverture (la séparation locale) des deux brins et dans leur fermeture (*Étienne Guillé, L'alchimie de la vie*). On sait aussi qu'une plus grande concentration de certains d'entre eux est liée à l'apparition du *cancer*. La présence trop abondante d'aluminium est incriminée dans la *maladie d'Alzheimer*.

**Référence:** *Long-range photoinduced electron transfer through a DNA helix*; CJ Murphy, MR Arkin, Y Jenkins, ND Ghatlia, SH Bossmann, NJ Turro, and JK Barton; *Science*, 262, 5136, 1025-1029. *Metal Complex - DNA Interactions*, John Wiley and Sons Ed, March 2009. *Crystallographic studies of metal ion - DNA interactions: cobalt, copper and barium*, Yi-Gui Gao, M. Sriram and Andrew H.-J. Wang, *Nucleic Acids Research*, 1993, 21, 17, 4093 -4101. *Intranuclear aluminum content in Alzheimer's disease, dialysis encephalopathy, and experimental aluminum encephalopathy*, D. R. Crapper, S. Quittkat, S. S. Krishnan, A. J. Dalton, U. De Boni, *Acta Neuropathologica*, 50, 1, janvier 1980. *ADN et Alchimie*, E. Guillé. *L'induction du cancer, à l'échelle énergétique*, E. Guillé.

## Les ordinateurs à molécules organiques

La nature électronique des molécules organiques en général et de l'ADN en particulier excite les appétits des ingénieurs pour concevoir des mémoires d'ordinateurs selon de nouveaux principes. Il faut pouvoir les assembler en réseau, et dans ce but, les molécules allongées ou en forme de plaquette, éventuellement ramifiées en plusieurs branches, semblent très prometteuses. Dans cette technologie du futur, l'ADN suscite beaucoup d'intérêt.

Par exemple, Jonathan Green, de Caltech, et ses collègues ont fabriqué une mémoire d'ordinateur dans laquelle des molécules jouent le rôle d'éléments de stockage. Pour cela, ils ont d'abord gravé sur du silicium deux réseaux de fils de silicium perpendiculaires, formant une sorte de «matrice» de 400 lignes et 400 colonnes, à l'aide de techniques classiques de l'électronique. Entre ces deux réseaux de silicium, ils ont disposé des molécules appelées rotaxanes, de forme allongée. Il y a en moyenne quelques milliers de rotaxanes à l'intersection de deux fils. Chaque rotaxane possède un groupement chimique, sorte d'anneau qui peut avoir deux positions différentes le long de l'axe de la molécule. En appliquant une tension de +1,5 ou -1,5 volt à un fil de silicium, on modifie la position de l'anneau des molécules de rotaxane fixées à ce fil. Or, la conductance de la molécule varie avec la position de l'anneau. On peut donc détecter l'état de la molécule, qui correspond à l'état «0» ou «1» d'un bit informatique, en lisant le courant circulant entre les deux fils." (*Alain Claverie, La Recherche, 2007*)

## Les ordinateurs à ADN à base d'enzymes

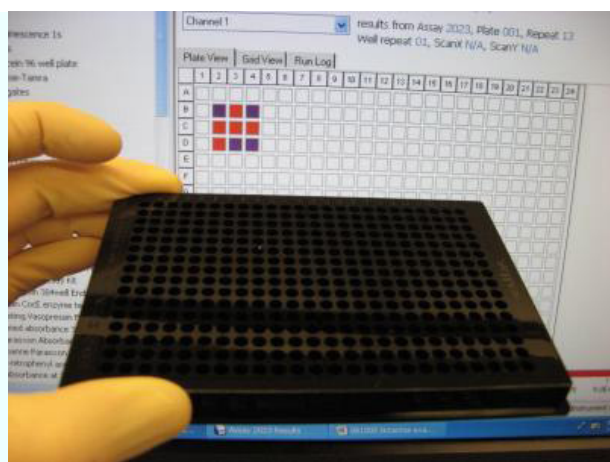
À cause de la difficulté d'assembler l'ADN en réseau, des équipes ont inventé un calculateur à ADN conçu selon des principes très différents des ordinateurs classiques, à base de réactions chimiques. Voici les explications de Bernard Yurke, dans *La Recherche*, dans un article si limpide que je n'ai qu'à en citer des extraits:

L'ADN a plusieurs qualités pour cela [être employé comme élément d'ordinateur]. D'abord, c'est un moyen de **stockage d'informations compact**. La molécule d'ADN ressemble en effet à une longue chaîne, un brin, dont l'un des côtés porte, à intervalles réguliers, des groupements chimiques que l'on nomme des bases, et dont il existe quatre modèles différents: l'adénine, la cytosine, la guanine et la thymine. Les informations génétiques sont codées par l'ordre dans lequel apparaissent ces bases. Chaque base mesure à peine un nanomètre de long, et les bases sont espacées d'un tiers de nanomètre environ. Si l'on imaginait par exemple de coder chaque caractère imprimé sur cette page par une suite de trois bases (ce qui permet de coder 64 signes différents), on obtiendrait un brin d'ADN d'à peine vingt micromètres de long.

L'intérêt de l'ADN pour le calcul réside aussi dans la façon particulière avec laquelle les brins interagissent deux à deux. Si leurs séquences de bases sont complémentaires, c'est-à-dire si chaque adénine d'un brin correspond à une thymine de l'autre brin, et chaque cytosine à une

guanine, alors les brins se lient l'un à l'autre et s'enroulent, formant une double hélice: on dit qu'ils s'hybrident (c'est d'ailleurs sous cette forme de double hélice que l'on rencontre l'ADN la plupart du temps dans les organismes biologiques). Cette hybridation est spécifique: deux brins qui ne sont pas complémentaires ne peuvent pas se lier l'un à l'autre. Cette propriété permet de **concevoir des brins d'ADN qui, lorsqu'on les mélange dans un tube à essai, s'assemblent en structures complexes prédéterminées.**

Enfin, l'usage de l'ADN pour réaliser des calculs est favorisé par l'existence d'une «boîte à outils» qui permet de manipuler et de modifier les chaînes de bases. Les constituants de cette boîte à outils sont les **enzymes**, de grosses molécules, parmi lesquelles par exemple les ligases épissent deux brins d'ADN ensemble, les enzymes de restriction coupent un brin à un endroit précis, défini par une suite de bases spécifique, et les polymérases fabriquent des copies des brins. On dispose aussi, grâce aux développements de la biologie moléculaire, de nombreuses **techniques de séparation et de purification de l'ADN.**



*L'ordinateur à ADN Maya 2 qui joue au Morpion  
Merci à Neotrouve, lepost.fr*

Les systèmes de calcul utilisant de l'ADN s'appuient sur des mécanismes de codage fondamentalement différents de ceux de l'ordinateur conventionnel (*voir Codes et information*). Dans ce dernier, l'information codée est transportée par des électrons au sein de dispositifs de commutation électroniques. Dans les ordinateurs à ADN, l'information est traduite par des fragments chimiques de l'ADN. Le principe du calcul consiste à synthétiser des séquences d'ADN particulières et à les laisser réagir dans un tube à essai. Puis on analyse les produits de la réaction.

Les ordinateurs à ADN ont d'abord suscité de l'enthousiasme en vue de remplacer les ordinateurs à puces à silicium. Car contrairement au silicium, les concepteurs mettaient en avant que l'ADN est un "matériau" abondant et bon marché. En plus, l'industrie de la puce à ADN n'est pas toxique et polluante comme celle du silicium. Et surtout, ils étaient fascinés par le volume

théorique réduit de la mémoire, puisque 500 g de puce d'ADN suffiraient à contenir l'information totale stockée sur tous les ordinateurs du monde. Un ordinateur à ADN de la taille d'une goutte d'eau serait plus puissant que le plus puissant des superordinateurs d'aujourd'hui.

Plusieurs difficultés pratiques ont aussi tempéré l'enthousiasme initial. D'abord, l'hybridation de l'ADN est un mécanisme infiniment lent par rapport à la fréquence des horloges des microprocesseurs actuels. En outre, plus le problème est complexe, plus le nombre de brins différents est grand: le volume d'ADN nécessaire croît souvent plus qu'exponentiellement avec la taille du problème à résoudre... Enfin, les enzymes utilisées pour manipuler l'ADN font parfois des erreurs. Les méthodes de séparation et de purification ne sont pas parfaites non plus, et elles sont d'autant plus complexes que le nombre de brins à séparer est grand... Dans l'avenir proche, le principal intérêt du calcul avec l'ADN résidera à mon avis sur un autre terrain: l'assemblage d'ordinateurs électroniques à l'échelle moléculaire. (*Bernard Yurke*)

## Ordinateurs à ADN en plaquettes

Les efforts portant sur la mise en réseau de l'ADN à l'échelle moléculaire se poursuivent et ont abouti à des premiers résultats fonctionnels. L'ADN est piloté pour être assemblé selon une disposition contrôlée. Cette disposition peut alors servir de trame sur laquelle se positionnent les composants électroniques.

Une *équipe d'IBM* a récemment (2009) imaginé de déposer sur du silicium un long ruban d'ADN selon des formes précises simples (triangles, carrés, étoiles), qu'elle a appelées origami. Dans ce cas, l'ADN n'est pas le composant actif. Il sert d'échafaudage sur lequel on peut disposer les nanotubes de carbone, les nanofils ou les nanoparticules.



Dès 1987, Bruce Robinson, de l'université de Washington, et Nadrian Seeman avaient proposé d'assembler un réseau de mémoire à l'aide d'ADN. Ils imaginaient que des blocs d'ADN pourraient s'assembler en réseaux cristallins tridimensionnels. Ces blocs porteraient les molécules analogues à des composants électroniques, fils électriques ou commutateurs par exemple, auxquelles les chimistes songeaient déjà à l'époque (voir l'article de C. Joachim, J.P. Launay et R. Companó). Leur proposition était toutefois restée **théorique**, faute de composants moléculaires adéquats, et faute de savoir concrètement comment assembler des blocs d'ADN.

Comment concrètement passer des calculateurs à ADN à l'assemblage de nanostructures? L'idée originale de B. Robinson et de N. Seeman était d'utiliser des blocs tridimensionnels. Nous n'en sommes pas encore là, et nous nous contentons pour l'instant, ce qui n'est déjà pas si mal, d'apprendre à assembler des blocs bidimensionnels, des structures nommées tuiles d'ADN imaginées par Erik Winfree, de Caltech. **Une tuile d'ADN est formée de deux doubles hélices entrecroisées**: chaque brin d'une double hélice devient à un endroit membre de l'autre double hélice. À leurs extrémités, les deux doubles hélices se prolongent chacune par deux brins simples, qui ne sont pas complémentaires l'un de l'autre, et qui peuvent donc s'hybrider avec des brins portés par d'autres tuiles.

Avec deux types de tuiles d'où émergent des brins complémentaires (dont les attaches sont de même couleur), Erik Winfree et l'équipe de Nadrian Seeman, à l'université de New York, ont, les premiers, fait croître en 1998 des **feuilletés d'ADN** qui ont la régularité d'un réseau cristallin simple. Avec plus de tuiles et des règles d'interaction un peu plus complexes, on peut construire des structures plus élaborées. On y parvient en choisissant un ensemble approprié de séquences de bases pour les différents brins d'accrochage des tuiles. Les tuiles peuvent ainsi être programmées pour réaliser un calcul ou, ce qui revient au même, pour former un pavage prédéterminé... Ce pavage d'ADN peut être utilisé comme support d'un circuit électronique, en accrochant sur les tuiles les composants adéquats.

Comme une double hélice d'ADN a un diamètre de 2 nanomètres, et que deux bases successives sont espacées de 0,34 nanomètre, les tuiles d'ADN ont réellement une taille nanométrique. Celles d'E. Winfree et N. Seeman ont des dimensions de 2 nanomètres par 4 et par 13: c'est beaucoup plus petit que la largeur des transistors actuels, qui atteint environ 100 nanomètres. Comme les molécules utilisables comme composants ont une longueur de l'ordre du nanomètre, on peut envisager de placer dans des microprocesseurs moléculaires une densité de composants beaucoup plus grande que dans les microprocesseurs actuels.([Bernard Yurke](#))

## L'ordinateur à ADN qu'on peut avaler

Des scientifiques et ingénieurs d'une compagnie privée de recherche en Nouvelle Zélande sous la direction du physicien Graem Brown, ont pu faire fonctionner des programmes sur un minuscule cristal d'ADN pharmaceutique de seulement 20 nanomètres de large. Cette puce doit être avalée ou insérée dans le corps. Elle est programmée pour détecter les mutations génétiques et les déficiences. On a peu d'informations sur cette réalisation, car les fabricants invoquent la confidentialité. (*Références: [Research Company Makes International Breakthrough](#), 17 October 2006; [DNA computer chip hits world](#), 21/02/2008*)

## L'ADN est électrique, et après?

Le caractère électrique de l'ADN est bien établi. Les applications électroniques et informatiques sont déjà opérationnelles. On ne peut qu'être ébloui par l'ingéniosité des cerveaux qui produisent de telles connaissances scientifiques et techniques. **La révolution informatique a complètement bouleversé l'aspect pratique de notre vie**. Quelle merveille que l'outil internet, par exemple, grâce auquel je peux mettre ces connaissances à votre disposition. Ce n'est possible que grâce aux puces qui sont les cerveaux des ordinateurs.

Toutefois, on peut aussi être inquiet car **cette science s'emballe et ne s'accompagne pas de la conscience**. Les chercheurs et ingénieurs qui la produisent n'ont pas forcément des intentions néfastes,

bien au contraire. Ils ont souvent la curiosité et l'ingéniosité d'enfants qui s'amuse à manipuler la matière et s'émerveillent de sa force et de ses ressources. Cet esprit d'ouverture et de spontanéité est une grande qualité qu'on souhaite à tout adulte. C'est lui qui conduit à comprendre les forces à l'œuvre dans l'univers. C'est lui qui permet de mettre en évidence des phénomènes qui ne s'accordent pas aux théories en vigueur et à les dépasser.

Mais souvent aussi, les chercheurs sont sous la **dépendance d'institutions** et espèrent en obtenir des récompenses pour leurs travaux (sous forme de réputation, de reconnaissance, de contrats, d'invitation dans des grands colloques, etc.). De cette façon, leurs recherches sont orientées. Leurs découvertes sont exploitées par des groupes dont le but n'est pas le bien-être de l'humanité. On peut s'en apercevoir par le nombre croissant de scandales rendus publics parmi les industriels, les financiers, les commerciaux et les politiques.

Beaucoup des inventions électroniques de télécommunication de ces dernières années permettent que **nous soyons suivis, surveillés et contrôlés en permanence** (par exemple l'ordinateur branché sur internet, le téléphone cellulaire (portable), les cartes de crédit, les puces d'identification). C'est encore plus inquiétant quand on nous demande d'ingérer ou d'être inoculé par des substances que nous ne pouvons pas vérifier. Les nanotechnologies permettent de fabriquer des dispositifs invisibles à l'œil nu et certains peuvent être inclus dans des liquides. L'amélioration de notre confort matériel par ces technologies n'est qu'un phénomène secondaire.

Faut-il s'en offusquer? Non. **Le monde est celui que nous nous construisons**. Notre vie extérieure est le reflet de notre vie intérieure, et c'est d'abord en observant profondément en nous, en découvrant et transformant nos idées préconçues et nos blessures émotionnelles que nous pourrions changer la façon dont les découvertes scientifiques sont orientées et exploitées. (*voir [Ma vie, reflet de mes pensées](#)*)

Si l'on envisage l'ADN, non comme une matière à manipuler, mais comme un fantastique outil électrique de notre corps, il se dévoile sous un nouveau jour. Les molécules n'apparaissent plus seulement comme des objets mécaniques qui se rapprochent et s'emboîtent comme des légos ou comme des clés et des serrures. Elles sont **extraordinairement vivantes**. À l'intérieur, des charges électriques circulent et induisent des réactions énergétiques. Elles provoquent des rapprochements, des éloignements sélectifs dans le temps et dans l'espace. Elles modifient l'état énergétique des atomes, état qui se transmet à d'autres atomes, ce qui induit des **émissions électromagnétiques**. Par ces échanges, les électrons et les photons transmettent des **informations** entre les cellules. Ce sujet est traité dans le chapitre suivant.

## 5. L'ADN électromagnétique et la communication entre cellules

**Résumé:** Depuis une centaine d'années, des scientifiques de plusieurs pays (Gurwitsch, Kaznacheev, Gariaev, Inaba, Popp, et d'autres) ont montré que les organismes vivants émettent de la lumière (biophotons) à très faible intensité. Tel un laser, l'ADN est à la fois la source et le lieu de stockage de ces photons. L'ensemble des biophotons de l'organisme constitue un champ cohérent porteur d'information, sous forme d'hologrammes, qui dirige les processus vitaux de l'organisme et maintient son intégrité. Grâce à ces rayonnements, les cellules communiquent entre elles et envoient des informations sur leur état énergétique et sanitaire. D'autres informations constituent un code génétique électromagnétique holographique qui assure et coordonne le développement de l'organisme. Cela explique des phénomènes inexplicables par la génétique moléculaire comme la différenciation des cellules. Des applications pratiques de ce phénomène ont été conçues pour évaluer la qualité des aliments et améliorer l'état de santé des êtres vivants par des techniques non destructrices.

Depuis la découverte de l'ADN dans les années 1950, sa présence dans le noyau de nos cellules est bien connue, ainsi que sa fonction comme support du code génétique. Les enseignements universitaires et les médias diffusent abondamment les représentations de la constitution chimique et de la structure de cette molécule, faites de 2 brins enroulés en une double hélice. Pourtant, ce n'est là qu'un aspect limité de l'ADN.

Dans les chapitres 2 et 3, j'ai présenté des descriptions complémentaires qui montrent que l'expression du code génétique est sous le contrôle d'autres facteurs et que son rôle doit être nuancé. Ces études novatrices sont toutefois encore issues de la représentation habituelle moléculaire de l'ADN et des gènes.

Dans le 4<sup>e</sup> chapitre, dépassant ce cadre, nous avons découvert la constitution électrique de l'ADN. Une molécule y est vue comme un assemblage d'atomes où chaque atome est constitué d'un noyau chargé d'électricité positive et d'électrons de charge négative qui gravitent autour. Une molécule est donc un volume plein d'électricité. Cette électricité est responsable des interactions d'attraction et de rejet entre molécules. Nous avons décrit ces influences électriques dans leur aspect statique ou stationnaire.

Dans le présent chapitre, nous poursuivons la description de la nature électrique de la molécule d'ADN, cette fois dans son aspect dynamique, producteur de rayons électromagnétiques et d'échanges entre les atomes et les molécules. Nous montrons comment par ces échanges les molécules reçoivent et émettent des informations et comment certaines de ces informations constituent un code génétique complémentaire de nature électromagnétique.

### La matière émet des rayons électromagnétiques

La science physique a établi que toute matière est constituée d'atomes dont la position peut être fixe comme dans les solides, ou en mouvement comme dans les liquides et les gaz (*voir Géométrie cristalline*). Elle précise que dans les solides, la position fixe n'est qu'une moyenne et que les atomes oscillent autour de cette position moyenne. Ils sont en perpétuelle vibration. **La matière, bien loin d'être inerte, est le siège de mouvements intenses de ses atomes et des charges électriques** dont ils sont constitués. De ce fait, elle émet en permanence un ensemble de rayonnements électromagnétiques de fréquences variées.

Les atomes vibrent plus ou moins fortement selon leur température. On peut même dire que c'est la force de cette vibration qui crée la chaleur. **Par sa température même, tout objet est émetteur de rayonnements calorifiques.** Ce sont des rayonnements électromagnétiques dont les fréquences sont situées dans la gamme de l'infrarouge, ce qui signifie qu'elles sont inférieures à celles du rouge visible. Un exemple commun est celui des chauffages électriques à réglettes qui chauffent en émettant de la lumière infra-rouge non visible, accompagnée d'un peu de lumière rouge. On les voit donc rougir quand ils chauffent.

De même, **les organismes vivants à sang chaud, animaux et corps humains, produisent leur**

**propre chaleur interne** qui rayonne tout autour de leur peau. De ce fait, ils émettent des rayons infrarouges. On peut les détecter à distance avec des lunettes détecteurs d'infrarouges et on peut ainsi photographier les corps chauds la nuit avec une caméra à sensibilité infrarouge. Cela indique que les rayons infrarouges émis parviennent au moins jusqu'à la caméra. Ils sont bien réels et très courants.

Aussi, énoncer que **la matière émet de la lumière et d'autres rayons électromagnétiques** n'a rien de nouveau ni de surprenant. Cela n'empêche pas de s'en émerveiller. Sous l'effet de la chaleur, les atomes vibrent indépendamment les uns des autres de sorte que les rayons émis ne sont ni coordonnés ni synchronisés les uns avec les autres. On dit que ces rayonnements sont **incohérents**. Ils sont comme une multitude de personnes dans une foule qui parlent indépendamment les unes des autres et créent un brouhaha.

Or, depuis environ une centaine d'années, des chercheurs ont découvert que les organismes vivants émettent également des rayonnements **cohérents** ou partiellement cohérents, comme des chanteurs qui participent à la même œuvre musicale. Bien que les rayons proviennent de différents groupes d'atomes, et de différentes cellules, ils sont coordonnés et synchronisés. **C'est ce caractère de cohérence**, ou si vous préférez, de **coordination**, qui est remarquable et novateur. En réalité, il a été signalé dès les années 1920, mais il n'a pas reçu d'audience large, y compris auprès de la plupart des scientifiques. L'objet de cet article est de contribuer à combler cette lacune, dans une modeste mesure, en puisant dans les écrits d'auteurs spécialisés et assez difficiles à comprendre, auxquels j'ai emprunté.

Voici l'histoire de la découverte des rayonnements électromagnétiques cohérents dans les organismes vivants.

## Les radiations d'Alexander Gurwitsch

L'histoire scientifique moderne de ces rayonnements commence en 1922 avec un biologiste russe, **Alexander Gurwitsch** (1874 - 1954). Il observe des cellules d'une tige d'ognon [note: *orthographe révisée 1990*] au stade de leur division en deux cellules-filles, selon le processus habituel de croissance



des organismes, processus appelé mitose par les biologistes. Or il constate que cette division est plus intense si la tige est placée à proximité d'un autre plant d'ognon. Il doit donc exister une sorte de rayonnement émis par le plant et reçu par l'autre, qu'il nomme **radiation mitogénétique**.

Afin de vérifier cette hypothèse, il cherche à déterminer la nature de cette radiation. Il effectue alors de nombreuses expériences et interpose des écrans divers entre les plants d'ognons. Il observe que la multiplication cellulaire s'arrête si on interpose une lame de verre. Par contre, avec une lame de quartz, elle continue. Il en déduit que la longueur d'onde de la radiation se situe dans le domaine de l'ultraviolet (de l'ordre de 260 nm), qui est arrêté par le verre mais pas par le quartz.

Merci à Wikipédia

Il en conclut que **les cellules d'ognons émettent un rayonnement ultraviolet** qui déclenche la multiplication cellulaire. Ce rayonnement est de très faible intensité, difficilement détectable avec les appareils de l'époque. Mais ses expériences ont été

confirmées par la suite dans les laboratoires Siemens à Berlin par T. Reiter et Dennis Gabor, prix Nobel de physique en 1971.

Le rayonnement ultraviolet est un rayonnement **électromagnétique** dont les fréquences sont supérieures au violet de la lumière visible. Les ondes électromagnétiques en général peuvent aussi être décrites sous forme de particules de lumière, les **photons** (voir mon article *Ondes et matière*). Comme les photons des ognons proviennent d'un organisme biologique, ils ont par la suite été nommés **biophotons** par F.A. Popp.

## 1950- 1960: découvertes sur la luminescence par des chercheurs russes et italiens

En 1954 - 55, des physiciens nucléaires italiens (*L. Colli et U. Facchini*) mettent en évidence que des plantes (froment, haricots, lentilles, orge) en phase de germination, émettent un rayonnement. Ils le détectent dans l'obscurité complète au moyen d'un appareil perfectionné pour cette époque, un **photomultiplicateur** très sensible.

Le rayonnement, bien net, se situe dans la gamme de la lumière visible, du vert au rouge. De ce fait, le



phénomène d'émission est nommé **luminescence**, ou **bioluminescence**, ou **émission spontanée de lumière**. Ces chercheurs ne prolongent pas leurs recherches, occupés par d'autres sujets. Ils ignoraient probablement celles de Gurwitsch, antérieures de 30 ans, et n'en ont pas saisi l'importance.

Dans les années 1950 - 60, plusieurs groupes de scientifiques russes étudient la présence de rayonnements et leur nature dans **une centaine d'organismes vivants différents**. Les organismes choisis vont de l'algue, la levure et la bactérie aux organismes supérieurs des plantes et des animaux. Là aussi, les rayonnements détectés se situent dans la gamme de la lumière visible. Ils sont extrêmement **faibles en intensité**, de sorte que seuls des photomultiplicateurs très sensibles peuvent les mettre en évidence et les mesurer. Les chercheurs les qualifient de **luminescence ultra-ténue**.

À partir de 1963, leurs articles paraissent dans la revue scientifique russe *Biofizika*, traduits ensuite en anglais. Les observations sont donc bien documentées et référencées. Ils en concluent que **toutes les plantes et tous les vertébrés de toutes les espèces manifestent de la luminescence**. Elle a été mise en évidence seulement dans un tiers des organismes inférieurs (algues, bactéries, levures et insectes). Toutefois par la suite, d'autres chercheurs ont détecté une luminescence même dans les organismes qui n'en montraient pas avant, tout simplement parce qu'ils ont employé des détecteurs plus sensibles, que les nouvelles technologies de fabrication de photomultiplicateurs mettaient à leur disposition. Il est maintenant reconnu que **l'émission photonique est un caractère général des organismes biologiques**.

D'une espèce à une autre, l'émission photonique varie par son **intensité**, étant plus forte pour les organismes supérieurs. Une émission comporte un éventail (un spectre) de fréquences différentes, qui lui confère une couleur. **Le spectre de fréquence est lui aussi variable d'une espèce à l'autre**.

*Pour les lecteurs qui aimeraient avoir des références concrètes, citons quelques-uns de ces chercheurs russes: il y a le professeur Anna Gurwitsch, une fille de Alexander, et aussi A.Sh. Agaverdiyev, S.V. Konev, T.I. Lyskova, T.G. Mamedov, G.A. Popov, B.N. Taruzov, V.A. Veselovskii, A.I. Zhuravlev.*

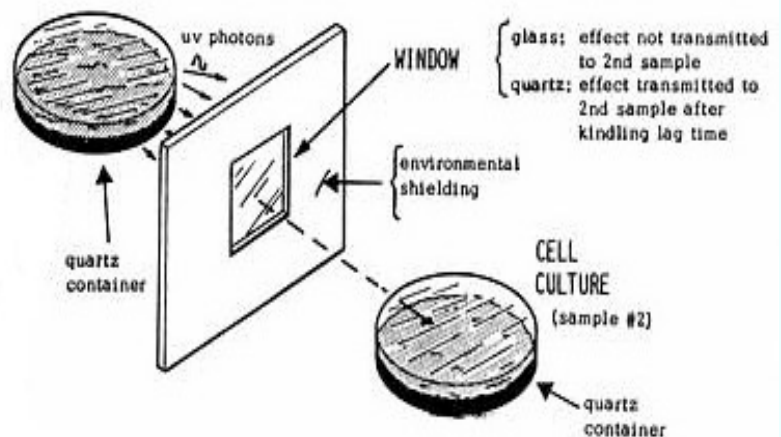
## Communication entre organismes vivants par biophotons

Le système de communication par rayonnement photonique est abondamment utilisé par les plantes, comme par exemple les tiges d'ognon, mais également par les animaux.

C'est un fait avéré que les **abeilles** ou les **termites** d'un même groupe communiquent entre eux. Des chercheurs ont mis en évidence que cette communication s'effectuait par des signaux électromagnétiques.

On sait aussi que des **insectes** peuvent communiquer entre eux sur de longues distances en émettant des odeurs, des molécules appelées phéromones. C'est ainsi que des **papillons** de nuits mâles et femelles peuvent se rejoindre même s'ils se trouvent à des kilomètres. Or le biologiste **P.S. Callahan** a découvert qu'ils localisaient **ces phéromones en détectant les photons qu'elles émettent dans la longueur d'onde des infrarouges**.

**La communication par des biophotons a été vérifiée entre cellules nerveuses** par le biochimiste **Helmut A. Fischer**. Il a montré que ce processus se produisait en complément des transmissions par médiateur chimique entre les synapses, ces prolongements tentaculaires des cellules. (*Photons as transmitters for intra- and intercellular biological and biochemical communication, The construction of a hypothesis, H.A. Fischer, dans Electromagnetic Bio-Information, 1989, Urban & Schwarzenberg*)



Expériences de VP Kaznacheev  
Merci à Tom Bearden

## Les expériences de Kaznacheev

Dès 1974, le docteur russe **Vlail P. Kaznacheev** (ou **Kaznachev**, 1924 - 2014) et son équipe de recherche (S. Stschurin, L. Michailova, etc.) à l'Institut de médecine clinique et expérimentale de Novosibirsk en Russie, mettent en évidence des **communications photoniques entre les cellules**.



Des cellules sont placées dans un tube scellé où elles baignent dans une solution nutritive. À proximité se trouve un autre tube scellé avec des cellules provenant du même tissu biologique. Lorsqu'on porte atteinte à l'une des cultures, par un virus ou un empoisonnement, on constate que les cellules du flacon voisin, bien que protégées de la transmission chimique par la paroi du flacon, deviennent malades à leur tour. C'est donc la preuve que **les cellules envoient des informations aux autres cellules**.

Les conditions de succès de cette expérience sont les suivantes. Elle a lieu dans l'obscurité. La fenêtre optique entre les deux tubes doit être en quartz. La durée du contact doit être supérieure à 4 ou 5 heures et si possible 48h. L'effet se manifeste au bout de 18 heures environ dans 70% des cas. Il n'a pas lieu si la fenêtre optique est en verre, qui arrête les ultraviolets. Après plus de 12'000 expériences, ces chercheurs ont

montré que **la communication entre cellules était effectuée par l'intermédiaire de radiations ultraviolettes** de longueur d'onde 220 nm à 360 nm (*référence, en russe: V.P. Kaznacheev, L.P. Mikhailova, Ultraweak Radiation in Cell Interactions, 1981, Nauka - Voir Tom Bearden, Extraordinary biology*).

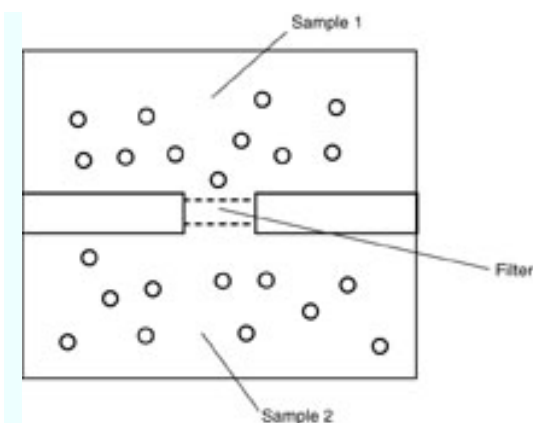
## Les expériences de Burlakov

Au cours de *recherches récentes*, le biologiste russe **Alexander B. Burlakov** et ses collaborateurs (de la Faculté de biologie, Université de Moscou) ont observé que **des œufs de poisson communiquent entre eux par photons**. Pour cela, ils ont fait l'expérience suivante.

Deux boîtes hermétiques en verre sont placées l'une au-dessus de l'autre, et séparées par une fenêtre, toujours en quartz. Chacune des boîtes contient des œufs de poisson fécondés (de loches) dans des stades divers de croissance. Au bout 20 à 24 h, on observe que les œufs se sont influencés dans leur croissance. Cette influence varie selon leurs stades respectifs de développement. Si la différence d'âge n'est pas trop grande, le développement des œufs plus jeunes est accéléré. Si par contre la différence est grande, les œufs jeunes sont retardés dans leur croissance, ils peuvent subir des déformations et une proportion d'entre eux meurent. Aucune influence n'a lieu si la fenêtre est en verre.

Dans ce cas, on a non seulement la preuve du rayonnement, mais en plus, les influences manifestées montrent que **le rayonnement transporte des informations génétiques reçues et incorporées par l'œuf récepteur, sans aucune modification chimique du génome**.

Dans une suite de ces expériences, Burlakov insère certains **filtres optiques** de différentes longueurs d'onde et des polariseurs entre les deux boîtes. Cela **provoque des altérations des poissons**, par exemple des larves à têtes multiples, à cœurs multiples, etc. Insérant d'autres filtres, il a pu rétablir correctement le programme génétique normal et les difformités ont disparu.



Expérience de Burlakov: Les œufs de poisson communiquent à travers la fenêtre de quartz  
Merci à Wolfgang Lillge

**Sources:** *Distant wave-mediated interactions in early embryonic development of the loach Misgurnus fossilis L.*, A. B. Burlakov, O. V. Burlakova et V. A. Golichenkov, *Russian Journal of Developmental Biology*, 2000, 31, 5, 287; *Biophotonic patterns of optical interactions between fish eggs and embryos*, Lev V Beloussov, AB Burlakov, N N Louchinskaia, *Indian journal of experimental biology* 2003, 41, 5, 424; *Biophysics and the Life Process*, Wolfgang Lillge, 21st Century, Summer 2001

Les mécanismes de ce transfert génétique vont devenir plus compréhensibles avec les travaux de Gariaev exposés plus bas. Mais tout d'abord, affinons notre compréhension des biophotons émis par les organismes, grâce aux travaux de F.A. Popp.

## Le rayonnement lumineux cohérent

Dans les années 1980, **Fritz-Albert Popp** (né en 1938 à Francfort) et ses collaborateurs de l'université de Marbourg en Allemagne effectuent également des mesures des photons émis par les organismes avec des appareils modernes plus sensibles et plus précis. Ils vérifient que **les photons émis sont cohérents**, c'est-à-dire qu'ils ne ressemblent pas au bavardage incohérent dû à l'émission calorifique des molécules.



Merci à  
Espiritualidade e  
Ciência

Fritz-Albert Popp a suivi des études de physique expérimentale à Göttingen et à Wurzburg, a obtenu un doctorat en physique théorique à Mayence, et occupé un poste de professeur à l'université de Marbourg de 1973 à 1980. À l'université de Kaiserslautern, il a été successivement directeur d'un groupe de recherche à l'Institut de biologie cellulaire de 1983 à 1986, puis d'un autre au Centre de Technologie, tout en fondant la société Biophotonics.

Les mesures de son équipe montrent que les longueurs d'onde des photons se répartissent de façon uniforme sur toute l'échelle de longueurs en **200 nm et 800 nm**, incluant ainsi des rayons UV (de 200 à 400 nm) et de la lumière visible (de 400 à 800 nm).

Cela prouve que ce ne sont pas des rayonnements calorifiques car à la température des cellules, on aurait des infrarouges et pas d'ultraviolets. Leur intensité est extrêmement faible, de 1 photon par seconde et par  $\text{cm}^2$  à quelques milliers. Cela explique la difficulté à les mettre en évidence. Cette intensité est toutefois 1000 fois plus forte que celle des photons dus à l'émission calorifique dans des conditions d'équilibre thermique, prouvant encore que les photons sont bien produits par un autre mécanisme.

On pourrait chercher l'origine des biophotons dans les **réactions chimiques de la cellule**. Les chimistes savent qu'il est fréquent que des photons soient émis au cours de réactions chimiques, un phénomène dénommé **chimioluminescence**. Une chimioluminescence pourrait se produire comme manifestation des nombreuses réactions du métabolisme des cellules vivantes (cette position était défendue par Zhuravlev dans sa théorie de l'imperfection en 1972 - voir encadré). Mais le taux d'occurrence des réactions de chimioluminescence dépend de la température et l'intensité du rayonnement aussi. Or Popp montre que le rayonnement qu'il mesure n'augmente pas avec la température. Ce n'est donc pas la bonne explication.

À cette époque, la technique des photomultiplicateurs limitait les examens à des échantillons biologiques de

## Histoire des biophotons

Un biophysicien russe [Zhuravlev, 1972] et un chimiste américain [Seliger, 1975] énoncent la première théorie sur l'émission photonique ultrafaible (EPUF) des systèmes biologiques, appelée théorie de l'imperfection. L'EPUF y est considérée comme l'expression d'un écart à l'équilibre [thermodynamique], une sorte de distorsion des processus métaboliques. Indépendamment les uns des autres et poussés par des motivations différentes, des groupes scientifiques mettent en évidence l'EPUF des systèmes biologiques par l'emploi d'appareils de comptage de photons isolés: en Australie (Quickenden), en Allemagne (Fritz-Albert Popp), au Japon (Inaba) et en Pologne (Slawinski). Alors que Quickenden, Inaba et Slawinski soutiennent la théorie de l'imperfection, Popp et son groupe développent une théorie opposée: **Les radiations sont issues d'un champ de photons presque parfaitement cohérents**. [...]

Le groupe de Marbourg (Popp) a appelé ce phénomène *biophotons*. **Les biophotons sont des quantas d'énergie émis de façon continue et permanente par tous les systèmes vivants**. Ils répondent de la physique quantique et ils sont la manifestation d'un phénomène universel attribué à tous les systèmes vivants. Tous les scientifiques qui adhèrent à cette vision de par le monde nomment cette radiation **biophotons** et son domaine de recherche la **biophotonique**. [...]

Dans d'autres pays, des groupes scientifiques d'instituts et universités réputés - autour d'Inaba et Hamamatsu (Japon), Li, Chang et Shen (Chine), Slawinski (Pologne), Anna Gurwitsch et Lev Beloussov (Russie), Mishra et Bajpai (Inde), Fröhlich, Hyland, Ho (Angleterre), van Wijk (Hollande), Musumeci (Italie), Fox, Jahn and Puthoff (USA) - se sont vivement intéressés à la biophotonique et ont commencé à coopérer et ont fondé l'Institut International de Biophysique (IIB) à Neuss (Allemagne), où la Biophotonique est devenue un projet de recherche et d'enseignement commun.

*Extraits d'un article de F.A. Popp et l'Institut International de Biophysique.  
Traduction A. Boudet*

petite dimension tels que des fragments de tissus cellulaires ou des graines. Plus tard, le développement de capteurs issus d'une autre technologie basée sur les semi-conducteurs, les capteurs CCD (Charge-Coupled Device ou dispositif à transfert de charge) ouvre de nouvelles perspectives. En 2009, **Masaki Kobayashi**, un physicien à l'Institut de Tohoku à Sendai au Japon réussit avec ses collaborateurs à photographier l'émission de biophotons sur toute la surface du corps humain au repos. Ils confirment que l'émission de biophotons n'est pas corrélée à la température ni à l'émission de rayonnements infrarouges.

Les mesures révèlent que la **cohérence** est forte. Si les photons étaient des sons, cela ferait une musique orchestrée avec quelques instruments dissidents ou distraits, non pas un brouhaha de voix. Lorsque l'épaisseur du tissu biologique augmente, la cohérence augmente aussi.

Cette cohérence implique que les biophotons transportent des informations et les transmettent à d'autres cellules. **Par les biophotons, les cellules échangent des informations** de natures diverses concernant l'état des cellules et la régulation des réactions biochimiques.

## Indications sur l'état sanitaire d'une cellule

Dans les années 1950 - 60, les chercheurs russes remarquent que lorsqu'un système biologique est soumis à une destruction (chauffage, congélation, empoisonnement), son émission photonique augmente, comme s'il envoyait un avertissement. Cette émission cesse à la mort du système.

Les chercheurs russes des années 70 (S. Stschurin, V.P. Kaznacheev et L. Michailova que nous avons présentés *plus haut*) ont constaté que **l'intensité du rayonnement cellulaire change quand la cellule est agressée, endommagée ou qu'elle meurt**.

Les cellules vivant normalement émettent un courant lumineux constant. Lorsqu'un virus pénètre dans les cellules, le rayonnement se modifie: augmentation du rayonnement, puis silence, puis nouvelle augmentation, puis extinction progressive du rayonnement en ondes multiples jusqu'à la mort des cellules. *[Cité par F.A. Popp, Biologie de la lumière]*

En 1974, Stschurin énonce: *Les cellules touchées par différentes maladies ont des caractéristiques de rayonnement différentes. Nous sommes persuadés que les photons sont capables de nous informer très tôt avant le début d'une dégénérescence pernicieuse et de révéler la présence d'un virus.*

Dans les années 1980, Nagl (biologiste), Popp et Li ont établi des théories fondamentales sur la relation entre les biophotons et la croissance des cellules, sur les différences d'émission entre des cellules saines et des cellules cancéreuses. Ils ont fait l'hypothèse que la figure de diffusion des photons des cellules contient l'information sur la présence d'une infection virale ou bactérienne. Ceci a été confirmé par des scientifiques du laboratoire national de Los Alamos (USA). Le virologue Lipkind a trouvé les premiers éléments indiquant la présence d'une infection virale par les biophotons (*Institut International de Biophysique, Research and History, traduction A.B*)

Le rayonnement est fonction de l'état de la cellule. Les informations incluses dans les biophotons rendent compte de l'état énergétique de la ou des cellules émettrices. L'émission d'une cellule saine est calme, comme une rivière tranquille. Selon les recherches de F.A. Popp, si on blesse une plante, d'autres plantes semblables placées autour en sont averties, même si elles sont éloignées. Tout dérangement augmente la production de rayonnement, comme si une activité de réparation se déclenche.

Il est probablement possible de déterminer l'état de santé d'un tissu biologique et aussi d'un organisme entier par les caractéristiques de ses émissions photoniques. La santé semble se manifester par une communication d'information aisée et abondante à l'intérieur du corps, tandis que la maladie consisterait en un appauvrissement de ce flux d'information.

## Analyse de la qualité des tissus biologiques

La mesure du flux de biophotons émis par un organisme permet d'en tirer des informations sur l'état de santé ou de déséquilibre énergétique de cet organisme. Cette méthode est un complément prometteur des autres méthodes d'analyse biologique, car elle a l'avantage de ne pas introduire de produits dans l'organisme, ni de faire des prélèvements, de sorte qu'elle ne le perturbe pas.

Sur cette base, plusieurs types d'appareils ont été conçus, d'abord à l'Institut International de Biophysique de Neuss en Allemagne, ou mis au point dans divers secteurs de l'industrie en Europe et au Japon, pour évaluer l'état sanitaire de végétaux, d'animaux, ou du corps humain.



## Maladies et vieillissement cellulaire

Selon de nombreuses études, incluant celles de Popp et d'autres en Australie, en Pologne et au Japon, on peut détecter l'état cancéreux d'un groupe de cellules en mesurant ses émissions de biophotons. Sur une biopsie (tissus prélevés dans l'organisme), on peut distinguer les cellules tumorales (cancéreuses) des cellules saines, déterminer leur degré de malignité et évaluer leur réponse énergétique à des substances médicamenteuses.

Lorsqu'on stimule des cellules par la lumière, la bioluminescence augmente puis décroît. Popp, VanWikj et d'autres ont mesuré qu'**un groupe de cellules cancéreuses n'émet pas les mêmes rayonnements que les groupes de cellules saines**. La vitesse de décroissance est beaucoup plus grande dans les cellules malignes, ce qui indique que leur capacité de stockage en biophotons est réduite. De plus les biophotons ont perdu une bonne partie de leur cohérence. Si on compare l'émission par des tissus d'épaisseur croissante, elle augmente dans le cas de cellules normales et diminue dans le cas de cellules tumorales.

Par la même technique, il est possible d'évaluer le vieillissement cellulaire et l'état du sang.

Des chercheurs japonais (Kobayashi et coll.) ont construit une chambre noire munie d'un système de comptage pour le corps entier. Ils ont mis en évidence que l'émission de biophotons du corps suit en tous points le rythme naturel biologique. Lorsqu'il y a des déviations, elles indiquent une maladie.

## Qualité des aliments et cosmétiques

Une des applications les plus immédiates est l'évaluation de la qualité de la nourriture. Popp et ses collaborateurs ont fait de nombreuses mesures pour comparer les émissions de substances en fonction de leur mode de culture ou d'élevage, leur durée de stockage, leur contamination par des produits toxiques tels que les métaux. **La qualité des aliments s'évalue en termes de faculté d'emmagasiner de lumière**.

Par exemple, on a comparé l'émission photonique d'œufs de poules vivant en liberté à celle d'œufs de poules vivant en cage. Dans le premier cas, les photons étaient beaucoup plus cohérents.

La technique est également très utile pour évaluer la qualité des produits cosmétiques. On peut aussi évaluer leur innocuité avant de faire des tests biologiques sur les organismes, en particulier sur les animaux.

L'aspect de l'émission photonique d'un organisme végétal, animal ou humain donne des indications sur une éventuelle **contamination par des bactéries ou des virus**. Une application industrielle a été réalisée avec un fabricant de bière sur les mélanges de houblon fermenté.

## L'ADN, un laser à photons

La forte **cohérence des rayonnements de biophotons** indique qu'ils sont émis par des **émetteurs coordonnés**. Il restait à trouver quelle est la source de production d'un tel rayonnement dans les cellules. Nous allons retrouver l'ADN. Afin de vérifier quelle était la ou les sources des photons corrélés, Popp et ses collaborateurs ont effectué des expériences supplémentaires.

Ils ont irradié des tissus biologiques avec des rayonnements lumineux. Lorsqu'on soumet des tissus biologiques vivants à un rayonnement lumineux, la matière est excitée et émet une plus grande quantité de biophotons. Lorsque cette illumination cesse, l'émission ne s'arrête pas brusquement, mais décroît plus ou moins rapidement. On peut observer de quelle manière elle décroît, à quelle vitesse. Les résultats recueillis par Popp et coll. démontrent que la décroissance est typique d'une **source qui vibre**, par exemple un fragment de molécule.

*Georges Lakhovsky* (1869 - 1942), un scientifique et ingénieur d'origine russe qui vivait en France, a été le premier à mentionner que les cellules et leurs noyaux pouvaient être considérés comme des oscillateurs biologiques. Ils se transmettent des informations en émettant des ondes électromagnétiques.

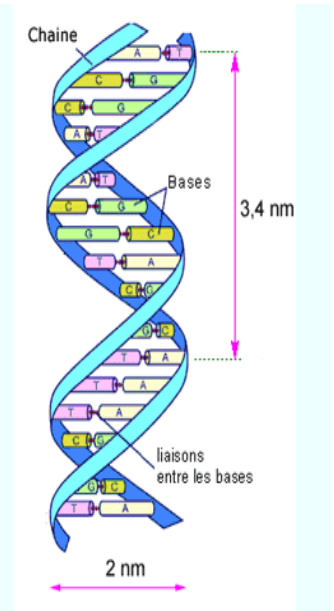
L'équipe de Popp avait l'impression que cette source vibrante devait inclure la molécule d'ADN. Pour s'en assurer, ils ont modifié l'ADN chimiquement avec du bromure d'éthidium pour voir si cela avait un impact sur la décroissance de la bioluminescence. L'ADN est normalement enroulé en hélice, mais il se déroule sous l'influence du bromure d'éthidium. Or on constate que parallèlement, la bioluminescence baisse. Il y a une relation de cause à effet bien visible entre la conformation de l'ADN et la bioluminescence. **L'ADN est la source primaire et essentielle de l'émission biophotonique ultraténue**.

Popp et ses collaborateurs ont démontré que des photons s'accumulent dans des petites cavités de la molécule, les exciplex. En gros, ces cavités sont constituées de deux bases se faisant face sur les 2 brins. Les exciplex **fonctionnent comme des lasers**. Un laser est une cavité qui résonne à une fréquence de la lumière, comme un son peut résonner dans un récipient creux. En résonnant, **cette micro-cavité accumule cette lumière de façon cohérente**. Puis **elle la projette en faisceau** à l'extérieur.

L'ADN accumule les biophotons, les guide le long de sa structure hélicoïdale et les projette en-dehors. Dans les années 60, Eisinger et Schulman avait déjà établi que l'ADN conduit les photons.

À ce stade de notre étude, les molécules n'apparaissent plus seulement comme des volumes mécaniques légèrement plastiques qui s'emboîtent comme des légos, se séparent et voyagent au cours des réactions chimiques. **Les molécules d'ADN sont parcourues de mouvements électrodynamiques internes innombrables**. Des charges électriques et des photons circulent dans la molécule, sont transmis à d'autres atomes, en modifiant l'état et induisent des émissions électromagnétiques. Elles sont **extraordinairement vivantes**.

Les ondes téléphoniques ou radiophoniques de notre quotidien sont aussi des ondes électromagnétiques, des photons qui transmettent des signaux qui sont décryptés en sons dans les appareils d'écoute. De la même façon, par son rôle de conducteur de photons, l'ADN peut être qualifié d'**antenne électromagnétique** qui reçoit et transmet des informations. Il en a les caractéristiques: à la fois allongé comme une antenne droite qui peut très bien capter les impulsions électriques, et circulaire (vu de bout) pour être une excellente antenne magnétique. C'est un oscillateur.



*Structure de la molécule d'ADN  
Les 2 brins sont enroulés en hélice autour d'un axe commun, et réunis par des liaisons horizontales entre bases azotées*

## Régulation de réactions chimiques

En plus de l'état sanitaire des cellules, les biophotons peuvent véhiculer des informations pour indiquer ou déclencher une "action" à effectuer, telle qu'intensifier ou diminuer une réaction chimique.

La vie normale des cellules se manifeste par des réactions chimiques qui en maintiennent l'intégrité et assurent son fonctionnement et sa croissance. Les réactions chimiques sont principalement déclenchées (catalysées) et régulées par des enzymes, une catégorie de protéines. Or, on compte environ 100'000 réactions par cellule et par seconde qui font intervenir environ 10'000 enzymes. Comment ces innombrables réactions peuvent-elles être coordonnées pour aboutir à des actions coordonnées qui maintiennent l'organisme en bonne santé et assurent son adaptation à l'environnement et son développement?

La réponse se trouve dans le rôle des biophotons. Ils transportent les instructions qui permettent aux enzymes de savoir quand et où agir, en fonction de l'état physiologique de l'organisme et de son évolution. L'énergie qu'ils transportent peut parfois assurer l'activation d'une réaction. Le photon n'est pas le produit de la réaction comme il a été suggéré, mais son déclencheur. En stockant et émettant des biophotons, l'ADN peut donc diriger à distance les processus métaboliques de la cellule et fournir l'énergie nécessaire.

*La quantité impressionnante de matériaux expérimentaux accumulés nous permet de fournir une image convaincante de la réalité de ces interactions électromagnétiques intercellulaires, c'est-à-dire de bio-information électromagnétique... Elle ouvre la possibilité de découvrir des solutions aux questions biologiques fondamentales comme l'évolution, la croissance, le vieillissement et le développement de nouvelles particularités." (V.P. Kaznacheev, L.P. Mikhailova, Ultraweak Radiation in Cell Interactions, 1981)*

## Le champ de biophotons imprègne l'organisme

Un organisme vivant est constitué d'une multitude de cellules. Chacune des cellules contient de l'ADN qui émet ses biophotons. Au total, c'est un immense flux de biophotons qui imprègne les cellules et les organes. Il constitue une sorte de **mer de photons** (on dit aussi un **champ de biophotons**).

Les biophotons en provenance de toutes les cellules d'un même organisme ne sont pas cacophoniques, ils sont orchestrés. Cela signifie que les molécules d'ADN émettent de façon concertée. Le champ de biophotons est à la fois le résultat de l'ensemble des photons et aussi un champ enveloppant collectif qui assure la cohérence et l'unité du système biologique.

On peut comparer cette communication au système de synchronisation d'une population de fourmis qui travaillent toutes à l'organisation commune, grâce l'information qu'elles reçoivent chacune de la part du champ collectif créé par elles.

Le champ de biophotons est porteur d'informations complexes qui circulent entre cellules et organes. Il **dirige et coordonne toutes les activités métaboliques et de transformation**. En introduisant la notion de champs énergétiques et ondulatoires, la biologie sort des descriptions basées uniquement sur des réactions chimiques et rejoint la nouvelle physique qui utilise le concept de champ d'informations.



Dr Mae-Wan Ho  
Merci à Institut of Science  
In Society

**L'émission continue de biophotons est une caractéristique fondamentale du vivant.** Le champ de biophotons est produit en permanence et se modifie sans cesse. Dans son livre *The rainbow and the Worm*, la **Dr Mae-Wan Ho** (Chine et Angleterre) explique que le champ de photons est semblable à un fluide, comme l'eau dans un récipient, mais fait de consistance lumineuse. De la sorte, il peut être animé de vagues. Il envoie des ondes de biophotons dans son environnement.

### Le biochamp, champ énergétique informationnel des organismes biologiques

L'existence de champs de rayonnements englobant et imprégnant les organismes biologiques a été proposée par de nombreux biologistes et physiciens. L'idée de coordination cellulaire par un champ a été étudiée par **Herbert Fröhlich** à Liverpool à partir de 1968 et **Renato Nobili** à Padoue à partir de 1985. **Northrup** décrit un champ électrodynamique qui est créé par ses composants atomiques et qui réagit sur les propriétés de ces composants.

Le concept de **champ morphogénétique** (qui engendre les formes) a été développé d'abord par **Gurwitsch** en 1922 et **Weiss** en 1926, puis par **Rupert Sheldrake** (biochimiste britannique né en 1942) dans les années 1980. En France, le mathématicien **Emile Pinel** (1906 - 1985) a prédit mathématiquement l'existence d'un champ global à 9 composantes qui régit la vie des cellules. (*voir mon livre numérique Une autre histoire de la Terre*)

D'autres ont montré la réalité physique du champ par les traces détectables qu'il manifeste lorsqu'il est sollicité:

Dans les années 1940, **Harold Burr** a mesuré le champ électrique généré par et autour des corps vivants de salamandres, grenouilles, moisissures et humains. Il a montré que le champ électrique des œufs de salamandres, entre autres, prend dès l'origine la forme du champ électrique d'une salamandre adulte. C'est comme si l'œuf avait déjà l'information de sa morphologie adulte.

La technique moderne de mise en évidence de champs particuliers est issue des travaux de **Seymon et Valentina Kirlian**. Elle consiste à soumettre l'organisme étudié à une tension électrique et à capter sur film photographique les effluves électriques et lumineuses qui sont produites autour de l'organisme. Cette technique a été modernisée, informatisée par le Dr **Konstantin Korotkov**.

Le collaborateur des Kirlian, **Víctor Adamenko**, a découvert en 1966 que le champ pouvait rester présent quand la feuille a été découpée, même dans les parties manquantes. Ce n'est pas le cas pour les parties évidées à l'intérieur. L'expérience a été reproduite dans plusieurs laboratoires, dont celui du Dr P. Gariaev en Russie.



Effet fantôme sur une feuille  
coupée. Photographie de type  
Kirlian  
Merci à Noëlle

Voir également en **annexe**: *Le champ fantôme de l'ADN*

## Le code génétique holographique



Dr. Peter Gariaev  
Merci à Wave  
Genetics

Le Dr. **Piotr (ou Peter) Gariaev** (1942 - 2020) et son équipe, de l'Académie russe des Sciences naturelles et de l'Académie des Sciences médicales, ont étudié la nature et le fonctionnement du champ vibratoire créé dans l'organisme par l'ADN, à la fois par la théorie et par l'expérience. Leur apport essentiel est de montrer que **ce champ porte les informations génétiques d'organisation et de coordination du fonctionnement des cellules**. En somme le génome comporte une partie moléculaire, celle des gènes que nous connaissons, et une partie ondulatoire, le génome ondulatoire ou **supergène**.

En outre, ils ont montré que **ce champ a les caractéristiques d'un hologramme**. La notion d'**hologramme** est apparue en physique lorsqu'on a découvert des figures lumineuses transmises par un objet éclairé, et que ces figures ont été enregistrées sur film photographique. Ces figures ne se présentent pas comme une image directe de l'objet tel qu'on le voit, mais sous forme de graphiques - des hologrammes - composés des interférences que fait la lumière qui l'éclaire (*voir en annexe*).

L'hologramme a l'avantage étonnant de conserver l'image de l'objet en 3 dimensions et de pouvoir la restituer. De plus, **chaque partie du graphique contient les informations de la totalité de l'objet**. C'est pourquoi il a été nommé hologramme, ce qui signifie diagramme de la totalité.

L'idée que des hologrammes sont présents dans les organismes vivants et portent des informations a déjà été avancée par le neurobiologiste **Karl Pribram**, suivi par d'autres équipes. Il a démontré que **les souvenirs sont enregistrés non pas dans la matière du cerveau, mais dans son champ holographique** (*voir en annexe*).

En accord avec les propositions de l'équipe de Gariaev, **W. Schempp** et **P. Marcer** ont montré que **l'ADN a une fonction de stockage des informations et que sa capacité est considérable** (*A mathematically specified template for DNA and the Genetic Code in terms of the physically realisable processes of Quantum Holography, 1996, Proc. Symposium Living Computers, University of Greenwich*). En outre, c'est à partir de ces concepts que Schempp a grandement perfectionné la technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui est adoptée internationalement, ce qui montre que l'hologramme n'est pas seulement une hypothèse théorique, mais une réalité physique.

Les études de Schempp montrent que **les hologrammes sont inscrits dans le plan des paires de bases de la double hélice**. Voilà enfin une réponse à la question de savoir pourquoi la molécule d'ADN comporte 2 brins qui portent la même information génétique. C'était incompréhensible selon le code génétique moléculaire classique.

Gariaev conçoit **le génome des organismes supérieurs sous forme d'une grille holographique**. Les hologrammes de l'ADN contiennent les codes fondamentaux du développement et de la forme complète de l'organisme, même quand l'organisme est à l'état d'embryon. On peut dire qu'ils sont le Soi de l'être vivant.

### Langage fractal

Le champ vibratoire holographique s'appuie sur la structure entière de l'ADN et surtout sur les 98,7% non-protéinocodant, qui détiennent donc un rôle fondamental (*voir chapitre 3*). On a vu que ces parties ont une structure fractale. Cette caractéristique est transmise dans les hologrammes porteurs des informations génétiques issues de ces parties. Cela signifie que les informations fonctionnent sur plusieurs échelles.

Gariaev insiste sur l'existence de synonymes dans les séquences de l'ADN. Par exemple, dans un codon dont on a lu les 2 premières lettres A et G, comment distinguer AG et GA, et comprendre le sens de la troisième lettre? C'est, dit-il, le contexte qui lève l'ambiguïté, comme dans le langage humain. Ce contexte est donné par le champ holographique.

### L'ADN est un bio-ordinateur

**En tant qu'antenne émettrice, l'ADN d'un chromosome d'une cellule peut envoyer des indications aux autres cellules**. Ces indications sont émises lorsque l'ADN est interrogé par les biophotons qui parcourent l'organisme. Ce mécanisme a été vérifié expérimentalement en envoyant un faisceau laser sur de l'ADN (*voir ci-dessous*).

Certains hologrammes interrogés comportent les informations concernant la nature essentielle de l'être



vivant. D'autres contiennent des **informations sur l'état actuel de la cellule**. Cet état varie sans cesse, et **les hologrammes ressemblent à des films** plus qu'à des photos fixes. Ils sont **transmis aux cellules voisines** afin que chaque cellule reçoive des indications sur l'état des autres.

Les émissions cellulaires holographiques se produisent à partir de chacune des milliards de cellules de l'organisme. Par la fonction d'**antenne réceptrice** de l'ADN, l'information holographique est lue constamment par ces cellules. Cela explique la réponse coordonnée et immédiate des systèmes vivants et le maintien de l'intégrité de l'organisme. L'ADN reçoit aussi des informations en provenance de l'environnement local de l'organisme, et même de l'univers entier.

**La transmission de l'information holographique est immédiate.** Ceci n'est pas en accord avec l'idée d'une transmission du signal par une onde à vitesse définie. L'information n'est pas localisée, elle est en A et se retrouve immédiatement en B. C'est ce qu'on appelle la **téléportation**, qui a été démontrée dans le cas de particules quantiques (*voir article Physique quantique*). Cela implique que **l'ADN se comporte comme un objet quantique**. Il est admis que le réseau de **microtubules**, une structure architecturale de la cellule, joue un rôle dans ce transfert. Toutefois, selon *Dirk Bouwmeester* (1998) la manifestation concrète de l'information téléportée requiert aussi la transmission classique chimique ou électrique.

Ce modèle **permet d'expliquer de façon simple des faits expérimentaux autrement incompréhensibles** dans le cadre de la théorie classique. **Les codes génétiques des plantes, ceux des animaux et ceux des humains** sont très semblables et produisent des protéines analogues. Et pourtant, ils se déploient en organismes bien différents. Pourquoi? De même, dans un organisme tel qu'un humain, comment des cellules possédant le même code génétique peuvent-elles savoir si elles doivent se développer en cellule du foie ou en cellule de l'œil? La réponse est dans le champ unifié vibratoire qui transmet à la cellule l'indication de qui elle est (quel organisme), où elle se trouve (quelle partie de l'organisme) et ce qu'elle doit faire.

Le champ holographique explique aussi la **capacité de régénération qu'ont certains animaux** quand ils ont été mutilés. C'est le cas du lézard dont la queue a la faculté de repousser si elle est coupée. Ou encore, celui du ver Planaria dont l'organisme entier peut se reconstituer à partir de n'importe quelle partie. C'est possible parce que chaque cellule connaît instantanément l'état des autres cellules.

L'existence du champ holographique explique comment les antigènes et les anticorps peuvent se reconnaître mutuellement, comment les transposons savent à quel endroit de l'ADN ils doivent s'insérer. C'est par ce moyen que les ribosomes, unités de production de protéines dans la cellule, savent quel acide aminé ils doivent produire lorsqu'ils reçoivent un code qui a des synonymes et montre une indétermination. C'est d'ailleurs en voulant résoudre cette dernière question que Gariaev a été amené à élaborer sa théorie.

Pour Gariaev, l'ADN est bien plus qu'une antenne réceptrice - émettrice et un lieu de stockage. Il est

### **Des scientifiques français pionniers et méconnus en matière de champ bio-vibratoire**

En France, le mathématicien *Emile Pinel* (1906 - 1985) a appliqué ses analyses mathématiques à l'étude des mécanismes biologiques. Il en a déduit l'existence d'un champ global à 9 composantes qui régit la vie des cellules. Son élève et collaboratrice *Jacqueline Bousquet* (décédée en 2013) a poursuivi ses travaux.

Le biologiste **Étienne Guillé** (*L'alchimie de la Vie, Biologie et Tradition*, éditions du Rocher, 1983) avance que la biologie est fondée sur un couple matière/vibration. La matière est le support, et la vibration porte l'information. Dès cette époque, il énonce que **les zones non codantes de l'ADN fonctionnent comme des récepteurs et émetteurs de vibrations électromagnétiques**. Des *ions métalliques* liés à la molécule d'ADN jouent un rôle de modulateurs des fréquences.

Ces travaux restent méconnus. Être connu nécessite d'être reconnu soit par sa communauté soit par l'opinion populaire. Or ces chercheurs ont été rejetés par leur communauté scientifique, car trop en-dehors des normes. Il se peut également que les résultats qu'ils livraient dérangeaient certaines instances du pouvoir. Quant à une reconnaissance populaire, cela nécessite de **savoir communiquer de façon claire et simple**, ce qui n'est pas souvent le cas dans le milieu scientifique. Communiquer nécessite tout un savoir-faire. **Les travaux de Pinel sont d'une grande valeur**, mais expliqués dans un langage mathématique très complexe. Les écrits de Guillé et Bousquet sont enrobés de jargons techniques et ésotériques incompréhensibles pour les non-initiés. Toutefois, J. Bousquet a eu le mérite de faire connaître les travaux de Pinel et les siens par ses *conférences*.

Dépassons les langages et reconnaissons le courage de ces chercheurs et la valeur de leurs travaux.

**capable d'interpréter les informations qu'il reçoit et de réagir en conséquence.** L'ADN a la capacité de lire ses propres hologrammes et ceux qu'il reçoit, de les décoder, de les interpréter, de les modifier et de les enregistrer. Il a donc toutes les caractéristiques d'un ordinateur biologique.

#### Sources:

*L'onde ADN bio-numérique*, Peter P. Gariaev, Boris I. Birshstein, Alexander M. Iarochenko, Peter J. Marcer, George G. Tertishny, Katherine A. Leonova, Uwe Kaempfer, 2000 (*original* en anglais présenté à Fourth International Conference on Computing Anticipatory Systems, Liège, Belgique)

*Principles of Linguistic-Wave Genetics*, Peter Gariaev, Mark J. Friedman, Ekaterina A. Leonova-Gariaeva, 2011, DNA Decipher Journal 1, 1

*The Wave, Probabilistic and Linguistic Representation of Cancer and HIV*, Peter P. Gariaev, George G. Tertishny, Katherine A. Leonova, 2002, The Journal of Non-Locality and Remote Mental Interactions, 1, 2

*Brief introduction into WaveGenetics, Its scope and opportunities*, Peter Gariaev

## Le champ électromagnétique qui pilote l'assemblage de l'ADN

Le professeur Luc Montagnier s'est lui aussi rendu compte de l'existence d'un champ électromagnétique associé à l'ADN, en utilisant une approche expérimentale toute différente. [Luc Montagnier](#) a reçu le prix Nobel de médecine en 2008 avec Françoise Barré-Sinoussi, pour leur découverte en 1983 du virus responsable du SIDA, le VIH. Ses recherches l'ont amené à s'intéresser aux signaux électromagnétiques émis par certaines cellules et virus pathogènes. Avec ses collaborateurs, il a mis en évidence que la synthèse de l'ADN pouvait être pilotée par des signaux électromagnétiques.

Voici comment. De l'ADN de cellules bactériennes ou de virus est mis en solution dans l'eau dans certaines conditions de dilution, en présence d'un champ électromagnétique de fréquence d'environ 7 Hz qui s'est avéré être indispensable pour la réussite de l'expérience. Cet ADN est ensuite complètement retiré de l'eau. Même enlevé, son empreinte électromagnétique spécifique, autrement dit sa signature, subsiste dans cette eau et elle est mesurable. Puis, avec ce tube hermétiquement fermé, on constate que cette signature, ce champ électromagnétique, peut être transféré à un autre tube d'eau pure. Si dans le deuxième tube, on a ajouté précautionneusement les constituants de l'ADN, de l'ADN est reconstitué au bout de quelques heures, reproduisant à 98% l'ADN initial. Les détails expérimentaux de cette procédure sont exposés en [annexe](#).



Merci au Pr L. Montagnier

Ce résultat est vraiment révolutionnaire. Jusqu'alors les biologistes considéraient que seule une molécule d'ADN pouvait fournir le plan d'assemblage d'une autre molécule d'ADN, comme un moule matériel qui guide la duplication. Or ici, on découvre que **le plan d'assemblage de l'ADN a été fourni par sa signature électromagnétique**, sans avoir besoin de moule.

C'est tout un monde qui s'ouvre à nous. Des réactions chimiques ne se font pas au hasard des rencontres, avec des molécules qui s'approchent en présentant les bons côtés, puis s'emboîtent. **Les réactions chimiques sont pilotées par des codes électromagnétiques.** La théorie du hasard s'effondre (*voir aussi Les origines de la vie*).

Dans les expériences de Montagnier, l'eau intervient comme moyen de transfert des codes d'assemblage, de leur enregistrement et de leur amplification en microstructures. Dans la partie suivante, les codes génétiques sont transportés par des faisceaux lumineux.

## Transfert par laser de code génétique d'un organisme à un autre

Le modèle de la transmission d'information par photons a reçu des confirmations extraordinaires en laboratoire. On a vu plus haut comment Burlakov a observé que des œufs de poisson se transmettaient des informations quand ils étaient mis en présence les uns des autres, simplement par leur rayonnement propre. Or, de multiples expériences ont prouvé qu'il était possible de transférer des informations génétiques d'un organisme à un autre également **au moyen d'un rayon électromagnétique programmé.**

### Les recherches de Dzang Kangeng

Avant que les chercheurs russes ne décrivent leurs théories, un chercheur chinois, **Dzang Kangeng** (quelquefois écrit **Tsiang Kan Zheng** ou **Tszyan Kanchzhen**) pensait lui aussi dans les années 1960 que

les molécules d'un organisme vivant étaient liés par des champs informationnels et que l'ADN renfermait cette information sous forme de signaux électromagnétiques.

Jury Vladimirovich Tsiang Kan Zheng est né en 1933 à Changtu en Chine. Il a obtenu son diplôme de l'Université Chinoise de Médecine. En 1971, au moment de la révolution culturelle, il s'évade vers la Russie et poursuit ses expériences à Khabarovsk.

Il décrit ses expériences dans un article *traduit en français* (AURA Z n°3, 1993):

Le champ électromagnétique et l'ADN constituent une MATIÈRE GÉNÉTIQUE COMBINÉE existant sous deux formes: passive (ADN) et active (champ bio-électromagnétique). Cela dit, la forme passive sert à conserver l'information génétique, alors que la forme active est en mesure de la modifier... Le champ bio-électromagnétique (support de l'énergie et de l'information) se manifeste dans la bande UHF et dans celle des rayons infrarouges.



Merci à  
Quanthomme

Il invente un appareil, le *Biotron-Tszyan*. Des ondes électromagnétiques à ultra-hautes fréquences (UHF) sont polarisées avec une antenne en forme de parabole, de sphère, de cône, ou d'hexaèdre. Elles captent une information génétique puis la transmettent à un autre organisme.

Dans une série d'expériences, Kangeng **transfère les informations génétiques de germes de blé sur des plantules de maïs**. Les grains qui se forment tiennent à la fois de ceux de blé et de ceux de maïs par leur morphologie. Par le même procédé, certaines caractéristiques d'un **melon**, en particulier son goût, sont transférées à des germes de **concombre**. **Ces modifications sont transmises aux générations suivantes**.

D'autres expérimentations ont lieu avec des animaux. Des œufs de **poule** reçoivent l'information génétique issue d'un **canard**. La plupart des poussins naissent avec des modifications morphologiques: pattes palmées, tête plate comme celle d'un canard, long cou, etc. Les modifications enregistrées sont également transmises aux générations suivantes.

Ces résultats montrent la puissance de cet outil et ouvrent des perspectives ahurissantes. Comme tous les outils, il peut être utilisé en vue du bien de chacun, ou pour le profit égoïste et la soif de pouvoir de quelques personnages au détriment des autres. Développer ces procédés nécessite donc une **réflexion fondamentale sur le sens de la vie et sur la logique du pouvoir**. Il n'en reste pas moins que ces expériences nous introduisent dans les **mécanismes intimes de création de la vie** (voir *Origine de la Terre et création de la vie*).

## Modifications génétiques des plantes et des animaux par transfert électromagnétique

Par la suite ou indépendamment, d'autres chercheurs ont effectué le même genre d'expérimentation avec des appareillages différents. Leurs préoccupations sont principalement de trouver des moyens de guérison.

C'est en utilisant un laser à rayon rouge qu'un chercheur russe, **V. Budakovski**, a effectué 160 études sur des organismes divers, depuis la bactérie jusqu'aux humains en passant par les batraciens. Son taux de réussite de guérison est de 64%. Il guérit des **framboisiers** atteints de **callosités** (cellules cancéreuses) en projetant un hologramme portant l'information de la plante saine. La guérison se produit en quelques mois. Il projette aussi des informations d'**œufs de grenouilles** sur des **œufs de salamandres**, de sorte qu'ils donnent naissance à des grenouilles.

Notons que **ces expériences ont eu lieu seulement avec de la lumière**, sans aucune chirurgie ni recombinaison chimique d'ADN.

**P. Gariaev** et son équipe ont eux aussi réalisé des expérimentations analogues en utilisant un **laser** qui projette deux ondes lumineuses polarisées perpendiculairement, donc sans interférences entre elles (bio-ordinateur). Ces ondes traversent le tissu semi-transparent de l'organisme donneur, par des allers et retours répétés, et elles sont modulées par l'hologramme génétique. La modulation est transformée en signal radio (0,5 MHz à 1,5 MHz) selon une spectroscopie nouvelle appelée *Spectroscopie par ondes Laser et Radio Polarisées* (PLRS), elle est enregistrée sur ordinateur, puis transmise à un tissu receveur.

Ce protocole appliqué à des **pommes de terre** leur a conféré une croissance ultra-rapide et a fait apparaître des modifications morphologiques sur leurs tiges.



**Remarque sur la pensée:** Certaines personnes ont la possibilité d'obtenir directement ce même genre de phénomène en concentrant leur pensée et leur sentiment, en parlant aux plantes, sans aucun appareillage. La **connaissance par modification de conscience** est plus directe que la connaissance scientifique et semble donner accès à d'autres processus. Elle est plus simple, mais se révèle à ceux et celles qui se dégagent des jeux de l'égo (voir *Spiritualité et développement*). La **connaissance scientifique** progresse à son rythme, avec de grands moyens techniques. Elle permet de mettre au point de nouveaux appareillages. Sa compréhension est réservée à ceux et celles qui ont suffisamment étudié.

Par ce même procédé, les chercheurs ont eu la possibilité de redonner vie à des **graines d'Arabette des dames** (*Arabidopsis thaliana*), tuées par radioactivité dans la région de Chernobyl en 1987. Ils les ont illuminées par l'hologramme de graines saines. Alternativement, ils n'ont obtenu aucun effet sur les graines si l'onde radio ne transportait pas cette information.

L'équipe de Gariaev a mené des expériences capitales de guérison sur des **rats** dont ils ont détruit le **pancréas** avec une drogue (alloxane). Par le laser, ils ont illuminé les rats avec l'information holographique d'un pancréas parfaitement sain, prélevé sur un autre rat nouveau-né. Lorsque l'exposition au laser était suffisante, **leur pancréas s'est reconstitué complètement et les rats se sont régénérés**. Dans un lot témoin qui n'a pas reçu ce traitement, les rats sont tous morts. Les cellules se reconstituent à partir de cellules souches qui évoluent en cellules pancréatiques.

Dans *une autre série d'expériences*, ils ont d'abord illuminé les rats par holographie pour leur conférer un plus grand pouvoir de résistance, à titre de prévention. Puis ils les ont soumis à des injections d'alloxane et ont mesuré leur résistance (*voir tableau ci-dessous*). Les résultats montrent qu'elle a augmenté de manière décisive.

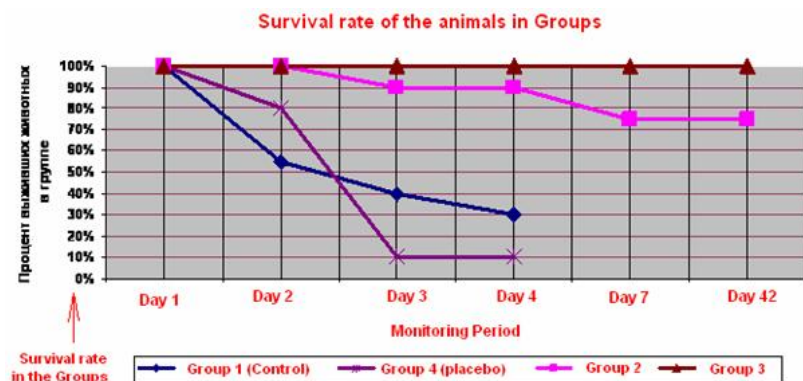


Fig. 1. Survival rate (%) in test/trial Groups after initiated alloxan diabetes.

*Fleur d'arabette des dames ou  
arabidopsis thaliana  
Merci à Wikipedia*

### **Taux de survie des rats à l'injection d'alloxane après un traitement aux ondes polarisées**

*Groupe 1: Pas de traitement holographique, injection un jour après la dernière irradiation laser. Groupe 2: traitement à 20 m de la source, injection un mois après la dernière irradiation laser.*

*Groupe 3: traitement à 70 cm de la source, injection un jour après la dernière irradiation laser. Groupe 4: irradiation au laser sans l'information génétique à 70 cm de la source, injection un jour après la dernière irradiation laser*

Extrait de *Exploring wavegenetics and wave immunity. Theoretical models*, Gariaev P.P. et coll.

## **Guérisons possibles de maladies chez les êtres humains, y compris le SIDA**

Après son expérience sur les poussins, le chinois Dzang Kangeng a montré que son procédé donnait la possibilité de transférer des informations de guérison et de rajeunissement à un humain. Une expérience a été menée en 1987 sur son père âgé de 80 ans. Les résultats ont été positifs: À la suite du traitement, les maladies chroniques qui le tenaillaient depuis 20 à 30 ans ont disparu, de même que l'allergie cutanée, le bourdonnement d'oreille (acouphène) et la tumeur bénigne; six mois plus tard, des cheveux ont repoussé à l'endroit de la calvitie et les cheveux gris sont



redevenus noirs. Un an après l'expérience, une dent a repoussé sur l'emplacement de celle arrachée 20 ans plus tôt. Il en a tiré un brevet.

Le procédé de P. Gariaev offre des possibilités analogues: Il est possible d'offrir les perspectives suivantes concernant la manipulation de signaux avec des structures génétiques: La mise en œuvre d'une surveillance à distance de processus d'information clé dans les bio-systèmes au moyen de tels bio-ordinateurs, ayant pour application des traitements contre le cancer, le SIDA, les malformations génétiques, le contrôle sur des processus socio-génétiques et, finalement, l'allongement de la vie humaine... La protection active contre les effets d'ondes destructrices, grâce aux détecteurs de canaux d'information d'onde. (*Extrait de L'onde bio-numérique*)

En ce qui concerne le SIDA et son virus associé, le VIH, [Peter Gariaev](#), [George Tertishny](#) et [Katherine Leonova](#) (2002) affirment qu'**on devrait pouvoir supprimer la fabrication des protéines virales par le VIH (virus du SIDA) en envoyant les codes des cellules saines**. On peut donc envoyer des "vaccins" électromagnétiques contre les virus VIH, ainsi que d'autres virus.

C'est l'origine de l'idée qu'une stratégie avec une approche essentiellement nouvelle du traitement du VIH et du cancer suppose la compréhension et la possibilité de gérer la logique d'un génome multi-vectoriel... Si nous connaissons les principes de fonctionnement du ribosome dans un mode contextuel, alors nous pouvons lutter avec succès contre le VIH dans la zone de régulation des ondes ribosomales (laser, solitonique, polarisation et ondes radio). Les ribosomes, qui synthétisent les protéines du VIH, doivent avoir des vecteurs d'onde fins pour leur gestion à travers les voies du contexte d'arrière-plan. Si on les connaît, il est possible de supprimer la synthèse des protéines virales par des champs extérieurs artificiels modifiés analogues à ceux des cellules normales... De façon similaire à ce qu'a trouvé la Nature, il deviendra possible de concevoir un vaccin ondulatoire simple contre le VIH, d'autres virus et des bactéries.

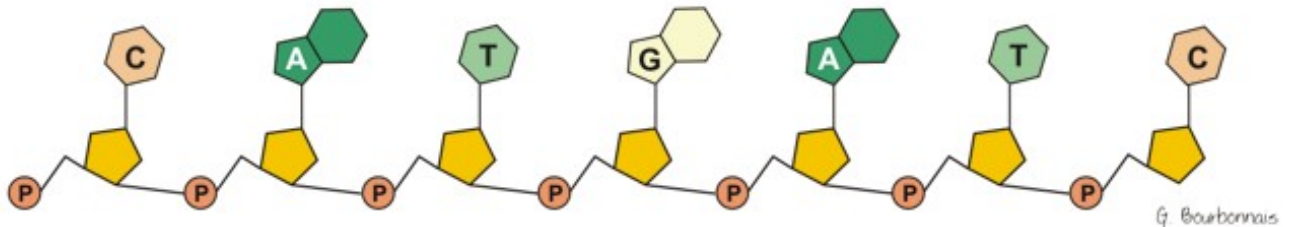
Le procédé a été appliqué en 2011 avec succès à une petite fille de 2 ans atteinte de fibrose kystique avec dégradation du foie et du pancréas, grâce à un hologramme provenant de sa cousine saine.

## 6. La musique de l'ADN et des protéines

**Résumé:** La structure de l'ADN et des gènes sous-tend une harmonie que certains artistes et compositeurs ont transcrite en musique. Au-delà de ces visions d'artiste, la physique quantique montre, grâce à Joël Sternheimer, qu'à chaque acide aminé composant une protéine est associée une onde d'échelle, qui peut être transcrite en note de musique. Par la musique des protéines ou **protéodies**, il est possible d'entrer en dialogue intime avec l'organisme, ce qui ouvre des perspectives passionnantes et nouvelles en agriculture et en médecine.

Dans les chapitres précédents, nous avons fait connaissance avec la molécule d'ADN au sein des cellules. Dans leur noyau, nos cellules renferment 23 paires de **chromosomes**, qui sont chacun constitués d'un filament d'ADN, décoré d'autres éléments tels que les grosses protéines appelées histones. Un **filament** ou **molécule** d'ADN est formé de l'enroulement en hélice de 2 **brins** qui se font face. La totalité des filaments d'ADN de l'ensemble des chromosomes s'appelle le **génome**.

Chaque **brin d'ADN** est constitué de l'enchaînement en grand nombre de nucléotides. Un **nucléotide** désigne l'assemblage d'une base azotée, du "pentagone" sur lequel elle est fixée (voir figure 1) qui représente le désoxyribose, et du groupement phosphate de la chaîne centrale. Les bases azotées sont prises parmi 4 types qu'on représente par les lettres **C** (cytosine), **A** (adénine), **T** (thymine), **G** (guanine). Les deux brins du filament sont associés chimiquement par les bases face à face. Celles-ci se révèlent être complémentaires l'une de l'autre, car la base C s'associe à G et la base A s'associe à T.



*Fig.1- Schéma d'un brin d'ADN. Il est composé d'une chaîne centrale, faite de l'assemblage linéaire de motifs identiques (les pentagones oranges représentant le désoxyribose, articulés par le groupement phosphate P ), sur laquelle sont fixés des groupements C, A, T et G  
Merci à G. Bourbonnais*

Certains fragments d'un brin d'ADN, appelés **gènes**, portent des instructions pour le fonctionnement et le développement physique du corps. L'ensemble de ces instructions est appelé le **code génétique**. Il contrôle la production des protéines, grosses molécules qui sont les ouvrières du fonctionnement et de la croissance du corps. Le code génétique n'occupe que 10% environ de la molécule d'ADN. On connaît très peu le rôle des autres parties, dites "**zones non-codantes**", mais nous avons remarqué que la succession des nucléotides comportait des structures ordonnées répétitives ou **satellites** et qu'on pouvait mettre en évidence une architecture dans la chaîne d'ADN.

## Des compositions musicales associées à l'ADN et aux protéines

Certains artistes ou biologistes ont cherché à mieux percevoir l'architecture de l'ADN ou de segments d'ADN en leur associant des sons musicaux. Le but est de faciliter l'analyse et la comparaison de séquences de nucléotides et plus particulièrement celles des gènes.

Par exemple, on peut associer une note à chacun des 4 types de base, et transcrire la suite des bases d'un gène ou d'une portion d'ADN en la succession des notes correspondantes. Le procédé ne diffère pas de celui qui consiste à associer des couleurs aux bases, tel qu'effectué dans la figure 1 ci-dessus. Dans cette figure, chaque base a une couleur différente, ce qui permet de mieux mettre en évidence l'ordre de leur succession. On peut faire de même en utilisant des sons.

Bien évidemment, la correspondance entre bases et couleurs, ou entre bases et sons est **arbitraire**. C'est pourquoi les systèmes proposés sont divers. Toutefois, le concepteur cherche à ce que le résultat soit parlant, c'est-à-dire qu'il touche notre sensibilité. De même que les couleurs de la figure 1 sont choisies pour être bien distinctes les unes des autres tout en montrant les similitudes entre bases, et pour être agréables à l'œil, de même les compositions musicales devront se placer dans le champ de perception claire de l'oreille. Le plus souvent, ces artistes ont tenté de nombreux systèmes de conversion différents, avant d'en trouver un qui les satisfasse.

Comme le disent *Rie Takahashi et Jeffrey H. Miller* (département de microbiologie, immunologie et génétique moléculaire à l'université de Los Angeles): Dans le contexte de la recherche fondamentale, la conversion de séquences génomiques en musique peut offrir un moyen pour présenter aux étudiants les concepts de séquences d'ADN et de protéines par leurs caractéristiques telles que durée, tempo et dynamique. Le but de notre travail est de trouver un mode de conversion des séquences génomiques (zones codantes et aussi non-codantes) en notes de piano qui sonnent de façon acceptable à l'oreille d'un musicien, tout en restant fidèle à la science des séquences de protéines.

## Une suite de notes pour représenter les bases azotées et les acides aminés

L'association la plus simple et la plus évidente est de faire correspondre 4 notes aux 4 bases azotées. C'est ce qu'ont fait par exemple *Nobuo Munakata et Kenshi Hayashi* qui, à G, C, T, A, associent Ré, Mi, Sol, La. Comme cela restait un peu pauvre, ils ont étendu le système aux protéines en associant 20 notes aux **20 acides aminés** (I isoleucine, V valine, L leucine, F phénylalanine, C cystéine, M méthionine, A alanine, G glycine, T thréonine, S sérine, W tryptophane, Y tyrosine, P proline, H histidine, N asparagine, Q glutamine, D aspartate, E glutamate, K lysine, R arginine). Un acide aminé est représenté aussi bien par sa note que par la suite de notes de ses bases.

La mélodie de la protéine comporte autant de notes que d'acides aminés (voir fig.2). Mais comment choisir l'ordre d'attribution des notes aux acides aminés? Les compositeurs les ont classés par leur degré d'attraction ou de répulsion pour l'eau, une propriété physique qui a une importance considérable dans l'assemblage et la forme des molécules.

En anglais, les notes de musique **La** à **Sol** sont désignées par les lettres **A** à **G** (voir *Sensations sonores: hauteur et fréquences*). **A** désigne donc à la fois la base Adénine et la note La, **C** désigne la Cytosine et le Do et **G** la Guanine et le Sol. Aussi il était tentant d'associer les deux. C'est ce qu'a fait *R. D. King* (Université du Pays de Galles) pour sa Musique des protéines. Pour la 4<sup>e</sup> base, il a assigné à **T** la note **E** (Mi). Il superpose une autre ligne mélodique qui correspond aux codons et aux acides aminés, selon une correspondance analogue à celle de Munakata. Des variations d'octave y sont ajoutées (*écouter un exemple musical*).

*Aurora Sánchez Sousa*, à la fois microbiologiste et musicienne à Madrid, a porté son attention sur les **rythmes** ternaires créés par le regroupement par 3 des bases en codons, et d'autres rythmes pour les introns.

*Rie Takahashi et Jeffrey H. Miller* (département de microbiologie, immunologie et génétique moléculaire à l'université de Los Angeles) définissent des **rythmes** par la durée des notes en rapport avec l'abondance du codon dans l'organisme. Pour donner un aspect plus musical, Rie, qui est musicienne, remplace les notes par des **accords** de 3 notes. De plus, différents instruments sont affectés à différentes parties du génome: gènes, zones intergènes, séquence de régulation, etc.

## Les caractéristiques physiques mises en musique

Certains, n'étant pas satisfaits de cette correspondance arbitraire, ont recherché une **correspondance qui tienne compte des caractéristiques physiques des bases et des acides aminés**. Dans la musique de *Peter Gena*, en collaboration avec le généticien **Charles Strom**, la hauteur de la note représentant un acide aminé dépend de la **composition des codons en bases**, son intensité varie avec le **nombre de liens hydrogène** entre les deux brins d'ADN, et sa durée est fonction du **poids moléculaire de l'acide aminé** (*exemples sonores dans son site*).

En décrivant l'enchaînement des bases du filament d'ADN et celui des acides aminés dans la protéine, on ne considère que la forme déroulée, étirée de la molécule, que les biologistes nomment la structure primaire. Or dans la réalité, ce fil se replie et se recroqueville. On a vu que l'ADN s'enroule en hélice, mais c'est

également vrai pour les protéines qui forment des hélices, des enroulements ou des plissements, qu'on nomme la **structure secondaire**. Des artistes ont cherché à introduire cet aspect dans leur représentation musicale des protéines.

La biologiste [M. A. Clark](#) (Université du Texas), en collaboration avec l'artiste et informaticien [John Dunn](#), a composé des musiques pour représenter non seulement la structure primaire, mais aussi la structure secondaire. Pour la structure primaire, la hauteur des notes est en rapport avec le poids moléculaire et le volume des acides aminés tandis que les 3 aspects de la **structure secondaire** sont représentés par 3 instruments différents (*exemple sonore dans son site [The Music of Protein Sequences](#)*). De plus, elle a pris soin dans son site, d'inventorier tous les [projets de recherche](#) sur la musique génétique et d'expliquer leur [démarche](#). Je lui dois beaucoup pour cette partie du chapitre.

[Linda Long](#), qui est à la fois biochimiste et musicienne à Bristol (Angleterre), utilise la **position des atomes dans l'espace** (leurs coordonnées), déterminée par la diffraction aux rayons X, qui décrit la structure secondaire. Elle en tire des compositions musicales qui lui servent à enseigner les structures de protéines complexes. Elle compose aussi des musiques représentant les protéines de plantes aromatiques et médicinales et du corps humain destinées à la relaxation et aux soins (*Exemples sonores dans son site [Molecular Music](#)*).

L'intégration des caractéristiques physiques s'est révélée fructueuse sur le plan pédagogique et a constitué un bon support pour l'inspiration des artistes. Toutefois, le choix des correspondances entre les notes et les caractéristiques physiques reste arbitraire, et soumis à l'imagination du compositeur. **Les molécules n'émettent-elles pas elles-mêmes une musique**, ou tout au moins des ondes qui pourraient être retraduites en sons? La réponse est oui. Les atomes, les groupes d'atomes, les molécules sont des édifices électriques et électromagnétiques qui vibrent, et par là-même émettent des ondes électromagnétiques qu'on peut mesurer par spectroscopie.

La compositrice [Susan Alexander](#) (Oregon, USA) et le biologiste **David Deamer** ont mesuré les **rayonnements infrarouges** de chacune des 4 bases individuellement. La lumière infrarouge s'étend sur une large gamme de fréquences. Lorsqu'on éclaire un agglomérat d'une des bases avec ce rayonnement, certaines des fréquences sont absorbées. Chacune des bases est caractérisée par le nombre et la valeur de ces fréquences absorbées (son spectre de fréquences). Elles correspondent aux vibrations des liens chimiques entre les atomes ou groupes d'atomes composant la base. Pour les traduire en note, chacune des fréquences est divisée par 2 (c'est-à-dire qu'on descend d'une octave) 36 fois de suite pour tomber dans la gamme des fréquences des sons audibles. C'est avec les notes obtenues, qui ne se situent pas dans l'échelle de la gamme tempérée habituelle (*voir [L'intonation juste](#)*), qu'a été composée la musique Sequencia (1990) (*exemples sonores dans le site [Our Sound Universe](#)*).



# Les protéodies de Joël Sternheimer

Ce qu'ignorent probablement les artistes, ainsi que la majorité des scientifiques, c'est que chaque acide aminé émet une onde caractéristique, autre que les ondes infrarouges. L'existence de ces ondes appelées **ondes d'échelle** a été démontrée par la physique quantique.

C'est le physicien **Joël Sternheimer** qui les a découvertes et mises en évidence (*voir en annexe Ondes d'échelle et protéodies*). Il en a proposé des applications pratiques nouvelles en agriculture et en médecine qui respectent l'environnement et les organismes. Avec les ondes d'échelle, on quitte le domaine artistique et pédagogique pour entrer dans **le dialogue intime avec la nature et avec l'ADN**.

## Les acides aminés émettent des ondes

**C'est au cours de la construction d'une protéine que les acides aminés émettent une onde d'échelle spécifique.**

Tout d'abord, le gène est transcrit en un **ARN messenger**, après élimination des introns, comme nous l'avons vu au début de cet ouvrage. Sa structure est faite de la succession de codons, groupes de 3 nucléotides.

Puis cet ARN messenger sort du noyau de la cellule, et voyage jusqu'à l'usine de fabrication, une structure nommée **ribosome**, sur lequel il s'amarre. C'est à cet endroit que **les acides aminés** sont apportés un à un, dans l'ordre de leurs codons correspondants et **déposés sur l'ARN messenger**.

C'est dans ce bref moment du dépôt que **l'acide aminé émet un signal ondulatoire**, une onde dont on peut calculer la fréquence vibratoire. Au fur et à mesure de la synthèse de la protéine par apport successif et assemblage des acides aminés, chacun d'eux émet son signal, de sorte que la protéine dans son ensemble produit une succession de fréquences.

Ces ondes sont nommées **ondes d'échelle** parce que la théorie quantique montre qu'elles sont liées aux différentes échelles d'observation, de l'acide aminé à la protéine (voir annexe).

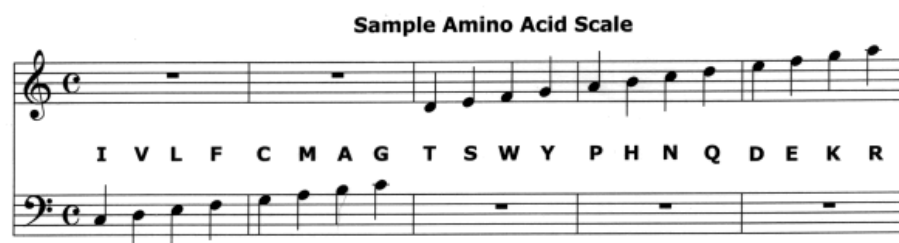


*Dr en physique théorique, Joël Sternheimer a été l'élève de Louis de Broglie, prix Nobel de physique en 1929, puis a poursuivi des recherches sur la physique des particules à Princeton, aux États-Unis. Il est professeur à l'Université européenne de la recherche, à Paris.*

## Les ondes sont transformées en notes de musique

Cette succession de fréquences rappelle une succession de notes de musique, d'autant plus que les rapports de ces fréquences sont analogues aux demi-tons de la gamme musicale (*voir **Gammes et modes***). On peut donc désigner cette suite par le terme de **mélodie quantique**, sauf que ses notes se situent bien loin des fréquences audibles.

J. Sternheimer a eu l'idée de transposer cette mélodie quantique en une mélodie audible par changement d'octave, c'est-à-dire en divisant les fréquences par 2 un nombre suffisant de fois, en l'occurrence 76 fois.



*Fig.2. La table de correspondance entre notes et acides aminés de M.A. Clark n'est pas identique à celle de Munakata.*

*[Cliquez ici pour entendre la gamme des acides aminés](#)*

*La durée de chaque note varie en fonction du nombre de codons différents associés à l'acide aminé. Les codons sont représentés par une harpe qui joue les 3 bases de chaque codon sous-tendant l'acide aminé. Les 3 derniers codons qu'on entend sont des codons stop et ne correspondent pas à un acide aminé.*

*Merci à M.A. Clark*

Par ce moyen, **à chaque acide aminé correspond une note de musique spécifique.**

Les protéines, qui sont constituées de dizaines ou de centaines d'acides aminés, génèrent une véritable mélodie. **Chaque protéine est caractérisée par sa propre mélodie baptisée protéodie.** La durée des notes est fixée par l'intervalle de temps qui s'écoule réellement entre l'adjonction de 2 acides aminés. Puisque de très nombreuses séquences d'acides aminés sont connues et disponibles sur différentes banques de données, comme celle de la National Biomedical Research Foundation aux États-Unis, Joël Sternheimer a pu ainsi composer les mélodies spécifiques d'un grand nombre d'entre elles.

## Les mélodies musicales interagissent avec les protéines

Ainsi les protéines émettent une mélodie quantique. Inversement elles sont sensibles à la musique qu'elles reçoivent. **Une protéine résonne avec sa propre protéodie.** Lorsqu'on lui joue cette protéodie musicale, par exemple avec un enregistrement diffusé par des hauts-parleurs sur des cellules contenant cette protéine active, **la protéine réagit par une accélération de sa synthèse.**

Un autre phénomène étonnant est qu'il est possible de composer une mélodie "contraire" à cette protéodie et que **la protéodie contraire a une action inhibitrice sur la synthèse.** Elle se déduit de la protéodie directe en remplaçant les mouvements ascendants par des mouvements descendants et inversement selon des règles précises.

L'intensité des actions stimulatrice et inhibitrice dépend du nombre de fois où la protéodie est répétée, de son volume sonore, de son timbre, de sa vitesse (*sur les caractéristiques d'un son, voir [Hauteur d'un son](#); [Volume d'un son](#); [Timbre d'un son](#)*).

## Des tests démonstratifs sur la croissance des plantes

Les premières démonstrations de l'interaction entre la protéodie et la synthèse de la protéine ont été effectuées avec des légumes. La croissance des plantes est dépendante d'une protéine, responsable de la synthèse d'une hormone de croissance qui diffère pour chacune plante, ce qui fait que chacune nécessite une protéodie spécifique pour activer sa croissance.

On soumet la jeune plante à la musique par l'intermédiaire de hauts-parleurs. Le nombre de moments d'exposition est variable, une ou plusieurs fois par jour, et la durée peut varier elle-aussi, par exemple de 30 s à quelques minutes. Le son atteint les feuilles et se diffuse à l'intérieur du milieu cellulaire qui est liquide, jusqu'à la protéine concernée.

En mai 1993, dans un jardin en Ariège (Sud de la France), différents légumes d'origines identiques ont été plantés en même temps: tomates, poivrons, carottes, haricots verts, oignons, poireaux, courgettes, betteraves, aubergines, coriandre. Une partie, cultivée sans protéodies, a servi de témoin. L'autre a reçu la même préparation, les mêmes conditions de culture, avec en plus des protéodies. Une séquence sonore, différente pour chaque légume, correspondant à des protéines qui interviennent dans leur croissance, a été diffusée environ 1 min 30, une ou deux fois par jour, et ceci jusqu'en août. Les résultats, estimés d'après la taille de la plante, le nombre de fleurs et de fruits, et d'autres observations, sont très significatifs. Par exemple, **les tomates sur pied début août étaient 2 fois plus nombreuses que sur les témoins** (*voir les détails dans le [compte-rendu](#)*).

D'autres séries d'expériences dans une serre en [Suisse](#) en 1994 ont porté sur **la résistance de la tomate à la sécheresse.** Il existe une protéine, la TAS14, qui contrôle cette résistance. Du 26 juillet au 11 août, la protéodie de la TAS14 a été diffusée 3 minutes par jour à un lot expérimental. Les résultats sont sans équivoque. Les feuilles des tomates normales séchaient, tandis que les tomates traitées par protéodie restaient vertes. L'expérience a été renouvelée *au [Sénégal](#)* en juillet 1996. Les mesures ont porté sur l'évolution de la hauteur des plants, le nombre de fruits, leur grosseur, la résistance aux insectes, Le rendement d'un pied est environ multiplié par 4.

Une autre expérience sur des haricots verts en laboratoire avec des lycéens a porté sur le rôle précis du temps d'exposition à la protéodie, de son volume sonore, et de sa vitesse. **L'influence inhibitrice de la protéodie contraire** a été démontrée.

## Échanges musicaux avec les virus

Un **virus** est composé d'une molécule d'acide nucléique (ADN ou ARN) entourée d'une coque de **protéines** appelée la **capside**. Selon le même procédé, il est possible de définir une protéodie inhibitrice

correspondant à la capsid. Il est intéressant de savoir si l'action inhibitrice est capable d'enrayer la virulence de virus nocifs.

Une expérience a été effectuée en 1996 à Bruailles, à côté de Lons-Le Saulnier, sur une maladie des tomates, qui se manifeste par le recroquevillement des feuilles. Toutes les feuilles exposées à la protéodine inhibitrice sont redevenues vertes et belles.

## Applications industrielles

En juin 1992, Joël Sternheimer a déposé un brevet concernant ce procédé en stimulation ou en inhibition, intitulé: **Procédé de régulation épigénétique de la synthèse protéique**. Le terme **épigénétique** signifie que le procédé ne modifie pas le gène lui-même, mais intervient sur son mode d'expression en augmentant ou diminuant le débit de production de la protéine (*voir le chapitre 2*).

Des industriels se sont montrés très intéressés par la mise en pratique du procédé. Au Japon, la société Gomei-kaisha Takada a déposé un brevet en 1991 qui a pour but d'améliorer la fermentation des levures employées pour la fabrication des assaisonnements de tamari et de miso. En France, la société **Genodics** (Pedro Ferrandiz) a pour objet de développer et mettre en œuvre les applications de la génodique (relations entre le génome et les protéodines) dans les domaines agro-alimentaire, énergétique et environnemental.

## Des protéodines pour les hommes

Il se trouve que certaines musiques populaires contiennent des protéodines, bien entendu sans que son compositeur en soit conscient. C'est par exemple le cas du thème de O Sole Mio (Oh mon soleil!), une chanson populaire de Naples rendue célèbre par le ténor Enrico Caruso.

Il correspond à la stimulation d'une protéine qui a un rôle d'accumulation d'énergie dans les cellules du tournesol (tourne au soleil). Comme le dit le site japonais **bekkoame**: *Que c'est amusant quand on pense que le tournesol stocke assidûment de l'énergie dans ses cellules lorsque nous lui chantons 'O Sole Mio' sous le soleil brillant de l'été!*



atp6 du tournesol correspondant  
aux paroles "'O sole mio"

*Merci au site **Bekkoame***

C'est aussi le cas du Canon de Pachelbel dont le thème correspond à une protéine anti-stress, et de la chanson Aimer, extraite de la comédie musicale Roméo et Juliette, dont le thème correspond à une protéine qui favorise la fertilité. Effectivement, il y a eu un accroissement de la natalité à l'époque (en 2000). D'autres exemples de protéodines incluses dans des musiques sont donnés dans la section anglaise du site japonais **Bekkoame**.

### Pour calmer le virus H1N1

*J. Sternheimer, quelles sont les applications de vos recherches ?*

La réalisation concrète de ce dialogue, c'est-à-dire la possibilité de calmer un virus par exemple, ou une affection, via une action par résonance sur la biosynthèse des protéines impliquées, et qui prend une forme musicale, spécifique pour chacune.

Par exemple, pour le virus H1N1, pour lequel les autorités envisagent aujourd'hui, paraît-il, une campagne de vaccination massive? Baudelaire faisait-il de l'ombrage à Pasteur lorsqu'il trouvait les mots pour calmer sa douleur ?

Ces derniers exemples rapportent des protéodines qui concernent les protéines de l'être humain. Il est donc tentant d'imaginer qu'on peut employer certaines d'entre elles à la manière de médicaments pour juguler une pathologie. Ce à quoi s'oppose J. Sternheimer qui défend une idée de la science dans laquelle l'homme n'est pas un sujet qui opère sur des objets et sur la nature en se considérant à l'extérieur d'eux, mais où le sujet et l'objet sont reliés par des

Extrait d'un article pour la revue **Sommets**

interactions dans les deux sens. C'est d'ailleurs cette réflexion appliquée à la physique des particules qui a conduit à la découverte des ondes d'échelles.

Ainsi, si un homme détruit un arbre ou un virus, c'est parce qu'il s' imagine indépendant de cet arbre ou de ce virus. Cette ignorance est source de non-respect de la vie et de violence vis-à-vis des autres et de soi-même, ce qui a des conséquences incalculables pour la planète et l'univers (*voir Catastrophes naturelles et pollution mentale*). Le scientifique qui casse la matière et les molécules pour les étudier est dans la même violence, le même aveuglement. Il ne peut pas accéder à des réalités globales, celles qui émergent à d'autres niveaux, liées aux interactions et aux échanges. Un organisme est quelque chose de bien plus vaste qu'un assemblage de morceaux séparés. Dans une approche relationnelle de la vie, il existe des dialogues entre les différentes parties d'un organisme, des dialogues entre l'organisme et l'environnement.

**La protéodie est une façon de communiquer et d'échanger avec l'organisme** dans le respect et dans l'unité.



## 7. Les géométries de l'ADN

**Résumé:** La molécule d'ADN présente une forme remarquable, la structure en double hélice. Le plus souvent, elle apparaît sous sa forme canonique ADN-B, mais elle peut également apparaître sous d'autres types de doubles hélices qui diffèrent par la façon dont les spires sont compressées ou étirées. Dans la variante ADN-B, on peut découvrir par trois fois que le rapport entre certaines mesures y prend la valeur du nombre d'or. Enfin, il existe aussi des hélices à 3 brins, aussi bien synthétiques que naturelles, de très courte longueur, qui ont parfois des rôles spécifiques.

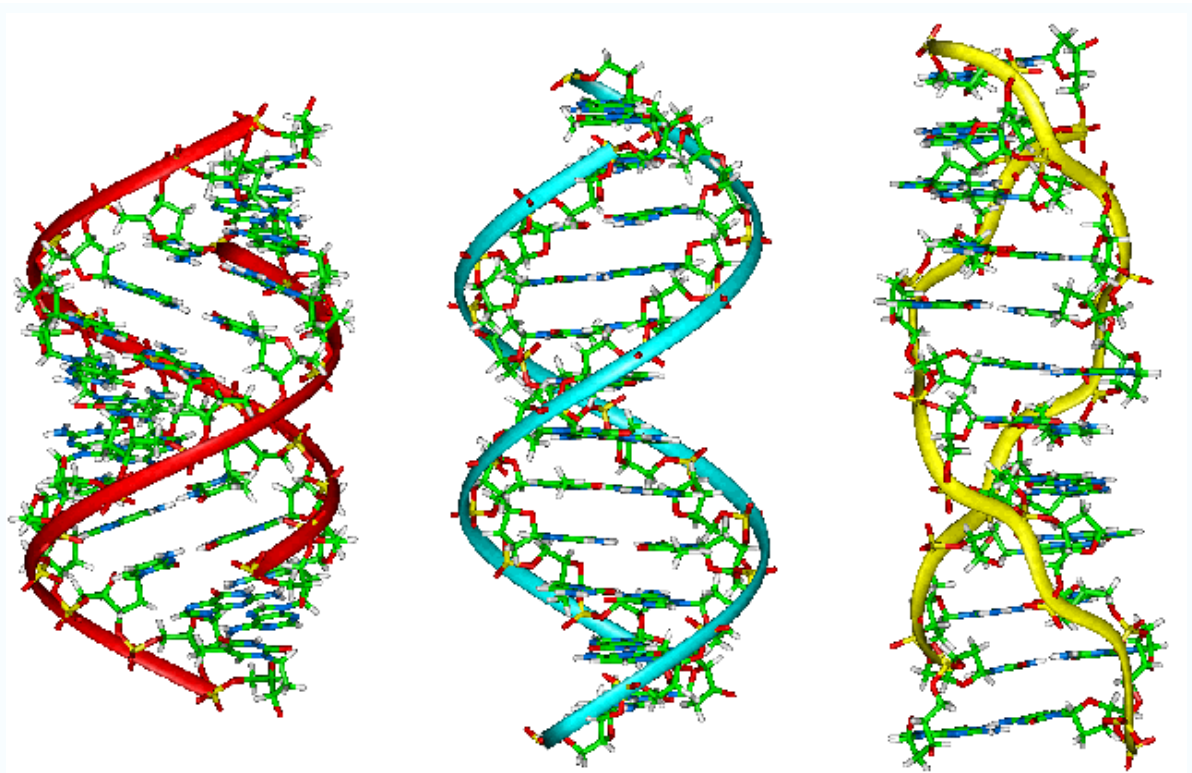
### Les trois formes de la double hélice

La forme en double hélice de la molécule d'ADN est celle qu'elle adopte le plus couramment dans les cellules vivantes. On la nomme ADN-B. Mais l'ADN bouge, se trémousse et prend parfois localement des conformations autres que ADN-B. On en a d'abord repéré dans des échantillons d'ADN hors des cellules, puis on en a repéré également dans les cellules vivantes.

L'hélice moléculaire d'**ADN-B** que nous avons étudiée est caractérisée par son sens d'enroulement à droite; et par son pas - c'est-à-dire la distance entre deux spires consécutives - de 3,32 nm, incluant 10,5 paires de bases (pour d'autres, c'est 10). (*sur les hélices, voir article [Spirales et hélices](#)*)

La molécule d'**ADN-A** est également une hélice qui s'enroule à droite. Mais les bases nucléiques y sont plus inclinées par rapport à l'axe de la double hélice, ce qui la rend plus compacte que l'ADN-B, avec un pas de 2,82 nm, comportant 11 paires de bases. On la trouve dans un milieu pauvre en eau, ou riche en sel, qu'on ne rencontre pas dans le vivant, mais dans les échantillons de matériel génétique utilisés en cristallographie aux rayons X.

La molécule d'**ADN-Z** est une hélice qui s'enroule à gauche. Plus étirée, plus lâche, plus allongée, elle a un pas de 4,56 nm pour 12 paires de bases. Elle est constituée uniquement de bases C et G. On la trouve dans le vivant, dans les régions du génome où se produisent des réplifications et des transcriptions. Elle y joue donc un rôle fonctionnel transitoire. De fait, une fois ce rôle achevé, elle se transforme en ADN-B.



De gauche à droite: ADN-A, ADN-B et ADN-Z. Merci à [wikipedia](#)

# Le nombre d'or dans la chaîne d'ADN-B

En recherchant la façon de diviser un segment en deux parties, dans une proportion telle qu'on peut la poursuivre indéfiniment sur les segments obtenus, on arrive à un rapport d'une valeur particulière appelée le **nombre d'or** ou section dorée. Plus précisément, on part d'un segment AB qu'on veut diviser en 2 segments de façon harmonieuse, AC et CB, telle que la proportion entre AC et CB soit la même que celle entre AB et AC. Autrement dit  $AC/AB = CB/AC = q$



AC devient la nouvelle longueur à partager, entre AD et DC.

Ce qu'on nomme le nombre d'or  $\phi$  est l'inverse de  $q$ :  $\phi = 1/q$

Sa valeur est  $\phi = (1 + \sqrt{5})/2 = 1,618$  et  $1/\phi = 0,618$

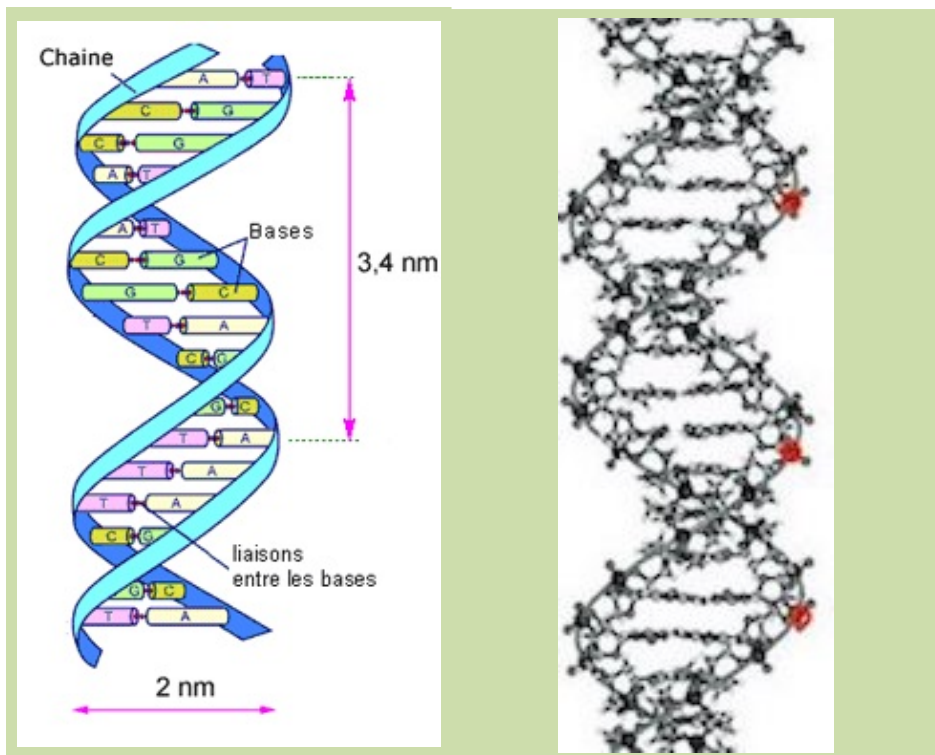
Le mathématicien Léonard de Pise, dit **Fibonacci** (le fils de Bonacci), a étudié la série de nombres qui porte son nom. Elle est construite à partir du chiffre 1 avec la règle que chaque terme de la suite est la somme des deux précédents.

0 - 1 - 1 - 2 - 3 - 5 - 8 - 13 - 21 - 34 - 55 - 89 - 144 -

Or si on divise un terme par le précédent ou le suivant, on a une valeur proche du nombre d'or, d'autant plus proche que les nombres sont plus élevés. Dès les premiers termes 2 et 3, on s'en approche  $3/2 = 1,5$  ou  $2/3 = 0,66$ . C'est la proportion des 2/3. On va rapidement vers 1,618 avec  $55/34 = 1,6176$  (*voir mes articles sur la spirale et sur la géométrie cristalline*).

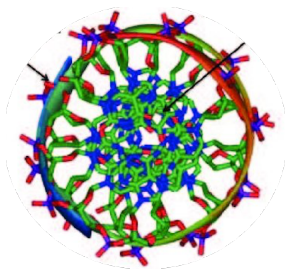
Il se trouve que le nombre d'or apparaît 3 fois dans la molécule d'ADN-B, deux fois dans la vue longitudinale et une fois dans la vue axiale.

1- Revenons à la forme hélicoïdale telle qu'elle a été présentée dans le premier chapitre (*reproduite colonne de gauche du tableau ci-dessous*). On y remarque que le pas de l'hélice est de 3,4 nm et son diamètre de 2 nm. Ce diamètre correspond à la mesure entre les atomes de phosphore qui sont les plus massifs. Mais si on définit le diamètre par les atomes d'oxygène plus extérieurs, on obtient une valeur de 2,1 nm (*DNA Structure and the Golden Ratio Revisited*). Cela dessine **un rectangle dont la longueur est de 3,4 et la largeur de 2,1 nm, soit un rapport de 1,619**.



2- Une deuxième proportion dorée est révélée par l'emplacement mutuel des deux brins. Entre la première hélice et la deuxième hélice, se dessinent deux **sillons**, l'un plus grand que l'autre. Une façon précise de mesurer la distance entre les deux hélices est de repérer le même atome de phosphore dans les deux hélices (*voir les ronds rouges de la deuxième colonne du tableau*). Les deux distances sont 2,06 et 3,38 nm, ce qui donne un rapport de 1,64, proche de  $\phi$ .

3- Observons maintenant la double hélice B le long de l'axe (en section transversale). On y voit les deux chaînes constituées des sucres (désoxyribose) alternant avec des groupes phosphates, enroulées en cercle, et les rayons du cercle formés par les paires de bases. Le nombre de paires de bases par pas (tour d'hélice) est de 10,5 dans l'ADN en solution, mais de 10 pour l'organisme dans le vivant (*How many base-pairs per turn does DNA have in solution and in chromatin?*). Dans ce cas, les rayons sont espacés par des angles de  $36^\circ$  environ, (pour 10 paires de base par pas), de sorte qu'ils s'inscrivent dans un décagone, qu'on peut décomposer en deux pentagones. Or la diagonale d'un décagone régulier est dans un rapport  $\phi$  avec son côté.



ADN-B en coupe transversale

Merci à Stéphane Despax

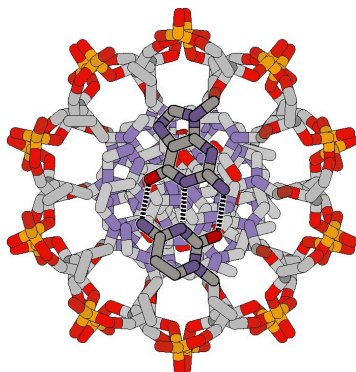
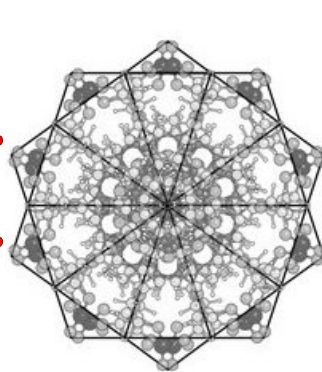


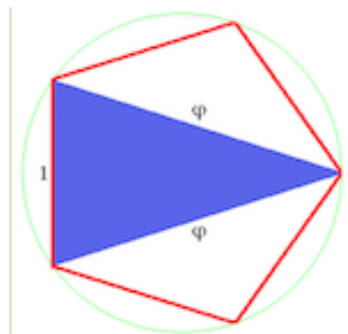
Schéma de l'ADN-B en vue transversale

Merci à Williams Chemistry



ADN-B. Coupe transversale avec superposition d'un double pentagone

Merci à S.H. Larsen



Pentagone régulier où apparaît le nombre d'or  $\phi$

## L'hélice triple

Considérons une hélice d'ADN à deux brins, dans laquelle se distinguent nettement les deux sillons, l'un étroit et l'autre large, tels que nous les avons observés dans la section précédente. **Dans le sillon large, il y a la place pour loger une troisième brin hélicoïdal qui s'enroule autour des deux autres** (voir figure).

Cela est vrai également pour des brins d'ARN. Cela a été vérifié d'une part avec des polynucléotides synthétiques (ARN ou ADN), d'autre part en observant de telles hélices dans certains systèmes biologiques.

Toutefois, en parlant d'hélice à trois brins (ou triplex), il ne faut pas s'imaginer avoir affaire à une hélice de la longueur de la molécule d'ADN humaine. Il s'agit d'hélices courtes, quelques paires de base seulement, qui sont intégrées dans des portions plus longues de deux brins.

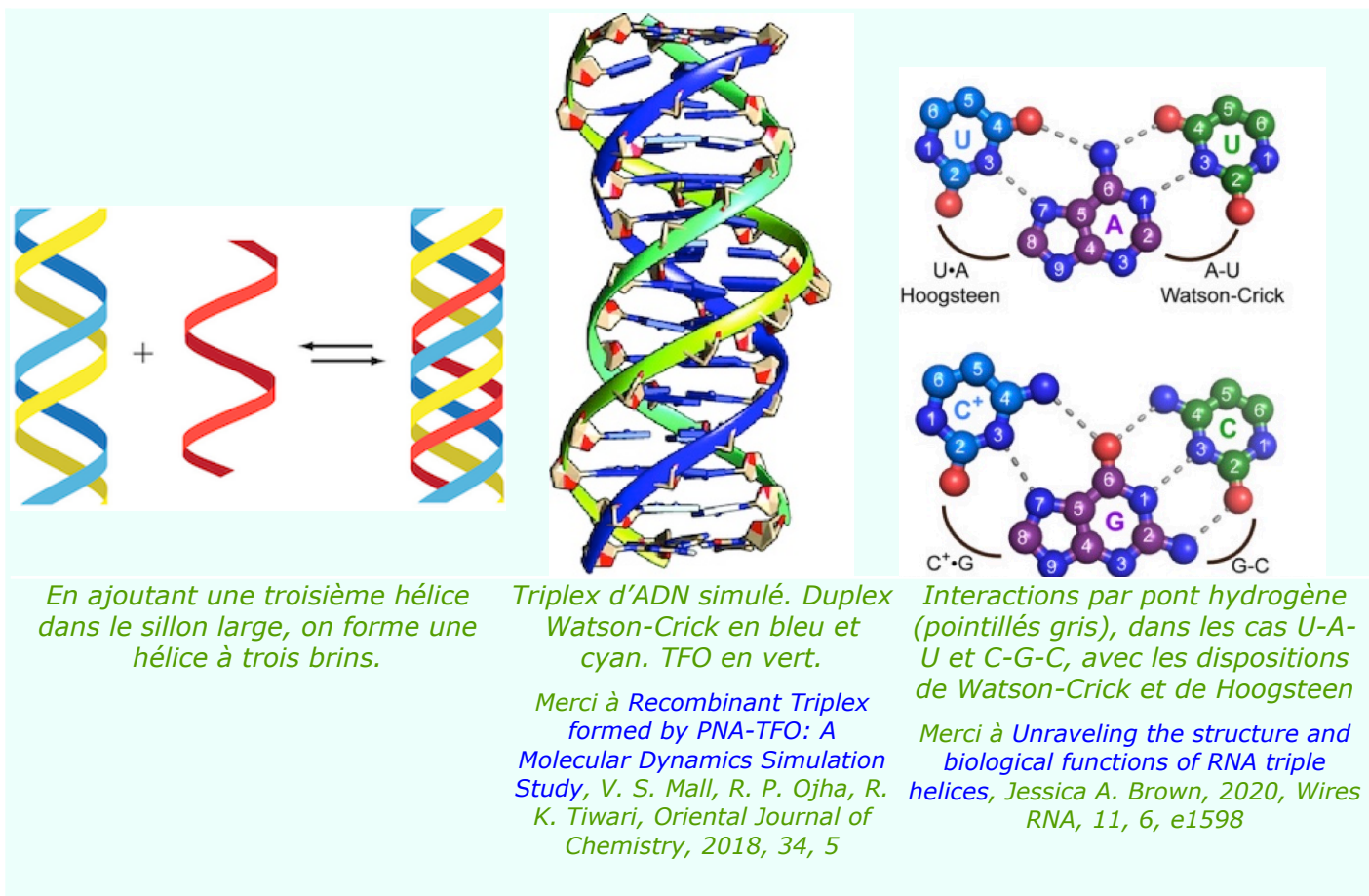
### Synthèse d'hélices triples de polynucléotides

Les travaux sur la synthèse d'hélices triples ont démarré avec les recherches en 1957 de Gary Felsenfeld, David R. Davies, et Alexander Rich en 1957 (*Formation of a three-stranded polynucleotide molecule*, *J. Am. Chem. Soc.* 1957, 79, 8, 2023).

Ils ont entremêlé deux types de brins. L'un est de l'acide polyadénilique (noté poly-A), composé de la base nucléique adénine, elle-même constituant de l'ADN et de l'ARN. L'autre est de l'acide polyuridylique (noté poly-U), composé de la base nucléique uracile constituant de l'ARN seulement.

Dans l'hélice triple, un brin de poly-A est associé à un brin de poly-U en une hélice à deux brins. Un troisième brin, qui est le deuxième brin de poly-U, vient remplir le gros sillon laissé libre. Cette hélice triple a un diamètre de 24 Å et comporte un pas de 35 Å avec 12 paires de base. (*Unraveling the structure and biological functions of RNA triple helices*, Jessica A. Brown, 2020, *Wires RNA*, 11, 6, e1598)





## Triplex naturels

Il existe aussi des triplex naturels, qui se forment à partir d'un ADN à deux brins auquel s'adjoint un troisième brin qui provient d'une autre molécule d'ADN, par exemple celle d'un chromosome voisin, ou d'une molécule courte de polynucléotide (nommé TFO pour Oligonucléotide Formant un Triplex).

## Liaisons entre brins

On sait que les liaisons entre les deux brins d'une molécule d'ADN se font par des ponts hydrogène entre deux bases complémentaires, l'une étant une pyrimidine (noyau à 1 cercle, comme C et T dans l'ADN, et C et U dans l'ARN) et l'autre étant une purine (noyau à deux cercles accolés, comme dans A et G). A et T (U) s'associent par deux ponts hydrogène, C et G par trois ponts. Ce sont des liaisons bien connues qu'on nomme **liaisons canoniques de type Watson-Crick**, du nom des deux chercheurs qui les ont décrites en 1953.

Toutefois, il existe un autre type d'association (ou d'appariement), dans lequel la pyrimidine se présente avec sa face retournée. C'est l'**appariement de Hoogsteen**, proposé en 1963 par Karst Hoogsteen. Il comporte 2 liaisons hydrogène. Le troisième brin de type pyrimidine a la possibilité de s'associer aux deux autres par ce type d'appariement. Les 3 brins sont donc reliés par une plateforme de 3 bases nucléiques, une purine et deux pyrimidines, solidarisées par des ponts hydrogène (voir figure).

## Les replis intramoléculaires

### ADN-H ou conformation triplex

Il existe une catégorie de triplex d'ADN qui sont formés naturellement à partir de replis d'un des brins d'ADN (triplex intramoléculaires). Au départ, la molécule a deux brins, et par replis en dégage 4. Mais l'un des brins du repli se détache et se fixe sur le premier, ce qui crée un triplex, accompagné d'un brin isolé. Cette configuration a été nommée ADN-H. Cela est possible dans des séquences composées de motifs répétitifs et inversés qui peuvent s'associer. Ces replis sont naturels et ont forcément un rôle biologique, généralement en participant à la régulation de l'expression de gènes.

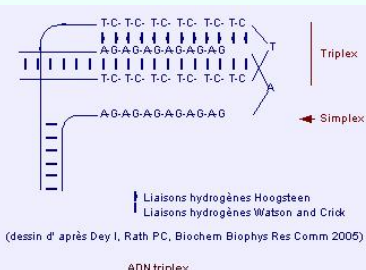
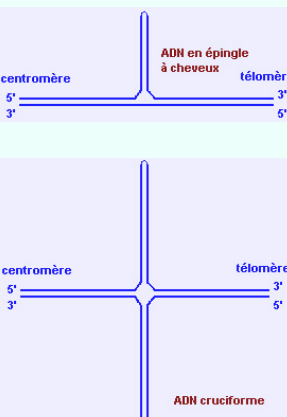
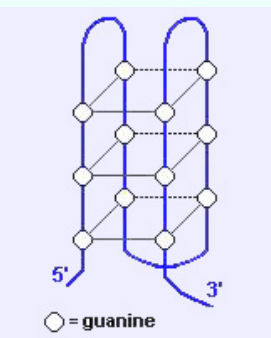
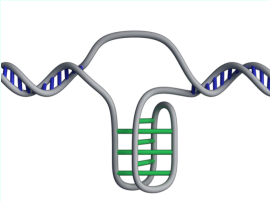


## ADN-G4 ou conformation quadruplex

Parfois **les brins repliés s'associent par 4** (conformation quadruplex ou ADN-G4). Cela a lieu là où les séquences sont riches en guanine (d'où leur nom de G4). Les bases de guanine se relient en plateaux carrés entre les 4 brins. Cette conformation a été observée dans les cellules humaines en janvier 2013. Elle intervient dans les processus de transcription, épissage, traduction, réparation d'ADN, mais aussi dans de nombreux processus cellulaires associés aux ribosomes par exemple, lors de la division cellulaire. La recherche indique que les quadruplex sont plus susceptibles de se produire dans les gènes de cellules qui se divisent rapidement, comme les cellules cancéreuses. (*Découverte de l'ADN à quatre hélices dans le génome humain, Gurumed, janvier 2013*).

## Motifs i

Une autre forme d'arrangement de l'ADN dans des cellules vivantes, le motif i, a été découverte en avril 2018 par des chercheurs australiens. C'est un nœud de l'ADN. Elle se concentre dans des parties qui ne codent pas pour les protéines, notamment, là encore, les régions régulatrices qui activent et désactivent les gènes.

|                                                                                                       |                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                         |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>ADN triplex</p> |  <p>ADN en épingle à cheveux</p> <p>ADN cruciforme</p> |  <p>ADN quadruplex</p> <p>(dessin d'après Nakagama H et coll, Mutation Res 2006)</p> |  |
| <p>ADN triplex, avec un brin isolé</p> <p>Merci à Atlas of Genetics</p>                               | <p>Deux exemples de replis: ADN épingle à cheveux et ADN cruciforme</p> <p>Merci à Atlas of Genetics</p>                                 | <p>ADN quadruplex.</p> <p>Merci à Atlas of Genetics</p>                                                                                                                 | <p>ADN I-motif (Zeraati et col. Garvan Institute)</p>                                |

## Le vaccin à ARN

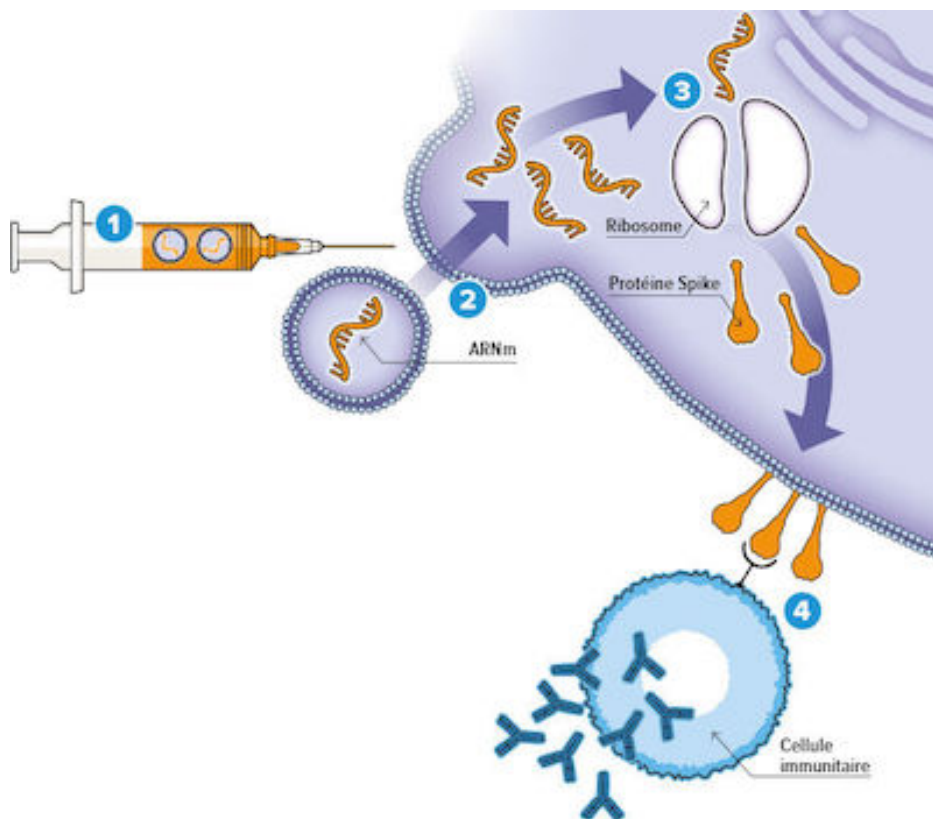
Le **principe d'un vaccin** (approprié ou non) est de stimuler le système immunitaire pour que le corps soit mieux protégé contre une maladie déterminée. Pour cela **on injecte l'agent pathogène (virus ou bactérie) à dose faible, pour obliger le système immunitaire à produire des anticorps spécifiques de cet agent**. Ces anticorps seront encore présents pour défendre le corps d'une nouvelle attaque de cet agent infectieux.

On pense ainsi créer un moyen de protection en créant des gendarmes. En même temps, injecter un agent pathogène dans un corps sain n'est jamais inoffensif. Si cela protège d'une maladie, cela peut perturber ou dégrader d'autres fonctions. C'est ce qu'on nomme les effets secondaires.

En outre, en se concentrant sur une seule maladie, on ignore qu'il existe une **immunité non spécifique**, des mises en oeuvre de stratégie du corps qui s'opposent à toutes les maladies ou attaques. Elle consiste en cellules du sang et de la lymphe, telles que le complément, l'interleukine ou l'interféron, et bien d'autres.

Malgré cela, on a multiplié le nombre de vaccins, en en créant pour de plus en plus de maladies. Les méthodes de fabrications ont aussi évolué. Au lieu d'injecter des virus entiers, on a injecté des fragments de virus, produits par des cellules cultivées en laboratoire.

**Des vaccins sans agent infectieux** sont apparus avec le développement du génie génétique. Ils se basent sur l'**injection d'une protéine**.



### 1 Capsule d'ARN

Le vaccin est constitué de fragments d'ARN messager enveloppés dans des bulles de lipides. Cet ARNm contient le plan de montage d'un morceau caractéristique du virus, la protéine Spike.

### 2 Entrée de l'ARN dans la cellule

Après l'injection du vaccin, la capsule lipidique fusionne avec la membrane de la cellule humaine. Ainsi l'ARNm est déversé dans la cellule.

### 3 Production des protéines spike

Les ribosomes, qui sont les « usines à protéines » de la cellule, lisent l'ARNm et fabriquent les protéines Spike. Dans les heures qui suivent, l'ARNm est détruit. Les protéines produites migrent à la surface externe de la cellule.

### 4 Réponse immunitaire

À l'extérieur, certaines cellules immunitaires repèrent les protéines Spike, s'y attachent et

*produisent des anticorps. D'autres cellules interviendront pour la mise en mémoire. Ainsi notre système immunitaire apprend à reconnaître et à lutter contre Spike et sera prêt à contrer le vrai virus Sars-Cov2 en cas de future infection.*

*Merci à Que choisir*

Avec **les vaccins à ARN**, on est passé à une étape au-dessus. **Les protéines pathogènes ne sont plus cultivées en laboratoire mais fabriquées directement par les cellules du patient.** Pour cela on lui injecte des molécules d'ARN synthétiques qui codent pour la fabrication d'une protéine spécifique (l'antigène). Dans le cas de la covid, il s'agit de la protéine spike, un morceau du virus SARS-COV 2. Cette protéine est nocive car elle ouvre la porte des cellules aux virus.

L'ARN doit être introduit dans le cytoplasme des cellules où il produit la protéine. Le système immunitaire régit en produisant des anticorps (une autre protéine).

Le problème avec l'ARN, qui est fait d'un seul brin, contrairement à l'ADN fait de deux brins, c'est qu'il est très instable et se dégrade rapidement sans atteindre le cytoplasme protégé par la membrane cellulaire. C'est pourquoi les laboratoires fabriquent une enveloppe pour la molécule d'ARN, enveloppe faite de particules de graisse (lipidiques). Il s'agit en définitive d'un virus artificiel.

Dans le cas de la covid 19, il reste des mystères sur la nature de la protéine Spike fabriquée. Selon K. Kingston, ex-vice présidente de Pfizer, il s'agirait plutôt d'une nanoparticule lipidique magnétisée (MPEG) qui, en pénétrant dans la cellule, a la capacité de modifier la biologie cellulaire, créer des virus et contrôler les signaux du système nerveux. *(plus de détails dans la vidéo de Stew Peters, Covid-19 pas un virus)*

**Sources:** *Comment fonctionnent les vaccins à ARN (et à ADN) ?*, Bruno Pitard, The conversation, 26/11/2019; *Vaccins à ARN* sur Wikipedia; *Vaccin: l'ARN messenger, un espoir dans la lutte contre les autres maladies ?*, Jérôme Florin, RTL, 13/05/2021

# Histoire de l'épigénétique

## Un précurseur des empreintes épigénétiques: l'opéron

Au début des années 1960, les biologistes français **François Jacob** et **Jacques Monod** ont observé des bactéries placées dans une substance gélatineuse contenant deux sucres, le glucose et le lactose. Au début, les bactéries grossissent et se divisent en se nourrissant exclusivement de glucose. Mais quand il est épuisé, elles utilisent le lactose. Pour nous humains doués de raison qui nous mettons à la place de la bactérie, cela semble naturel et logique. Mais pour un biologiste perspicace qui sait que faute d'enzyme spécialisée, une bactérie est ordinairement incapable de digérer le lactose, cela démontre que dans les conditions d'absence de glucose, elle a été capable de fabriquer cette enzyme. Mais comment?

**Le code génétique offre plusieurs possibilités qui ne sont mises en œuvre qu'en fonction de l'environnement nutritif** qui agit comme un déclencheur. Dans le code génétique de la bactérie, certains gènes sont prévus pour donner l'instruction de la fabrication de l'enzyme de digestion du lactose, au cas où... En temps ordinaire, **ces gènes sont rendus inactifs parce qu'ils sont recouverts d'une petite molécule qui les inhibe**. En l'absence de glucose et en présence du lactose, cette coiffe se détache et dévoile le gène qui devient actif. Le mécanisme complet implique l'existence de gènes nommés **opérons** qui commandent la synthèse et la libération de la coiffe. Par la suite, d'autres chercheurs ont confirmé ces phénomènes avec des levures.

### Les années 1970 - 80

Le terme **épigénétique** a été introduit au début des années 1940 par le généticien **Conrad Waddington** pour désigner une nouvelle science visant à étudier les mécanismes par lesquels le génotype (les caractères propres à une espèce) engendre le phénotype (les caractères propres à un individu). Le terme a été repris dans un sens différent dans les années 1970. Il désigne dorénavant **les mécanismes moléculaires qui contrôlent l'expression des gènes par modification chimique de l'ADN ou des composants de la chromatine**.

Les travaux révélant l'activité différentielle des gènes selon l'état de la chromatine qui y est associée se multiplient dans les années 1960 et conduisent à la mise en évidence des premières réactions de modification des histones. À partir de l'observation, réalisée chez les bactéries, des modifications possibles de l'ADN, l'hypothèse selon laquelle la méthylation de l'ADN pourrait participer au contrôle de l'expression des gènes est proposée simultanément par Arthur Riggs et Robin Holliday en 1975, avant d'être confirmée expérimentalement. (*Quelle place pour l'épigénétique? Michel Morange*)

### Controverses

La question de savoir si nous sommes préprogrammés ou bien façonnés par l'environnement continue à susciter des controverses. L'épigénétique, en contradiction avec le dogme central du tout-génétique, garde encore un petit parfum d'hérésie.

Dès le début des années 1980, une nouvelle génétique, basée sur la notion de "génomome fluide", a vu le jour. Mais en dehors de quelques "hérétiques", personne n'osait s'opposer au dogme central ou à la théorie néo-darwinienne de l'évolution qui en dépend. Les choses ont beaucoup changé depuis que le génome humain, et beaucoup d'autres à la suite, ont été séquencés et déposés dans une base centrale de données librement accessibles. La base de données n'est pas très bonne pour les affaires [commerciales], ni pour la découverte de médicaments, mais elle s'avère cependant être une très bonne affaire pour la recherche qui expose la pauvreté de l'idéologie du déterminisme génétique et qui a pourtant été, en premier lieu, à l'origine de la création de la base de données. Il semble maintenant acquis que les expériences de vie des personnes au cours des périodes critiques de leur développement en bas âge, peut influencer, non seulement leur propre vie en tant qu'adultes, mais également la vie de leurs enfants et de leurs petits-enfants. (*De quoi les gènes se souviennent-ils? Dr. Mae-Wan Ho*)



## Définitions de l'épigénétique selon les scientifiques aujourd'hui

La définition la plus courante de l'épigénétique est **l'étude des changements héréditaires dans la fonction des gènes, ayant lieu sans altération de la séquence ADN**. (*L'épigénétique*)

Le terme épigénétique définit **les modifications transmissibles et réversibles de l'expression des gènes ne s'accompagnant pas de changements des séquences nucléotidiques**. Les changements peuvent se produire spontanément, en réponse à l'environnement, à la présence d'un allèle particulier, même si celui-ci n'est plus présent dans les descendants. Les phénomènes épigénétiques couvrent les paramutations, bookmarking, imprinting, les mécanismes rendant silencieux un gène, l'inactivation du chromosome X, l'effet de position, reprogrammation, transvection, l'effet maternel (l'effet paternel est plus rare car le sperme est un vecteur moins important de matériel non nucléotidique), de l'évolution des cancers, de plusieurs effets de la tératogenèse, de la régulation des modification d'histone et de l'hétérochromatine ainsi que des limitations de la parthénogenèse ou du clonage. (*Wikipedia, Épigénétique*)

L'intérêt de l'épigénétique est précisément d'être une vision du contrôle de l'information génétique complémentaire de la vision moléculaire antérieure; non une simple théorie concurrente. La notion vague d'état de la chromatine est aujourd'hui remplacée par la **description précise des interactions entre les formes modifiées des histones et les multiples protéines qui condensent ou décondensent celle-ci**. Mais cette description structurale a deux caractéristiques additionnelles: elle est dynamique, et elle n'est pas limitée aux interactions locales. L'architecture chromosomique et l'organisation tridimensionnelle du noyau sont l'objet d'un nombre croissant de travaux. (*Intérêt de l'épigénétique, Michel Morange, dans "Les régimes alimentaires influencent l'expression des gènes, Compléments en français, ISIS"*)

## La plasticité des cellules nerveuses, autre exemple de transformation et de flexibilité des organismes

En nous fournissant une vision d'un ADN qui se transforme en fonction des conditions de vie, l'épigénétique et les transposons lui ont donné la caractéristique de **flexibilité**, qui s'oppose à la rigidité du déterminisme génétique qui a prévalu avant. Or cette flexibilité transparait également dans un aspect des organismes découvert relativement récemment, la **plasticité des neurones**. Plus nous approfondissons nos connaissances sur le corps, plus nous découvrons ses incroyables facultés créatives et adaptatives, plus nous reculons les limites dans lesquelles notre esprit l'avait enfermé.

Les cellules nerveuses ou **neurones** sont les cellules qui constituent les nerfs et le cerveau. Alors que par le passé, on pensait qu'elles étaient créées une fois pour toutes de façon immuable, il est maintenant reconnu que d'une part, la cellule neuronale peut se transformer au cours de sa vie, et que d'autre part de nouvelles cellules peuvent être créées. On appelle cela la **plasticité neuronale**.

Sous l'effet de l'environnement et des expériences vécues, heureuses ou traumatisantes, un neurone peut changer de mode de fonctionnement, c'est-à-dire changer sa façon de réagir à une stimulation afin de s'adapter à la situation évolutive. Elle se traduit par des changements de la composition chimique du neurone, de sa forme et de sa structure. Des prolongements ou bras (appelés dendrites) apparaissent ou disparaissent. Des connexions entre neurones (les **synapses**) se développent ou se modifient. Ces connexions sont comme des mains qu'elles tendent vers les cellules proches, afin de leur acheminer des signaux.

Si la migration anatomique des neurones et la construction des structures du cerveau sont programmés par les gènes, on sait maintenant que les connexions prolifèrent de façon aléatoire, et que seules celles qui deviennent fonctionnelles grâce au feed-back environnemental perdurent et se stabilisent. D'autre part, le dogme de la perte progressive de neurones avec l'âge vient d'être remis en question par la découverte d'une neurogenèse chez les adultes. Non seulement les neurones peuvent développer de nouvelles dendrites à des fins connectives, mais aussi de nouveaux neurones peuvent apparaître. On appelle "plasticité" neuronale l'ensemble de ces modulations neuronales. (*L'inventus neuronal, Eugène Michel*)

Le fait neurobiologique de la plasticité, en démontrant que l'expérience laisse une trace structurelle et fonctionnelle dans le réseau neuronal, bouleverse l'opposition classique entre une étiologie psychique et une étiologie organique des phénomènes mentaux, introduisant du même coup à concevoir une causalité psychique capable de modifier l'organisation synaptique. La plasticité implique de penser le réseau neuronal comme restant ouvert au changement, à la contingence: le cerveau doit, dès lors, être vu comme un organe hautement dynamique, en interaction permanente avec l'environnement, de même qu'avec la vie psychique du sujet. La plasticité pouvant toujours modifier ce qui était, elle maintient le sujet ouvert à l'imprédictible dans la construction de l'individualité. La plasticité introduit donc à un nouveau paradigme pour penser le lien entre le fait psychique et le fait biologique. (*P. Magistretti et F. Ansermet, Université de Lausanne, Suisse, dans PSN, 5, septembre 2007*)

Chez les êtres humains également, les comportements, croyances et attitudes fondamentales que nous observons chez nos parents se retrouvent "imprimés" dans nos circuits internes, sous forme de connexions synaptiques, au niveau de notre subconscient. Une fois programmés dans notre subconscient, ces schémas vont nous dominer tout au long de notre vie, à moins que nous ne trouvions le moyen de les reprogrammer. (*Bruce Lipton, The biology of belief, cité dans Nexus magazine, 44, 2006*)

Pour *F. Lotstra*, de l'hôpital Erasme à Bruxelles, **les variations de la plasticité neuronale sont liées à l'épigénétique**. La plasticité, comme l'épigénétique, est influencée par l'environnement et contrôlée par l'activation ou la désactivation des gènes.

Pour le cerveau d'un jeune enfant en cours de développement, l'environnement social fournit les expériences les plus déterminantes, en agissant sur l'expression des gènes qui déterminent la manière dont les neurones vont se relier, et créer le réseau de connexions donnant naissance à l'activité mentale. (*Dr Daniel J. Siegel, The developing Man, 1999, cité dans Nexus magazine, 44, 2006*)

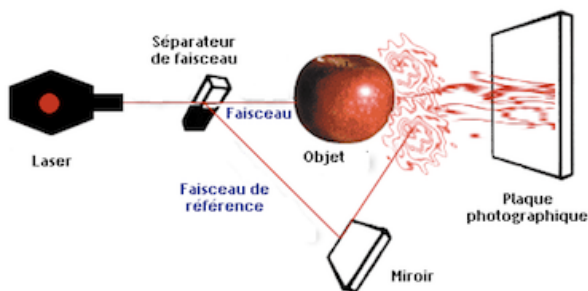
**Références:** La notion de plasticité neuronale a été développée par F. Ansermet et P. Magistretti dans leur ouvrage "A chacun son cerveau": La plasticité offre l'espace d'une mobilité, la capacité de se transformer, de se modifier, de devenir l'auteur et l'acteur d'un devenir différent que celui programmé par ses déterminants.

# Hologrammes

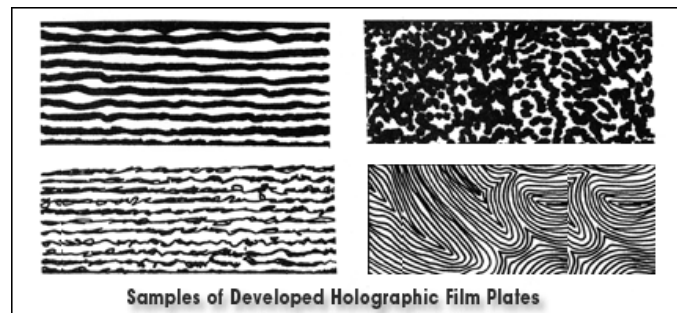
Photographier un objet (par exemple une pomme), éclairé avec de la lumière naturelle ou artificielle, revient à enregistrer les variations d'intensité et de couleur (fréquence) de cette lumière. Dans le procédé holographique, mis au point par **Dennis Gabor** en 1948, on enregistre en plus la **phase** de la lumière, ce qui permet de restituer l'image en 3 dimensions.

**La phase d'une onde est sa position dans le temps**, et doit être définie par rapport à un repère de temps. Le plus souvent, on parle de la différence de phase entre deux ondes. Si on représente une onde par une balançoire qui oscille, son intensité est la force avec laquelle on la pousse et sa fréquence est la vitesse avec laquelle elle fait un aller et retour. Pour comprendre sa phase, imaginons deux balançoires oscillant à la même fréquence avec la même intensité. Si elles sont synchronisées, on dit qu'elles sont en phase. Si elles sont décalées, il y a une différence de phase. La lumière ordinaire est composée de multiples ondes dont la phase est chaotique et inutilisable comme moyen d'enregistrement. Par contre, la phase est stable dans la lumière d'un laser.

Dans le procédé d'enregistrement holographique, un faisceau laser a été séparé en deux ondes dont l'une est la référence de phase. L'autre éclaire l'objet. **Les deux ondes se recombinent en interférences qui sont enregistrées sur la plaque photographique.** Le graphique qui en résulte est l'hologramme de l'objet. Si, au lieu d'une plaque, on imagine un écran, et au lieu d'une pomme un objet mouvant, on peut voir le film de ces interférences. C'est un hologramme dynamique.



*Principe de formation d'un hologramme*

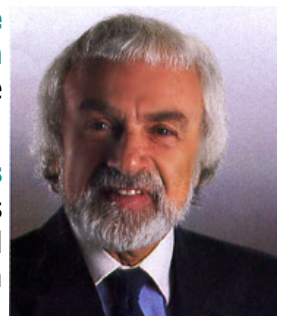


*Exemples d'hologrammes enregistrés sur pellicule*

*D'après Sybervision*

Les tracés holographiques sont composés d'interférences et ne sont pas directement interprétables par l'œil. Mais l'information sur l'objet y est contenue de façon complète, sous une forme transformée. C'est comme si l'objet était décrit dans un autre espace. **Si on éclaire l'hologramme enregistré par le même faisceau laser de référence, alors on restitue l'image de l'objet en 3 dimensions.** Si l'hologramme est dynamique, on le projette comme un film.

Une propriété remarquable de l'hologramme est que **dans chacune de ses parties se trouve l'information de la totalité de l'objet.** C'est pourquoi on a donné à ces images le nom d'hologramme qui signifie graphique du tout. Bien entendu, si on prend seulement une petite partie de l'hologramme, on perd toutefois quelle chose, c'est la résolution, la netteté de l'image, qui devient plus faible.



## Hologrammes biologiques

La notion d'hologramme a été introduite dans le domaine de la **neurologie** par **Karl Pribram** (1919 - 2015). En effectuant des expérimentations sur le cerveau des rats et des salamandres, il a montré que les souvenirs (par exemple la mémoire des procédés pour aller chercher la nourriture) persistent même quand le cerveau est détruit (*Languages of the Brain*, 1971). Il pressentait que l'enregistrement a lieu sous forme d'ondes, dans un champ électromagnétique qui enveloppe le cerveau. Travaillant avec Dennis Gabor, il montre que l'enregistrement a les caractéristiques d'un hologramme. **Lire un souvenir, c'est percevoir un hologramme.**

D'autres chercheurs travaillent selon ce concept (P. Marcer, W. Schempp, Edgar Mitchell), inspirés par les hypothèses du physicien David Bohm (L'ordre implicite). Selon eux, **le cerveau est une antenne** qui reçoit les fréquences et les traduit en images. **Percevoir, c'est former un hologramme**. Le souvenir de la perception est son enregistrement.

## Hologramme génétique et ondes polarisées

Comment le code génétique inscrit dans les hologrammes est-il lu et transmis? Par de nombreuses expériences et calculs théoriques en collaboration avec des spécialistes, l'équipe de Peter Gariaev, de l'Académie russe des Sciences naturelles et de l'Académie des Sciences médicales, a mis au point le modèle suivant.

### Information et ondes polarisées

Le code génétique holographique est contenu dans l'ADN (le chromosome). Les ondes qui proviennent des autres cellules ou de lui-même le lisent. Cela signifie qu'elles arrivent dans un certain état et repartent dans un autre. En effet, il est possible d'inscrire une information dans la matière ou dans une onde en modifiant de façon contrôlée et codée l'état de cette matière ou de cette onde (voir [Codage et information](#)).

Dans le cas du code génétique, Gariaev et coll. ont montré que **l'information était inscrite dans l'onde sous forme de polarisation**. Qu'est-ce que la polarisation de l'onde? Il faut savoir que toute onde électromagnétique vibre dans une direction perpendiculaire à sa direction de propagation, et que cette direction peut tourner autour de l'axe de propagation. Lorsque cette direction ne tourne pas, donc reste fixe, on dit que l'onde est **polarisée**. **On peut encoder une information en modulant de façon codée la direction de polarisation**. (voir mon article [Matière et rayonnements](#))



*L'ADN se comporte comme une chaîne de barres oscillantes parcourue de solitons (onde à une seule vague)  
Merci à P. Gariaev*

Lorsque la chaîne d'ADN est stimulée par une onde électromagnétique polarisée cohérente (naturelle ou projetée par un laser), elle s'ouvre localement, les 2 brins se séparent sur une distance de quelques nucléotides puis se réassocient. Cette fenêtre d'ouverture se déplace progressivement le long de la chaîne, comme une main qui caresse la chaîne pour en ressentir l'information. **L'ADN est parcouru d'une onde mécanique**. Une telle onde avec une seule vague, comme lorsqu'on donne une seule impulsion à une corde allongée librement sur le sol, s'appelle un **soliton**.

Dans la fenêtre où ils sont séparés, les 2 brins oscillent librement sous l'effet du soliton. Leur oscillation dépend de leur masse, c'est-à-dire de la nature en A+T ou C+G et de l'influence des barres voisines. Pour transmettre ses informations, **l'ADN produit des ondes polarisées dans des fréquences multiples, aussi bien dans le domaine lumineux que dans les ondes radio**. Ce fait a été utilisé avec succès par Gariaev et ses collaborateurs dans la conception du laser bio-ordinateur qui leur sert pour transférer des informations génétiques d'un donneur à un receveur.



## Les structures moléculaires qui polarisent la lumière

Les structures moléculaires qui sont capables d'agir sur la polarisation de la lumière sont des molécules dissymétriques. C'est le cas de l'ADN, de l'ARN et des protéines qui entrent dans la composition des chromosomes. Dans son milieu cellulaire, **l'ADN se replie selon un empilement structuré en cristal liquide nématique** (voir article *Cristaux liquides; Birefringence and DNA Condensation of Liquid Crystalline Chromosomes*, Man Chow et coll., 2010; *Are liquid crystalline properties of nucleosomes involved in chromosome structure and dynamics?* Françoise Livolant et coll. 2006).

La diffraction des ondes sur ces structures cristallines liquides crée les hologrammes. Sous l'effet d'une onde lumineuse, ces molécules captent de l'énergie et prennent une autre forme qui polarise la lumière différemment. Ces structures pourraient être des lieux de stockage des hologrammes et en même temps émettre des photons lumineux.

**Source:** *Wave Genetic Bio-Management nanotechnologies, Theory and empirical evaluation*, Tertishnii G.G. et Gariaev P.P., 2007, *New medicine technologies*, 7, 49

# Les expériences du Pr. Luc Montagnier sur la synthèse de l'ADN

## Signaux électromagnétiques de bactéries et de virus enregistrés dans l'eau

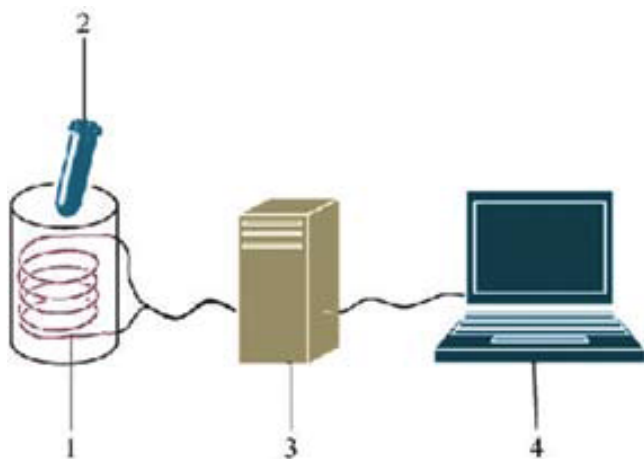
Dans une première série d'expériences, les chercheurs ont détecté les signaux électromagnétiques émis par des bactéries et des virus en solution dans l'eau selon une technique issue des expériences du professeur [Jacques Benveniste](#).

Le protocole expérimental est le suivant. Une population de **cellules pathologiques** (Mycoplasma Pirum) est mise en solution dans l'eau. Puis l'expérimentateur **élimine toute cellule de cette solution en la filtrant** avec des filtres dont les trous sont calibrés à une taille inférieure à celle des cellules (100 nm et 20 nm). Il vérifie que l'élimination est effective.

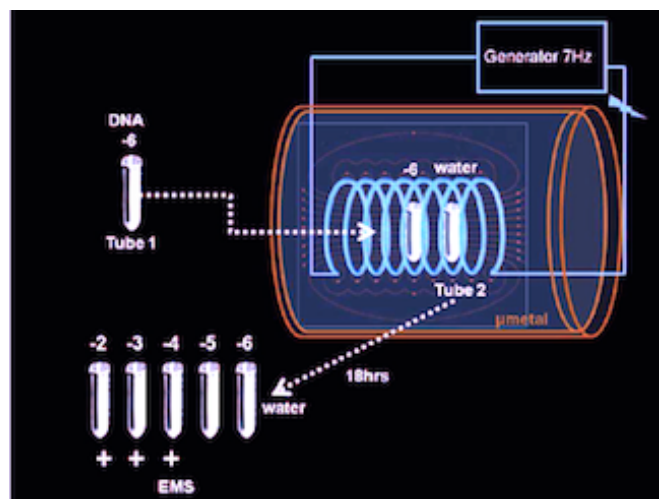
**L'eau est ensuite diluée** au 1/10e, puis à nouveau au 1/10e plusieurs fois, et **agitée** chaque fois pendant 15 s selon un protocole défini. Les dilutions successives sont versées dans des tubes en plastique, qui sont ensuite bouchés hermétiquement. Chacun des tubes est placé à son tour dans une bobine de fil de cuivre qui détecte la **présence éventuelle d'ondes électromagnétiques**.

Dans ces conditions, **la détection d'ondes a été positive pour des dilutions moyennes** ( $10^{-5}$  à  $10^{-12}$ ), et négatives pour les basses et les hautes dilutions. Les ondes détectées ont une fréquence d'environ 1000 Hz. Aucun signal n'a été détecté pour les solutions non filtrées, donc contenant encore les cellules.

Ce qu'on déduit à ce stade, c'est qu'**un signal a été enregistré dans l'eau** préparée selon un protocole de dilution défini. Il y a une autre condition indispensable à l'apparition du signal. L'eau doit être placée **dans un champ électromagnétique de fréquence d'environ 7 Hz**. Elle l'est naturellement par l'environnement car la Terre est soumise en permanence aux **ondes de Schumann** qui sont des fréquences de résonances de l'ionosphère. Si ce champ est coupé par une protection en mumétal, aucun signal ne se produit dans les dilutions. À moins qu'on ajoute un champ artificiel de 7 Hz.



Montage expérimental du Pr. J. Benveniste pour la mesure des signaux électromagnétiques émis par des solutions diluées. 1. Bobine en fil de cuivre; 2. Solution, 1 ml en tube scellé plastique; 3 et 4. Amplificateur et ordinateur



Montage expérimental du Pr L. Montagnier pour le transfert de signaux électromagnétiques d'un tube à l'autre. Tube 1, contenant la solution filtrée et diluée; tube 2, eau pure ou eau avec constituants de l'ADN; bobine de cuivre créant un champ magnétique de 7 Hz; entourée de mumétal

Extrait de L. Montagnier et coll., *DNA Waves and Water*

L'empreinte de la cellule dans l'eau s'est traduite par un changement de la structure de l'eau. Des petits assemblages de molécules d'eau se constituent, et ce sont eux qui émettent les signaux. L'expérience a été

reprise avec des **bactéries**. Dans ce cas, on n'obtient pas de signal lorsque l'eau est filtrée avec un calibre de 20 nm. Cela indique que **les structures d'eau sont des assemblages minuscules (nanostructures) avec une taille comprise entre 20 et 100 nm**. Des chercheurs italiens réputés, *Giuliano Preparata et Emilio Del Giudice*, ont démontré qu'elles sont détruites en chauffant au-dessus de 70°C ou en congelant en-dessous de -80°C.

Il n'est pas besoin de mettre la cellule entière en solution dans l'eau pour obtenir cette empreinte. Des résultats analogues ont été obtenus avec **l'ADN extrait des bactéries**, et même avec un court fragment de cet ADN. C'est donc **l'ADN qui crée la structure qui est imprimée dans l'eau**. Il est donc logique que l'on ait obtenu les mêmes résultats avec des **virus**, dont le rétrovirus HIV lié au SIDA. Dans ce cas, toutefois, il y a une légère variante: un signal électromagnétique n'est pas produit à partir l'ARN constitutif du virus, mais avec sa transcription en ADN. C'est l'ADN qui imprime son signal à l'eau.

### **L'empreinte électromagnétique de l'ADN est transférée à un tube d'eau pure**

Dans un deuxième temps, Montagnier a montré qu'il était possible de transférer l'empreinte électromagnétique de l'ADN dans un autre tube d'eau pure selon le protocole suivant.

Il a pris certaines des dilutions préparées précédemment à partir d'un fragment d'ADN du virus VIH qui présentent un signal, par exemple la solution diluée à 10<sup>-6</sup> (voir figure, tube 1). Il l'a placée à côté d'un autre tube contenant de l'eau pure filtrée à 450 nm et 20 nm et diluée de la même façon que celle ayant contenu de l'ADN (figure, tube 2). Les tubes sont soumis à un champ de 7 Hz pendant 18h à la température ambiante et protégés des champs extérieurs par un blindage en mumétal autour de la bobine. On mesure les signaux électromagnétiques émis par chaque tube.

Le résultat est que le tube 2 contenant de l'eau pure émet aussi des signaux pour les dilutions correspondant à celles qui donnent des signaux positifs dans le tube 1. Cela prouve que **les signaux portés par les nanostructures dans l'eau du tube 1 ont été transmis à l'eau pure du tube 2 en 18h**. Ce transfert n'a pas lieu si ce temps est inférieur à 16h, si la bobine est absente ou le champ magnétique coupé, si la fréquence d'excitation est moins de 7 Hz, ou si l'ADN est absent du premier tube à l'origine.

### **L'empreinte est transférée à un tube contenant les ingrédients de l'ADN**

Les ondes transférées sont la signature des cellules placées à l'origine dans le tube 1, mais quel est le contenu de cette signature? Pourrait-elle fournir suffisamment d'informations pour recréer une séquence d'ADN? Normalement, on pense que non. De l'ADN ne peut être créé qu'à partir d'une autre molécule d'ADN qui se recopie par séparation des 2 brins. **Le brin séparé de l'ADN comporte le plan** qui permet d'assembler l'autre brin avec les constituants présents dans l'entourage.

L'expérience a été tentée en transférant le signal à un autre tube, le tube 2 comme précédemment, mais cette fois ce tube contient en solution les composants de l'ADN (nucléotides, amorces, polymérase). Le résultat est oui. **De l'ADN a été produit par ce transfert électromagnétique**.

La détection de l'ADN par la technique habituelle chez les biologistes, l'électrophorèse sur gel d'agarose, met en évidence un ADN de la taille attendue (104 paires de bases). Seulement 2 paires de bases sur 104 étaient différentes de la séquence de l'ADN d'origine. L'expérience a été reproduite 12 fois avec les mêmes résultats. Elle a également été reproduite avec une séquence d'ADN de la bactérie *Borrelia burgdorferi*, l'agent de la maladie de Lyme.

**Sources:** Ces recherches sont rapportées dans 2 publications scientifiques et dans une conférence des prix Nobel intitulée *DNA waves and water* prononcée à Lindau le 28 Juin 2010. Larry Hecht la commente dans sa revue scientifique américaine *21st Science & Technology* (traduction et commentaires dans le site *Solidarité et progrès*).

*Electromagnetic Signals Are Produced by Aqueous Nanostructures Derived from Bacterial DNA Sequences*, Montagnier L, Aissa J, Ferris S, Montagnier J-L, Lavalley C, *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 2009, 1, 81-90

*DNA Waves and Water*, Luc Montagnier, J. Aissa, E. del Giudice, C. Lavalley, A. Tedeschi and G. Vitiello, *Journal of Physics*, 2011, 306, 012007

*Des signaux "homéopathiques" ont été détectés à partir de l'ADN*, Mae-Wan Ho, *ISIAS Biologie Médecine*, 2010

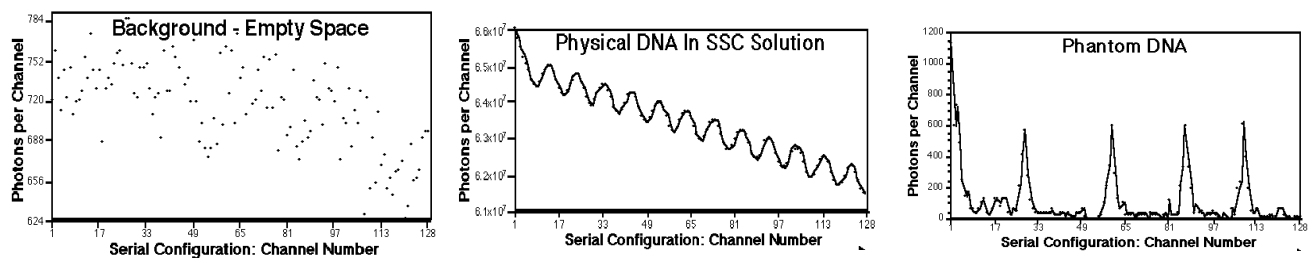
*Une séquence d'ADN reconstituée à partir de la mémoire de l'eau*, Mae-Wan Ho, *ISIAS Biologie Génétique*, 2011

## Le champ "fantôme" de l'ADN

Le Dr. Gariaev et son équipe ont d'abord mis en évidence le champ de l'ADN par un effet dit "fantôme". Ils ont mené une série d'expériences consistant à étudier le comportement d'une solution d'ADN dans de l'eau. La solution (3 mg d'ADN dans 3 ml d'eau) est mise dans un petit récipient en quartz et stabilisée au citrate de sodium (tampon SSC). Les molécules d'ADN y sont mobiles et agitées d'un mouvement erratique nommé mouvement brownien.

Les spectrographies sont courantes dans les études scientifiques afin de mesurer toutes sortes de caractéristiques des substances. Dans le cas présent, la solution est introduite dans un appareil où elle est traversée par un rayon laser dont la diffusion est recueillie dans les différentes directions. L'analyse de ces photons diffusés permet d'en déduire des renseignements sur la taille et la vitesse de déplacement des particules en solution. Cette technique est appelée *diffusion dynamique de la lumière* (DLS) ou encore *spectrographie par corrélation de photons* (PCS) (avec un spectrographe Malvern).

Pour comprendre l'effet de l'ADN sur cette diffusion, il faut la comparer à ce qu'on obtient sans la solution. Lorsque le récipient est vide, les expérimentateurs ont constaté sans surprise que les photons diffusés sont distribués complètement au hasard (fig.a).



*a- Diffusion corrélée en l'absence de la solution d'ADN*

*b- Diffusion corrélée en présence de la solution d'ADN*

*c- Diffusion corrélée après avoir enlevé la solution d'ADN*

*Expérience et figures réalisées par P. Gariaev et son équipe.*

*Reproduites de L'onde ADN bio-numérique*

Dans un deuxième temps, les expérimentateurs ont introduit la solution d'ADN. Ils ont obtenu des fluctuations périodiques bien précises, caractéristiques des molécules en solution (fig. b). Puis, ils ont vidé le récipient et ont recommencé. Contre toute attente, la courbe obtenue n'est plus celle du début, mais ressemble à celle obtenue en présence d'ADN (fig. c). **Tout se passe comme si l'ADN est encore présent, comme s'il avait laissé son empreinte** (les expérimentateurs l'appellent son fantôme).

**Cette empreinte peut persister pendant plus d'un mois**, même si on tente de l'effacer en soufflant régulièrement de l'azote dans le récipient.

Ce phénomène bouscule notre représentation d'un champ d'information. En effet, si en présence de l'ADN l'onde électromagnétique du laser est dispersée par le champ électromagnétique des atomes de l'ADN, par quoi est-elle modulée en l'absence d'ADN? Quelle est la nature de ce fantôme? On doit admettre qu'il existe un milieu subtil, une substance primordiale, dans laquelle le champ de l'ADN a laissé son empreinte.

Cette substance a la capacité de conserver une mémoire, d'enregistrer des informations. L'existence de cette substance commence à être bien documentée par les avancées récentes de la physique quantique. C'est le **champ du vide**, appelé aussi **champ de cohérence universel** ou **matrice universelle** (voir [article Éther et énergie du vide et suivants](#)).



# Ondes d'échelle et protéodics

Comment des protéines peuvent-elles être sensibles à certaines mélodies musicales telles que les a mises en évidence le physicien Joël Sternheimer?

L'explication fait appel à des recherches approfondies dans le domaine de la physique quantique, ainsi qu'aux mécanismes biologiques précis de la synthèse des protéines.

Ces recherches ont des répercussions dans plusieurs domaines.

- **Sur le plan de la physique théorique, une extension des fondements de la mécanique quantique**, intégrant le sujet (l'observateur) dans les principes fondamentaux. Cela conduit à la mise en évidence d'un univers ou d'un espace-temps uni entre les différentes échelles d'observation par l'existence des ondes d'échelle.
- **Sur le plan biologique**, la mise en évidence d'une **structure musicale des protéines** et des ARN messagers qui les définissent. Il s'ensuit la prédiction de signaux envoyés par les protéines en formation (les ondes d'échelle), vers d'autres protéines.
- **Sur le plan pratique**, la possibilité d'intervenir pour **activer ou inhiber la synthèse de ces protéines** de l'extérieur, de façon non destructive par des mélodies musicales appelées protéodics, confirmant ainsi la réalité de ces signaux.

## Invariances et symétries

En mécanique classique, les mouvements des corps matériels sont le plus souvent calculés par les formules de Newton, largement enseignées. Toutefois elles ne sont pas la seule façon de décrire mathématiquement les lois régissant ces mouvements. Le principe de moindre action ou principe de Hamilton en donne une formulation plus générale, proposée par le mathématicien Joseph Louis Lagrange (1736 - 1813). Elle est aussi plus élégante, car elle rend symétriques les coordonnées de position et de vitesse, en introduisant les coordonnées généralisées d'un système de particules. En conséquence, cette formulation lagrangienne est invariante si l'on change le système de coordonnées. C'est ce qui fait sa puissance. (*voir mon article [Matière et rayonnements](#)*)

Pour un système physique fermé, même si son état varie avec le temps, l'invariance des lois physiques dans certaines transformations de symétries entraîne des lois de conservation (théorème de **Emmy Noether**, mathématicienne allemande, 1882 - 1935).

La **conservation de l'énergie** du système est la conséquence de l'**uniformité du temps** (invariance du lagrangien dans le temps)

La **conservation de la quantité de mouvement ou impulsion** (produit de la masse par la vitesse) est la conséquence de l'**homogénéité de l'espace** (invariance dans la translation)

La **conservation du moment angulaire ou moment cinétique** (produit de l'impulsion par le rayon de la rotation) est la conséquence de l'**isotropie** - mêmes lois quelle que soit l'orientation - de l'espace (invariance dans la rotation).

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein est issue de l'invariance des lois physiques par rapport au **temps**. Ensuite il a fondé la relativité générale sur l'invariance des lois physiques par rapport à l'**espace**.

## Invariance d'échelle

Or, il existe une autre invariance très rarement citée et généralement oubliée, celle de l'**échelle d'observation**.

C'est-à-dire que les lois ne changent pas, que vous décriviez un système physique à une échelle microscopique ou à une échelle astronomique. Mathématiquement, cela se traduit par des lois qui ne changent pas si on redimensionne les longueurs, par exemple en multipliant l'unité de mesure par un même nombre scalaire (du latin *scala*=échelle).

En 1918, le mathématicien allemand **Hermann Weyl** a étendu la théorie de la relativité générale pour tenir compte de cette invariance d'échelle. Actuellement, on appelle cette invariance *invariance de jauge*.

Un exemple d'invariance d'échelle existe en musique lorsqu'on considère les notes d'une gamme, plus exactement les intervalles entre les notes (mesurés en tons et demi-tons). Les intervalles ne varient pas si on joue les notes à l'octave supérieure. Dans la gamme tempérée, les intervalles ne changent pas même si on décale la gamme de quelques tons ou demi-tons (*voir mon article [Tons et tempéraments](#)*)

## Ondes d'échelle

L'invariance d'échelle entraîne l'existence d'ondes d'échelle, qui relient les niveaux successifs dans l'organisation de la matière. Cela a été démontré par J. Sternheimer grâce à des outils avancés de la physique quantique. L'onde d'échelle **assure la cohérence entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique** « de la même façon que les ondes de la mécanique quantique permettent d'assurer la cohérence entre les descriptions d'une particule ou d'un système physique en différents points de l'espace-temps. » (*Extrait de: [Ondes d'échelle. I. Partie physique - théorie linéaire](#), Joël Sternheimer, 1992*)

| Correspondance entre acide aminés et notre de musique de la gamme tempérée |         |             |               |            |
|----------------------------------------------------------------------------|---------|-------------|---------------|------------|
| Acide aminé                                                                | Symbole | Code-lettre | Stimulation   | Inhibition |
| Glycine                                                                    | Gly     | G           | La 2 (220 Hz) | Fa 4       |
| Alanine                                                                    | Ala     | A           | Do 3          | Ré 4       |
| Sérine                                                                     | Ser     | S           | Mi 3          | Sib 3      |
| Proline                                                                    | Pro     | P           | Fa 3          | La 3       |
| Valine                                                                     | Val     | V           |               |            |
| Thréonine                                                                  | Thr     | T           |               |            |
| Cystéine                                                                   | Cys     | C           |               |            |
| Leucine                                                                    | Leu     | L           | Sol 3         | Sol 3      |
| Isoleucine                                                                 | Ile     | I           |               |            |
| Asparagine                                                                 | Asn     | N           |               |            |
| Acide aspartique                                                           | Asp     | D           |               |            |
| Glutamine                                                                  | Gln     | Q           | La 3          | Fa 3       |
| Acide glutamique                                                           | Glu     | E           |               |            |
| Lysine                                                                     | Lys     | K           |               |            |
| Méthionine                                                                 | Met     | M           |               |            |
| Histidine                                                                  | His     | H           | Sib 3         | Mi 3       |
| Phénylalanine                                                              | Phe     | F           | Si 3          | Mib 3      |
| Sélénocystéine                                                             | SeC     | U           |               |            |
| Arginine                                                                   | Arg     | R           | Do 4          | Ré 3       |
| Tyrosine                                                                   | Tyr     | Y           |               |            |
| Tryptophane                                                                | Trp     | W           | Ré 4          | Do 3       |

## Retrouver le rapport entre sujet et objet

Un peu plus tard, J. Sternheimer confirma l'existence théorique des ondes d'échelles en suivant un autre raisonnement sur des bases plus philosophiques. En physique quantique, remarque-t-il, on est toujours ramené à des mesures, par exemple les positions et vitesses de particules - les objets - dont les valeurs sont prédites par des ondes de probabilité. Mais alors, cela implique qu'**il y a quelqu'un qui mesure, un sujet actif qui ne fait pas partie de la théorie.**

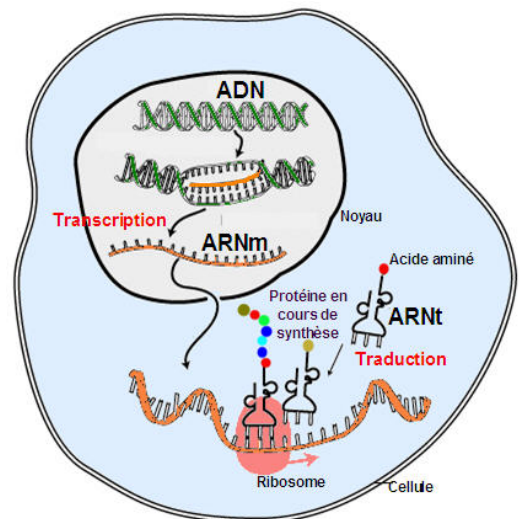
Cela se traduit par une asymétrie dans les équations mathématiques de la physique quantique. Y introduire le sujet, c'est introduire une relation réciproque entre sujet et objet, c'est **rendre les équations homogènes en leur ajoutant deux dimensions, en plus des 4 dimensions de l'espace-temps**. C'est de ces 2 dimensions supplémentaires que sont issues les ondes d'échelle qui relient entre elles les différents niveaux du système décrit par le sujet.

Cette extension de la physique quantique présente un autre intérêt: c'est de porter un regard totalement différent sur notre monde, dans lequel le sujet est impliqué. En effet, dit. J.S., avec la physique quantique actuelle, « On a toujours une science qui ne décrit que des objets alors qu'elle prétend décrire l'univers entier et donne l'origine du monde comme un big bang. En toute logique, elle s'arroge ensuite le droit de manipuler ces objets, d'en faire ce qu'elle veut et cela donne les manipulations transgéniques que l'on connaît. Malgré ou peut-être à cause de ses succès, elle reste fondamentalement ignorante et irrespectueuse du sujet et de son autonomie. Je suis alors amené à considérer [...] quel doit être le rapport entre le sujet et l'objet pour que ce sujet mesure toujours la même chose. » (Extrait de *Dialoguer avec le vivant*, interview par Anne de Grossouvre, Alliance n° 3, 2005)

**Pour plus de détails, voir aussi:** *Génodique appliquée à la guérison des écosystèmes*, Joël Sternheimer, Colloque Serge Winogradsky, Colombes, 2006; *Le lieu de la distinction sujet-objet dans les sciences de la nature*, Joël Sternheimer, Conférence: Colloque Prospective III, Cerisy-la-Salle, 2001

## Ondes d'échelle en biologie

Le concept d'onde d'échelle est particulièrement fructueux en biologie, appliqué à la formation des protéines. Comme décrit dans le premier chapitre de cet ouvrage, de l'**ARN messager** (ARNm) se moule sur un petit fragment de l'ADN, puis émigre en-dehors du noyau vers le cytoplasme qui entoure celui-ci, où il est pris en charge par un ribosome (molécule complexe spécialisée dans l'assemblage des acides aminés pour produire des protéines). Là, il fournit l'information relative à l'ordre d'assemblage des acides aminés qui arrivent portés par un petit ARN, l'**ARN de transfert** (ARNt). À ce moment, l'acide aminé s'accroche au bout de la chaîne protéique en formation. (voir schéma ci-contre)



« Ce qui nous intéresse plus particulièrement ici, c'est ce qui se passe au moment précis où l'acide aminé porté par son ARNt vient s'accrocher sur le ribosome. Il se passe quelque chose ... à savoir que **l'acide aminé, à ce moment-là, émet un signal ... et qui s'appelle précisément une onde d'échelle** ... en fait, elle relie de façon précise l'échelle de chaque acide aminé à l'échelle de la protéine en formation. Ce signal a une certaine fréquence, une certaine longueur d'onde. » (Extrait de *Exposé à l'Académie des Sciences de Tokyo-Kanagawa*, J. Sternheimer, 1993)

## Une onde pour une molécule

Le principe d'associer une onde à une particule ou une molécule est issu des découvertes du physicien français **Louis de Broglie** (1892 - 1987 - prononcez de Breuil).

Depuis les travaux d'**Einstein** (1879 - 1955), on sait qu'à une onde électromagnétique on peut associer une particule de masse nulle appelée le *photon*. De Broglie a généralisé cette association onde+particule à des objets de masse non nulle auxquels il a associé une onde de fréquence  $f = mc^2/h$ , et de longueur d'onde  $\lambda = h/mv$  où  $h$  est la constante de Planck,  $m$  la masse de l'objet, et  $v$  sa vitesse. (voir mon article *Physique quantique: les concepts fondamentaux ainsi que Musique des particules élémentaires: invariance d'échelle, quantification et lois musicales dans la matière*, J. Sternheimer, Séminaire Lichnerowicz, Collège de France, Paris, 1984)

Qu'en est-il pour un acide aminé? La molécule d'un acide aminé a une taille de l'ordre de 3 Å (angström - 1 angström = 0,1 nanomètre =  $10^{-10}$  mètre). Lorsqu'il est en liberté dans le cytoplasme, il est soumis à une

agitation thermique (vibration de chaleur), donc à une vitesse d'oscillation, qui se traduit par une onde correspondante, de longueur d'environ 0,2 Å « Sa longueur d'onde de de Broglie est alors négligeable au regard de sa taille. Mais **lorsqu'il s'accroche sur le ARNt**, ce n'est plus tout à fait le cas: fixé par un seul degré de liberté, il conserve une relative autonomie, tout en étant déjà fortement ralenti vis-à-vis de l'agitation thermique. Sa longueur d'onde, inversement proportionnelle au produit de sa masse par sa vitesse, cesse alors d'être négligeable [environ 0,84 Å] et ses propriétés quantiques commencent à apparaître. Et lorsque le ARNt qui le porte vient se fixer sur le ribosome, la stabilisation vis-à-vis de l'agitation thermique devient considérable, et la longueur d'onde de l'acide aminé [environ 15 Å] dépasse sa taille de plusieurs ordres de grandeur: **son comportement est alors celui d'une onde, ce qui signifie que, pendant le bref instant où cela se produit, l'acide aminé émet un signal.** » (Extrait de *Exposé à l'Académie des Sciences de Tokyo-Kanagawa*, J. Sternheimer, 1993)

## Ondes d'échelle et musique

Décrivant l'équation de cette onde d'échelle, J.S. a montré que « Cette onde est la superposition d'ondes de vitesses différentes, sous-multiples entiers de la plus rapide, et qui vont donc relier l'échelle de chaque acide aminé à l'échelle au-dessus (la protéine) en des temps multiples entiers du temps mis par cette dernière: on va donc avoir des superpositions périodiques des vibrations (contenant elles-mêmes des harmoniques) associées aux acides aminés, qui vont ainsi **induire des propriétés musicales dans la succession des fréquences associées aux acides aminés.** » (*Ondes échelle II. Aperçu de théorie non-linéaire et d'applications biologiques*, J. Sternheimer, 1984)

On est donc passé d'une description en longueur d'onde à une description en fréquences. L'ordre de grandeur des fréquences associées aux acides aminés est environ de  $10^{25}$  hertz. L'amplitude de l'onde est donnée par le nombre de protéines de même nature synthétisées simultanément.

Si nous revenons à la succession des accrochages d'acides aminés qui forment la chaîne protéique, il y a donc une succession rapide des ondes d'échelle propres de chaque acide aminé. Il en résulte que « L'onde d'échelle que [l'acide aminé] émet alors va interférer, à l'échelle de la protéine, avec les ondes analogues préalablement émises par les autres acides aminés, ce qui va entraîner des contraintes de type musical » (*Procédé de régulation épigénétique de la biosynthèse des protéines par résonance d'échelle*, Joël Sternheimer, Brevet européen: EP 0 648 275 B1)

La distribution très particulière des masses de ces acides aminés fait que leurs fréquences sont distribuées selon des rapports très proches de ceux des notes de la gamme tempérée. On peut donc dire que ces fréquences sont musicales et étagées selon la gamme tempérée (*voir mon article Tons, tempéraments et intonation juste*).

Par transposition d'échelle, possible à cause de l'invariance d'échelle, en descendant d'un certain nombre d'octaves, **on peut les amener à une fréquence audible, donc située entre 20 et 2000 Hz.** Pour cela il faut descendre de 76 octaves environ. Il s'ensuit qu'à chaque acide aminé correspond une note musicale. **Une protéine étant constituée d'une suite d'acides aminés, il lui correspond une suite de notes, donc une mélodie.** J. Sternheimer l'a nommée une **protéodie** (protéine mélodie).

## Les notes musicales des protéodies

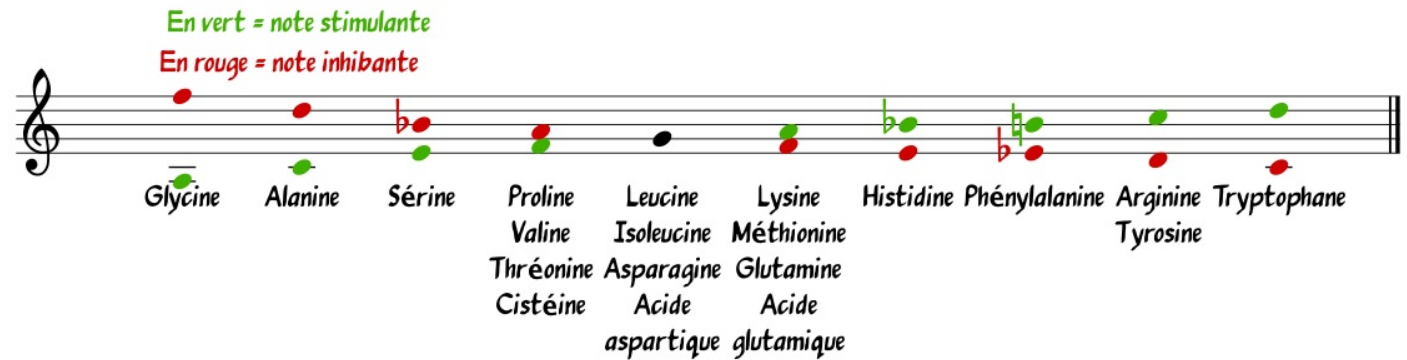
Il existe 22 acides aminés constituant des protéines, mais seulement 21 sont présents chez les eucaryotes. À chacun d'eux correspond une note, mais une même note peut correspondre à plusieurs acides aminés (*voir le tableau des correspondances*).

Les valeurs exactes des fréquences ne sont pas strictement celles de la gamme, même si elles en sont très proches. Elles dépendent « des proportions des groupements d'acides aminés dans la population des ARN de transfert environnant la biosynthèse de la protéine, et peuvent être calculées à chaque fois. » (*brevet européen*)

La composition de la protéodie est bien plus compliquée qu'une simple correspondance de notes. Il faut aussi déterminer le volume (intensité de la note), les rythmes, les timbres et le phrasé (*voir mes articles Sensations sonores*). Pour le volume, on est guidé par l'addition de séquences identiques qui réagissent



les unes sur les autres dans l'organisme considéré. Les rythmes sont influencés par les intervalles de temps qui s'écoulent réellement entre l'adjonction de 2 acides aminés. (voir [À propos du décodage des musiques de protéines](#), J. Sternheimer, 1990)



Merci aux élèves du lycée Théodore Aubanel à Avignon

## Exemple de protéodie, la prolactine

Selon wikipedia, la prolactine est une protéine constituée de 199 acides aminés chez l'être humain... C'est une hormone sécrétée par les cellules lactotropes de la partie antérieure de l'hypophyse. Ses rôles sont multiples, elle intervient notamment dans la lactation, la reproduction, la croissance, l'immunité et le comportement. Voici le début de sa protéodie directe:



## Stimulation et inhibition de protéines

Lorsqu'on diffuse la protéodie à l'organisme considéré, on peut constater - et c'est révolutionnaire - qu'elle a une **action stimulante sur la synthèse de la protéine** correspondante, même émise 76 octaves plus bas que la fréquence d'origine, par résonance d'échelle. Comme la synthèse de la protéine est sous le commandement d'un gène correspondant dans le filament d'ADN, on peut dire que **la protéodie permet de réguler simplement l'expression du gène, sans changer ce gène, donc par épigénétique**. La discipline qui étudie l'expression des gènes (synthèse de protéines) associée aux ondes d'échelle est nommée **génodique**.

J. Sternheimer a également découvert le moyen d'**inhiber la synthèse de la protéine** par une protéodie en opposition de phase à la protéodie stimulante. Cela a lieu lorsque les notes sont symétriques (en hauteur donc en fréquence) par rapport à la fréquence moyenne ou centrale (le SOL) de la protéodie stimulante (voir figure ci-dessus).

## Génodique appliquée à l'agriculture

En appliquant la génodique aux êtres vivants et particulièrement aux plantes, J. Sternheimer a inventé un **procédé de régulation de la synthèse de protéines au moyen de diffusions sonores de protéodies adéquates**, qui a fait l'objet d'un brevet (*Brevet européen: EP 0 648 275 B1, Procédé de régulation épigénétique de la biosynthèse des protéines par résonance d'échelle; date de dépôt: 02.06.1993; date de publication et mention de la délivrance du brevet: 29.08.2007*)

Pour une plante qui subit des agressions ou attaques de virus, bactéries ou champignons, ce procédé consiste à **stimuler certaines protéines qui renforcent ses métabolismes et ses défenses naturelles, et à inhiber des protéines de l'agresseur**. Par exemple, plusieurs expériences sur le terrain ont montré qu'il est possible d'améliorer la culture des tomates, des courgettes, de la vigne et autres plantes. Cela a consisté à stimuler l'enzyme (une protéine) qui régule la résistance à la sécheresse des

tomates, ou encore réduire la croissance des champignons de l'esca, maladie qui affecte les vignes. (*voir Synthèse des campagnes d'expérimentation in situ et utilisations pratiques de la méthode de régulation épigénétique de la synthèse protéique développée par J. Sternheimer, dans le domaine agricole: Étude des cas Vigne (champignons : Esca et Mildiou), Endive (bactérie : Erwinia) et Courgette (virus : WMV2, ZYMV), V. Prévost, M. Duhamel, P. Ferrandiz, H.Bonnet, J. Sternheimer, Experiment Findings, 2020*)

« En France, en Europe et en Afrique notamment, des essais ont été effectués sur différentes plantes depuis une douzaine d'années. Les résultats sont spectaculaires, tomates plus grosses, résistant mieux à la chaleur et aux maladies, stimulation de la photosynthèse chez des algues, résistance à une maladie pour les pieds de vigne évitant d'avoir recours à un traitement chimique... Il y a donc là des voies réellement alternatives par rapport à celle proposée par la science actuellement avec l'introduction des OGM. » (*Dialoguer avec le vivant, interview de J.S.par Anne de Grossouvre, Alliance n° 3, 2005*)

Cette méthode est développée et commercialisée par la société [Genodics](#), dont le but est, selon son site web, de « Renforcer et soigner les cultures avec des ondes sonores spécifiques » et « permettre aux plantes et aux élevages de résister à des maladies, de s'adapter aux variations climatiques et de renforcer des métabolismes. »

Et voici un témoignage paru dans Sud-Ouest en 2010: « Michel Haury, propriétaire du château La Grange-Clinet, à Saint-Caprais, a eu connaissance de ce traitement et a voulu tester le dispositif sur son domaine. « Cela fait un an que j'ai installé le diffuseur de musique au milieu d'une parcelle infestée par l'esca, explique-t-il. Tous les jours, à 19 heures précises, la musique se met à jouer automatiquement durant sept minutes à 65 décibels. Cela suffit pour traiter. » Le boîtier, alimenté à l'énergie solaire grâce à un panneau photovoltaïque, est entièrement automatisé. « Le résultat est stupéfiant, s'exclame Michel Haury. La maladie n'a plus évolué sur les pieds comme on aurait dû s'y attendre et aucun nouveau cas ne s'est déclaré. » (*Quand la musique soigne, 2010*)



*Diffuseur de protéodie dans une vigne  
Merci à [Genodics](#)*

# L'ADN, reflet du monde divin

Puisque l'ADN contient les codes de création et du développement des êtres humains, ainsi que de tout organisme vivant, et qu'il est enseigné et décrit depuis des temps immémoriaux que les créations de cet univers ont surgi à partir de codes divins faits de sons et de géométries (*voir mon livre numérique, Musique et Sons*), on peut s'interroger sur les liens entre ces codes divins et les codes génétiques. C'est ce qu'ont exploré divers chercheurs, qui ont rapporté des réponses séduisantes, à méditer.

Ainsi à propos de l'existence d'hélices à 3 brins dans les cellules biologiques, comme expliqué dans le chapitre 7, on nous dit que **les mondes divins sont sous-tendus par une gigantesque triple hélice invisible**, qui participe au développement des Univers dans les plans de Lumière. Le Big Bang n'en serait qu'une manifestation tardive sur le plan matériel.

Une autre correspondance a été découverte par le **Dr J.J. Hurtak** (Académie des Sciences du Futur) **entre la série des 4 bases nucléiques, A, C, G, T (ou U) et les 4 lettres hébraïques du nom divin Yahweh, YHWH (Yod-He-Wod-He ou Yod-He-Vav-He)**. Dans son article *l'ADN et les Noms Divins, recherche originale sur notre «Code Dieu» génétique selon les Clés d'Enoch®*, il écrit: Cette étude fut présentée par le Dr JJ. Hurtak en juin 1973 devant les membres de l'Académie de Parapsychologie et de Médecine et rendue publique dans son ouvrage: *Le Livre de la Connaissance: Les Clés d'Enoch®*.

Il a mis au jour plusieurs grilles de correspondances entre une série d'aspects linguistiques et génétiques lesquels sont en rapport avec la façon d'écrire le Nom Divin dans la bible hébraïque (YHWH ou YHWH).

Concernant la première grille, cette matrice ... est constituée de groupes de 3 lettres issus [des 4 lettres] du Nom de Dieu qui, dans leurs diverses combinaisons, emplissent les 64 cellules du tableau (ou matrice). [De même] l'Adn et l'Arn contiennent 4 lettres de nucléotides qui sont lues 3 par 3 pour déchiffrer un codon qui code un acide aminé de notre corps.

Le nom Divin est la véritable clé derrière le code de transcription de chaque lettre chimique à l'origine du développement du corps humain.

# En savoir plus

## Chapitre 1 - ADN moléculaire et code génétique

### Ouvrage sur papier

- **La biologie des origines à nos jours. Une histoire des idées et des hommes.** Pierre Vignais. EDP Sciences, 2001. Récit excellent, extrêmement bien documenté, qui fourmille de détails sur les acteurs de cette histoire. Sa lecture demande de posséder des bases scientifiques biologiques.

### Sites web éducatifs clairs et illustrés

- [Le Génie du génome](#). Voir l'ABC. De la cellule au gène. L'hérédité. Détaillé. Le Musée canadien de la nature
- [Biologie végétale et génétique](#), par Gilles Bourbonnais, Collège de Sainte-Foy, Québec. Excellent exposé, simple et abondamment illustré.
- [La naissance de la biologie moléculaire](#). Remarquable résumé de l'histoire de l'ADN comme support de l'hérédité.
- [Il était une fois.. l'ADN](#), un site éducatif sur les bases de la génétique classique et moléculaire.

### Sites plus spécialisés

- [Structure et physiologie de la cellule](#), par Christian Looockx
- [Les protéines](#), par Gilles Bourbonnais, Québec
- [La biologie amusante](#). par Didier Pol, professeur agrégé. Excellent site destiné à la formation des enseignants, basé sur l'expérimentation. Cellules et enzymes.
- [ADN: Structure Moléculaire](#), article de Jean-Loup Huret, dans l'Atlas of Genetics and Cytogenetics in Oncology and Haematology
- [Encyclopédie Wikipedia](#). Voir les articles [Chromosome](#); [ADN](#); [Caryotype](#); [Génome](#)
- [Les chromosomes](#), par D. Rabineau et JM. Dupont. Cours virtuel de l'hôpital Cochin
- [La structure de l'ADN](#). Un guide interactif et animé, créé par Eric Martz. Une belle animation de la molécule d'ADN que vous pouvez faire tourner dans tous les sens.
- [ADN et synthèse d'une protéine](#). Une **vidéo** intéressante pour visualiser, avec un commentaire plutôt chimique.

### Sites en anglais

- [La carte du génome humain](#). Chromosome par chromosome
- [Double helix: 50 years of DNA](#). Un dossier du journal Nature paru en 2003, dans lequel on trouve les [publications originales](#) de Franklin et Gossling, de Watson et Crick, et un article de [Crick](#) en 1974.

## Chapitre 2 - ADN et modes d'expression

### Ouvrages sur papier

- **La fin du «tout génétique» Vers de nouveaux paradigmes en biologie.** Henri Atlan, INRA, Essai (poche), 1999. Résumé de Maurice Porchet (extrait): Les facteurs «épigénétiques» conditionnent l'activation des gènes. Les preuves en sont multiples: un même gène fonctionne différemment selon l'organe dans lequel il se trouve; la forme définitive d'une protéine (ce qui détermine la fonction) n'est pas déductible de la séquence de l'ADN. La découverte des prions, véritable cas d'hérédité épigénétique, le prouve; l'inactivation permanente d'un gène codant pour une protéine essentielle peut ne pas entraîner de désordre visible dans un organisme, comme si le déficit produit était compensé par l'activation d'autres gènes. Bref, la relation entre la structure d'un génome et l'état d'expression des gènes fait apparaître une complexité fonctionnelle beaucoup plus grande que l'idée simpliste de l'ADN «programme» commandant la cellule.
- **La part des gènes, Michel Morange**, édition Jacob, 1998. Sommes-nous gouvernés par nos gènes? Pouvons-nous espérer d'une thérapie génétique la fin de tous nos maux? Devons-nous craindre des manipulations génétiques une dénaturation des êtres vivants qui nous plongerait dans l'aventure? Comment poser ces questions si, lorsqu'il sera déchiffré, le génome humain doit rester inintelligible, suite de caractères dont on ne voit guère la signification? Qu'est-ce qui est le plus important pour réussir un gâteau : le moule ou la cuisson? Qu'est-ce qui est le plus important pour comprendre la



vie: les gènes ou les protéines?

- **A chacun son cerveau: Plasticité neuronale et inconscient.** François Ansermet et Pierre Magistretti; Ed. Odile Jacob, 2004. Et si, selon le vœu même de Freud, la psychanalyse pouvait trouver un appui dans les neurosciences? Et si, réciproquement, celles-ci gagnaient à intégrer leurs découvertes au modèle psychanalytique? François Ansermet et Pierre Magistretti nous proposent ici une articulation originale entre deux disciplines souvent présentées comme antagonistes. Le point de rencontre: les mécanismes de plasticité neuronale grâce auxquels le cerveau reste ouvert au changement et modulable par l'expérience. En tout cas, le moment semble enfin venu d'explorer les bases biologiques de l'inconscient à travers un nouveau paradigme.

### Documents sur internet

- *Il était une fois.. l'ADN*, un site éducatif sur les bases de la génétique classique et moléculaire. *Transposons*
- *Cet ADN qui nous gouverne ou pas*. Génétique, hérédité, épigénétique. Excellent dossier illustré. Le journal du net, octobre 2006
- *Encyclopédie Wikipedia*. Voir les articles *ADN*; *Génome*; *Épigénétique*; *Enjambement génétique*; *Recombinaison génétique*; *Élément transposable*; *Plasticité neuronale*
- *Hérédité épigénétique - De quoi les gènes se souviennent-ils?* Dr. Mae-Wan Ho. L'hérédité épigénétique des caractères acquis est plus puissante que l'hérédité génétique, ISIS Report 12/01/09
- *L'épigénétique*. Le Réseau d'excellence Epigénome, un réseau de recherche européen dont la vocation est de soutenir des scientifiques de haut niveau dans ce domaine en rapide expansion qu'est l'épigénétique. *Qu'est-ce que l'épigénétique?*; *Comment l'épigénétique façonne-t-elle la vie?*; *Profils de jumeaux*; *Prix Nobel en épigénétique*
- *Le 21ème siècle sera-t-il épigénétique, voire méta-génétique?* Bernard Dugué, Agoravox, 11 décembre 2008
- *Quelle place pour l'épigénétique?* Michel Morange, Erudit, M/S: médecine sciences, avril 2005
- *Plasticité épigénétique et polarité de l'embryon*, Institut Curie, Paris.
- *Épigénétique du spermatozoïde*, S. Rousseaux et coll., Inserm, France. Gynécologie Obstétrique & Fertilité, 34, 9, 2006
- *Le mystère des différences entre vrais jumeaux dévoilé*, Futura Sciences, 14 juillet 2005
- *Génome, qu'est-ce que c'est?*, Futura-Science définition
- *Génétique et épigénétique des éléments transposables*, conférence de Vincent Colot, texte et vidéo de 1h03min, Planet-Vie, 2019
- *La plasticité neuronale: un nouveau paradigme entre neurosciences et psychanalyse*.
- *Neurones et créativité*, Eugène Michel

### Vidéo

- *Un fantôme dans nos gènes*. Film réalisé par Nigel Paterson. Producteur: BBC, Royaume Uni, 2005. Selon les chercheurs en épigénétique, nos gènes seraient susceptibles d'être modifiés par des événements extérieurs. Diffusion ARTE Sciences, 19 février 2007. Version originale en anglais: *The Ghost in Your Genes*. The scientists who believe your genes are shaped in part by your ancestors' life experiences.

### Sites en anglais et espagnol

- *Ghost in our genes*. Voir les rubriques *A Tale of Two Mice*; *Gene Switches*, *Epigenetic Therapy*
- *Epigenetica*, site en espagnol
- *Think beyond your genes. The biology of belief*. Bruce Lipton
- *DNA*, Encyclopédie Citizendium

## Chapitre 3 - Architecture de l'ADN

### Documents sur internet

- *Il était une fois l'ADN*, Dolan. DNA Learning Center, Cold Spring Harbor Laboratory, traduction Université de Genève. En particulier, 32 *Certains fragments d'ADN peuvent sauter*, B. McClintock; 33 *Les gènes peuvent être induits et réprimés*, J. Monod et F. Jacob
- *Projet génome humain*, Génoscope - Centre National de Séquençage

- *Biologie végétale et génétique*, Gilles Bourbonnais, Collège de Sainte-Foy, Québec. Voir *Chromosome 8, l'intérêt personnel*
- Encyclopédie Wikipedia: *Épissage*; *Gène*; *Empreinte génétique*; *Fichier national des empreintes génétiques*; *Génome*; *Projet génome humain*
- Empreintes génétiques: *FNAEG*: Fichier national des empreintes génétiques
- *En quête de l'identité*, les empreintes génétiques et l'identification judiciaire, Eric Heilmann
- *Les empreintes génétiques en pratique judiciaire*, Christian Doutremepuich, Bull. Acad. Natle Méd., 2012, 196, 6, 1117-1130
- *L'architecture brisée de l'ADN*, J.C. Perez

### Autres sites en anglais

- *Introns: a Mystery*
- *Introns first* par Donald R. Forsdyke
- *The Functions of Introns: From Junk DNA to Designed DNA*, par Jerry Bergman 11/18/2001  
Reprinted from Perspectives on Science and Christian Faith Volume 53, Number 3, September 2001
- *The Human Genome: RNA Machine*, J. Mattick, The Scientist, 2007, 21, 10, 61
- *The Principle of Recursive Genome Function*, Andras J. Pellionisz, The Cerebellum, 2008, 7
- *Transposons, or Jumping Genes*, Leslie Pray, Nature Education 2008, 1, 1
- *The Gems of "Junk" DNA*, Gibbs W. Wayt, Scientific American, 2003, November

## Chapitre 4 - ADN électrique

### Ouvrage sur papier

- *Nanobiotechnology: Bioinspired Devices and Materials of the Future*, sous la direction de Oded Shoseyov et Ilan Levy, Humana Press Inc., 2007. En anglais

### Documents sur Internet

- *La cellule, une pile électrique*, Didier Pol
- *L'ADN est un bon conducteur d'électricité*. Laurent Sacco, Futura-Sciences, 20 décembre 2007
- *De l'ADN artificiel pour de futurs bio-ordinateurs*. Laurent Sacco, Futura-Sciences, 9 juillet 2008.  
Des chimistes japonais viennent de synthétiser une forme d'ADN inconnue dans la nature, de composition différente. Ce bricolage biochimique ouvre des perspectives en nanosciences, notamment pour réaliser des bio-ordinateurs.
- *Un ADN artificiel pour les ordinateurs du futur*. Neo Trouve, Lepost, 23 mai 2009
- *ADN, du calcul à l'assemblage*. Bernard Yurke, La Recherche
- *Fils moléculaires conducteurs: la preuve par l'ADN. L'ADN dans les circuits intégrés, réalité de demain ?* CNRS Info, 391, mars 2001
- *Questions à Hélène Bouchiat: L'ADN conduit l'électricité*. La Recherche, mai 2008, 419. En utilisant des nanotubes de carbone, des chimistes américains apportent des preuves convaincantes de la conductivité électrique de l'ADN.
- *Ordinateur à ADN*, Wikipedia.

### Sites en anglais

- *DNA electronics in nanotechnology*; Michael Berger, 2007 Nanowerk LLC
- *Molecular Electronics*, 01/08/2001
- *IBM scientists create DNA computer chip*. Chris Jablonski, ZDNet, August 18, 2009. IBM scientists and a collaborator from the California Institute of Technology have created a computer chip utilizing synthesized DNA molecules.
- *What is a DNA Computer?* WisegEEK. *DNA computer*, tech-faq.com
- *DNA Mediated Energy Transfer* 03/01/2000
- *DNA conduction: the issue of static disorder, dynamic fluctuations and environmental effects*; R. Gutiérrez, D. Porath, and G. Cuniberti; In Charge Transport in Disordered Solids, Wiley (2006)
- *Modeling molecular conduction in DNA wires: Charge transfer theories and dissipative quantum transport*; R. Bulla, R. Gutiérrez, and G. Cuniberti; In Modern methods for theoretical physical chemistry of biopolymers, Elsevier (2006)

## Chapitre 5 -ADN électromagnétique et communication

### Ouvrages sur papier

- *Le champ de la cohérence universelle*, Lynne McTaggart, Ariane, 2002. La science vient tout juste de commencer à prouver ce que les anciens mythes et les religions ont toujours prétendu, c'est-à-dire qu'il existe bel et bien une force vitale reliant toutes choses. Infatigable journaliste d'investigation, Lynne McTaggart nous révèle un nouveau et radical paradigme biologique selon lequel, fondamentalement, l'esprit et le corps humains ne sont pas dissociés et distincts de leur milieu, mais forment plutôt une force pulsante qui interagit constamment avec cette vaste mer d'énergie.
- *Investigations sur le champ de conscience unitaire*, David Wilcock, Ariane Editions 2012. Cet ouvrage révèle un grand nombre de secrets: la transformation de l'ADN, la science de la conscience, les tunnels spatio-temporels, la géométrie sacrée, le temps multidimensionnel et un étonnant nouveau modèle des champs d'énergie galactiques responsables de notre évolution biologique, mentale et spirituelle.
- *The rainbow and the Worm*, The Physics of Organisms. Mae-Wan Ho, directrice de Institute of Science in Society (ISIS). World Scientific Publishing Company, 3e ed. 2008. What is It to be Alive?; Do Organisms Contravene the Second Law?; Can the Second Law Cope with Organized Complexity?; Energy Flow and Living Cycles; How to Catch a Falling Electron; Towards a Thermodynamics of Organized Complexity; Sustainable Systems as Organisms; The Seventy-Three Octaves of Nature's Music; The Coherent Excitation of the Body Electric; The Solid State Cell; ?Life is a Little Electric Current?; How Coherent is the Organism? The Heartbeat of Health; How Coherent is the Organism? Sensitivity to Weak Electromagnetic Fields; Life is All the Colours of the Rainbow in a Worm; The Liquid Crystalline Organism; Crystal Consciousness; Liquid Crystalline Water; Quantum Entanglement and Coherence; The Ignorance of the External Observer; Time and Freewill

### Livres scientifiques

- *Recent advances in biophoton research and its applications*. Sous la direction de F-A Popp, K.H. Li et Q. Gu, mai **1992**. The collection of articles in this book covers the historical background, the physics of biophoton emission, those biological phenomena which show evidence of a ?holistic? character, and finally discusses applications and biological evolution. This volume serves to bring researchers up-to-date on the subject and draws attention to the many exciting findings that are widely scattered in the scientific literature.
- *Biophotonics: Optical science and engineering for the 21st century*. Sous la direction de Xun Shen et Roeland VanWijk. **2005**. With CD-ROM. It is now well established that all living systems emit a weak but permanent photon flux in the visible and ultraviolet range. This biophoton emission is correlated with many, if not all, biological and physiological functions. There are indications of a hitherto-overlooked information channel within the living system. Biophotons may trigger chemical reactivity in cells, growth control, differentiation and intercellular communication, i.e. biological rhythms. The basic experimental and theoretical framework as well as the technical problems and the wide field of applications in the biotechnical, biomedical engineering, engineering, medicine, pharmacology, environmental science and basic science fields are presented in this book. To promote the dialog and mutual penetration between biophoton research and photon technology is one of the important goals for the International Conference on Biophotons & Biophotonics 2003, and is developed and presented in Biophotonics: Optical Science and Engineering in the 21st Century.

### Un journal consacré au sujet

- *Journal of Biophotonics*. Editor: Jürgen Popp, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

### Articles sur Internet

- Les biophotons sur Wikipédia: *Alexander Gurwitsch*; *biophotons*; bibliographie en anglais de *F.A. Popp*
- *Reproduire l'«impossible» rayonnement mitogénétique*, Jonathan Tennenbaum, Magazine Fusion N°86 - mai/juin 2001. Les travaux de Burlakov
- *L'ADN communique dans l'univers - l'ADN fantôme*. Grazyna Fosar et Franz Bludorf, article en allemand paru dans Raum und Zeit, 13/8/2005, Berlin, traduction française Isabella Heim. Les travaux de Gariaev

## Sites en anglais

- [About the Coherence of Biophotons](#). Fritz-Albert Popp. "Macroscopic Quantum Coherence", Proceedings of an International Conference on the Boston University, edited by Boston University and MIT, World Scientific **1999**. Biophoton emission is a general phenomenon of living systems. It concerns low luminescence from a few up to some hundred photons-per-second per square-centimeter surface area. At least within the spectral region from 200 to 800nm. The experimental results indicate that biophotons originate from a coherent (or/and squeezed) photon field within the living organism, its function being intra- and inter-cellular regulation and communication.
- [Natural light from organisms, what, if anything, can it tell us?](#) by Beverly Rubik. Noetic Sciences Review, été 1993, N°26, p.10
- [Brief introduction into WaveGenetics, Its scope and opportunities](#), Peter Gariaev
- [Quantum Bioholography](#), From Helix to hologram, Iona Miller et Richard Alan Miller, 2003
- [Biophysical Mechanisms of Genetic Regulation: Is There a Link to Mind-Body Healing?](#) Lian Sidorov et Kevin Chen. Travaux de Popp, Gariaev et d'autres
- [A Quantum Biomechanical Basis for Near-Death Life Reviews](#), Thomas E. Beck, Janet E. Colli, Journal of near-death studies, 2003, p.169. Une partie sur la biomécanique quantique et sur la communication non-locale (téléportation)

## Sélection de références dans des journaux scientifiques

- *Die Natur des spezifischen Erregens der Zellteilung*. Gurwitsch A. G. Archiv für Entwicklungs Mechanik der Organismen, **1923**, 100, 11-40
- [Further measurements on the bioluminescence of the seedlings](#). L. Colli, U. Facchini, G. Guidotti, R. Dugnani-Lonati, M. Orsenigo and O. Sommariva. Cellular and Molecular Life Sciences, **1955**, 11, 479-481
- [Intermediate and Far Infrared Sensing of Nocturnal Insects. Part I. Evidences for a Far Infrared \(FIR\) Electromagnetic Theory of Communication and Sensing in Moths and Its Relationship to the Limiting Biosphere of the Corn Earworm](#). Callahan Philip S. Annals of the Entomological Society of America, **1965**, 58, 5 (19), 727-745
- *Electromagnetic communication in insects, elements of the terrestrial infrared environment, including generation, transmission, and detection by moths*. Callahan P.S. ARS, **1966**, 33-110, 156-176.
- [Excited Electronic States of DNA](#). J. Eisinger, R.G. Shulman. Science, **1968**, 27 , 161, 3848, 1311-1319
- *Weak luminescence from the yeast Saccharomyces cerevisiae and the existence of mitogenetic radiation*. T.I. Quickenden and S.S. Que Hee. Biochemical and Biophysical Research Communications, **1974**, 60 (2) 764-9
- *Distant intercellular interactions in a system of two tissue cultures*. V. P. Kaznacheev, S. P. Shurin et al. Psychoenergetic Syst. 1, **1976**, 141-142
- *Non-chemical distant interactions between cells in culture*. A. F. Kirkin. Biofizika **1981**, 26, 839-843
- *Evidence of photon emission from DNA living systemes*. Rattenmeyer M., Popp F.A., Nagl W. Naturwissenschaften, **1981**, 68, 11
- [A historical review of the problem of mitogenetic radiation](#). Sous la direction de A. A. Gurwitsch. Cellular and Molecular Life Sciences, **1988**, 44, 7, 545-550. The miracle of caryokinesis was the starting point that stimulated Alexander G. Gurwitsch to carry out his famous mitogenetic experiments in 1923. The results obtained confirmed his hypothesis of a weak radiation from cells, which is able to trigger the growth of other cells. Extensive experimental work within the first two decades after this discovery indicated that the problem of mitogenetic radiations is generally related to the biological significance of UV-radiation. Both energetic and informational aspects have to be considered, namely radiation effective in activating molecules, and that involved in arranging them into larger units.
- [Regulatory aspects of low intensity photon emission](#). R. Van Wijk and D. H. J. Schamhart. Cellular and Molecular Life Sciences, Experientia, **1988**, 44, 7, 586-593. Photon emission from unicellular and multicellular organisms has been a subject of study for many decennia. In contrast to the well-known phenomenon of bioluminescence originating in luciferin-luciferase reactions, low intensity emission in the visible region of the electromagnetic spectrum has been found in almost every species studied so far. At present, the nomenclature of this phenomenon has not crystallized and it is referred to by a variety of names, such as mitogenetic radiation, dark luminescence, low-level chemiluminescence, and biophotons. Particular attention has been focussed on the relationship between photon emission and the regulation of various aspects of cellular metabolism, although in



many cases quantitative data are still lacking. Throughout the history of this field of research the question of a functional biological role of the low intensity emission has been repeatedly raised; this is reflected, for instance, in the heterogeneity of the terms used to describe it. The discussion concerns the possible participation of photons of low intensity in intra- and intercellular communication. This paper reviews literature on the metabolic regulation of low intensity emission, as well as the regulation of photon emission initiated by external light. Furthermore, recent data are discussed with respect to a possible biocommunicative function of low intensity photon emission.

- *Biophoton emission, stress and disease*. VanWijk, R., Tilbury, R. N., Slawinski, J., Kochel, B., Gu, Q., & Lilius, E. M. *Experientia*, 1992, 48, 1029-1102
- *Non substantial biocommunication in terms of Dicke's theory*. Popp FA, Chang JJ, Gu Q, Ho MW. In Ho, Mae-Wan, Popp FA, Warnke U, eds, *Bioelectrodynamics and biocommunication*, World scientific Publishing, Singapore, **1994**, 293
- *In vivo imaging of spontaneous ultraweak photon emission from a rat's brain*. Masaki Kobayashi and others, *Neuroscience Research*, **1999**, 34, 103
- *Photon statistics and correlation analysis of ultraweak light originating from living organisms*. Masaki Kobayashi and Humio Inaba. *Applied Optics*, **2000**, 39, 183
- *Bio-photons and Bio-communication*. R. van Wijk. *Journal of Scientific Exploration*, **2001**, 15, 2, 183-197. The topic of bio-informational aspects of photon emission has a history of more than eighty years. This article reviews the research activities during the three main phases of this line of this research.
- *Distant wave-mediated interactions in early embryonic development of the loach *Misgurnus fossilis* L.*, A. B. Burlakov, O. V. Burlakova et V. A. Golichenkov. *Russian journal of developmental biology* 2000, 31, 5. Groups of loach (*Misgurnus fossilis* L.) embryos of different ages were kept in different quartz cuvettes for 20-24 h so that only optic contact between the groups was, possible. Subsequent observations showed that parameters of their development deviated from those in the control groups. Wave-mediated biocorrection proved to have both positive and negative effects, depending on the developmental stages of the interacting groups. Changes in spectral characteristics and polarization of biological radiation affected the results of the experiments. Various developmental abnormalities, caused by distant wave-mediated interactions of embryos and specific to each combination of developmental stages and conditions of optic communication are described.
- *Wave Genetics, Wave Biology Beyond Molecular Genetics*, un recueil des travaux de Gariaev par Iona Miller
- Le concept d'*hologrammes dans les organismes vivants* ont également été développés par I.V. Prangishvili. Voir la *liste de ses publications*.
- *A model for biophotons*. Matti Pitkänen. *Journal of Non-Locality and Remote Mental Interactions*, **2002**, I, 2
- *Modulation of DNA Conformation by Heart-Focused Intention*. R. McCraty, M. Atkinson, D. Tomasino, Institut Heartmath, Boulder Creek, Californie, États-Unis, **2003**
- *Cellular Communication through Light*. Daniel Fels. *PLoS ONE* **2009**, 4 4, e5086. This study finds that cells can have an influence on other cells even when separated with a glass barrier, thereby disabling molecule diffusion through the cell-containing medium. As there is still very little known about the potential of photons for intercellular communication this study is designed to test for non-molecule-based triggering of two fundamental properties of life: cell division and energy uptake.
- *Biophotons*, une sélection actuelle sur [Google Scholar](#)

## Chapitre 6 - Musique de l'ADN et protéodies

### Ouvrages sur papier

- *Les langages secrets de la nature*, Jean-Marie Pelt, éd. Fayard. Les plantes ont bien une sensibilité qui leur est propre. D'où naturellement des possibilités de communication avec l'homme, maintes fois soulignées, mais jamais, jusqu'à ces toutes dernières années, scientifiquement prouvées. La fameuse " main verte " trouve désormais des justifications scientifiques ; comme d'ailleurs la sensibilité des plantes à la musique. Langages de la nature, sensibilité des plantes, communications secrètes mais efficaces, fondées sur des faits scientifiques récents et dûment établis, nous dévoilent dans cet ouvrage une vision du monde vivant radicalement neuve, où tous les êtres communiquent et communient dans un rapprochement inattendu entre la plante, l'animal et l'homme.

- *Protéodie, la symphonie du vivant*, Vincent Crousier, Nexus n°48 p.51

## Documents sur internet

- Une présentation de Joël Sternheimer dans le site [Quanthomme](#); une autre dans [Academia](#); et une autre dans [Researchgate](#)
- Un article du professeur Marc Henry, [Protéodies](#)
- [Procédé de régulation épigénétique de la biosynthèse des protéines par résonance d'échelle](#), Brevet européen: EP 0 648 275 B1,; date de dépôt: 02.06.1993; date de publication et mention de la délivrance du brevet: 29.08.2007
- [Good vibrations give plants excitations](#), Andy Coghlan, New scientist 28 mai 1994
- [Anatomie de la musique; invitation aux mélodies de protéines](#). Section en langue française du site japonais [Bekkoame](#). Propose une liste d'articles fondamentaux.
- Dont un article très développé d'Éric Bony sur [La musique et les plantes](#), paru dans Nouvelles Clés n°14, été 1997.
- La **section anglaise** propose d'[autres articles](#), avec des exemples de protéodies qui sont proches de mélodies populaires.
- Le site de Joël Sternheimer, [genodics.net](#). Quelques liens concernant la génodique, les protéodies et leurs applications. En particulier une liste de [références](#) sur les ondes d'échelles.
- On y retrouve l'article [La musique et les plantes](#), et un autre [Dialoguer avec le vivant](#), paru dans la revue Alliance n°3, 2005
- Dans le site Fangpo consacré à la musique, deux articles: [Partie 1: Médecine ondulatoire: la protéodie, ou le rôle de la musique dans les processus de vie](#). [Partie 2: De la musique quantique comme engrais](#), Nick Begish, reproduit de la Revue Nexus n°40 p.45, 2005, traduit du site **anglais** Earthpulse, [French Physicist Creates New Melodies - Plant Songs](#)
- [Joël Sternheimer « Les mélodies formées par certaines protéines ressemblent à du Mozart ! »](#), Plantes et Santé, 2018
- [Les protéodies, la musique du vivant](#), Anthony Roux, 2019

## Références sur l'agriculture:

- [Genodics.com](#), développement d'applications agro-alimentaires et environnementales. La génodique est une discipline nouvelle, située à l'intersection de la physique fondamentale, de la musique et de la biologie, qui étudie des aspects ondulatoires de l'expression du génome. Une page pour expliquer simplement les [principes de la génodique](#). Une autre sur [La découverte de la génodique par Joël Sternheimer](#)
- [Régulation épigénétique de la biosynthèse des protéines appliquée à la culture de fruits et légumes : compte-rendu d'expérience en jardin potager](#), M. Ulmer, B. Gil, P. Ferrandiz et J. Sternheimer, 1993
- [Stimulation épigénétique de la résistance à la sécheresse pour des cultures de tomates: une expérience en plein air au Sénégal](#)", M. et O. Gueye, F. Diagne, J-J. Houziel, P. Ferrandiz et J. Sternheimer, rapport UER, 1996. Cf. Science Frontières n° 14, p. 3, décembre 1996
- [Conservation de fruits et légumes par régulation épigénétique : inhibition de l'expression de la polygalacturonase d'avocat](#), F. Sneyaert, P. Ferrandiz, M. Renoma et J. Sternheimer, 1997

## Autres sites en anglais

- Le site de la biologiste [M. A. Clark](#), avec une belle [introduction](#) à la musique des protéines, et un remarquable [panorama](#) des travaux sur ce sujet.
- La musique des gènes, le site de [Nobuo Munakata](#)
- Our Sound Universe, the [Music of Susan Alexander](#)
- Molecular Music, [Linda Long](#)

## Vidéos

- [La génodique: le soin des plantes et des animaux en musique](#), film de 18 min, France 3 Centre-Val de Loire, 2014
- [La musique et les plantes](#), film de 18 mn réalisé par Antoine Lassauge et Charles Marton, élèves du

lycée Gustave Courbet de Belfort, avec l'aide de leurs professeurs.

• *Agriculture et protéodologie*, partie 2/2, Marc Henry. Ver de Terre production, 2019. Film de 5h. L'exposé sur les protéodologies commence à 3h15min

## Chapitre 7 -Géométries de l'ADN

### Documents sur internet

- Wikipédia *ADN B*; *ADN A*; *ADN Z*, *ADN G-quadruplex*; *ADN triplex* et *Triple-stranded DNA*
- *Atlas of Genetics and Cytogenetics*, *ADN: structure moléculaire*.
- *Découverte de l'ADN à quatre hélices dans le génome humain*, gurumed, 22 janvier 2013. *Des chercheurs découvrent une nouvelle forme de notre ADN*, gurumed, 24 avril 2018. *Les i-motifs: cette nouvelle forme d'ADN enfin observée dans des cellules vivantes*, Sciences et Avenir, 26 avril 2018.
- *DNA Structure: Alphabet Soup for the Cellular Soul*, Pui Shing Ho Megan Carter, in book: DNA Replication-Current Advances, aout 2011.
- *QGRS-Conserve: A computational method for discovering evolutionarily conserved G-quadruplex motifs*, Scott Frees, Camille Menendez, Matt Crum, Paramjeet S Bagga, Human Genomics, 2014, 8, 1, 8. *Found: a new form of DNA in our cells*, Garvan Institute, 24 avril 2018
- *DNA Structure and the Golden Ratio Revisited*, Stuart Henry Larsen, Symmetry, 2021, 13, 1949; *The geometry of DNA: a structural revision*, Mark E. Curtis, 1997
- *How many base-pairs per turn does DNA have in solution and in chromatin? Some theoretical calculations*, Levitt M., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1978, 75, 640; *Une autre clé de l'ADN pour lutter contre l'arthrite*, Jean-Claude Lambry-Inserm, 2013; *Helical forms*/images, Loren Williams.
- *Recombinant Triplex formed by PNA-TFO: A Molecular Dynamics Simulation Study*, Vijaya Shri Mall, Rajendra Prasad Ojha, Rakesh Kumar Tiwari, 2018, Oriental Journal of Chemistry 34, 5, 2440; *Unraveling the structure and biological functions of RNA triple helices*, Jessica A. Brown, 2020, Wires RNA, 11, 6, e1598; *The emerging role of triple helices in RNA biology*, Nicholas K. Conrad, Wires RNA, 2013, 5, 1, 15; *RNA-DNA Triplex Formation by Long Noncoding RNAs*, Yue Li, Junetha Syed, Hiroshi Sugiyama, Cell Chemical Biology, 2016, 23, 11, 1325; *DNA triple helices: biological consequences and therapeutic potential*, Aklank Jain, Guliang Wang, Karen M Vasquez, Biochimie, 2008, 90, 8, 1117.