

L'ÉVOLUTION DE LA VIE

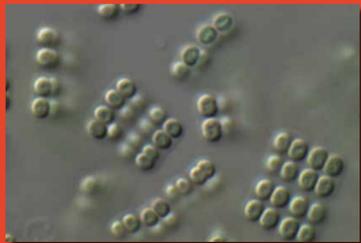
L'arbre du vivant est composé de 3 grands groupes, les eucaryotes, les bactéries et les archées.



© : Suptak



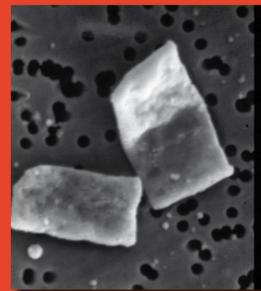
© : Anissa TF



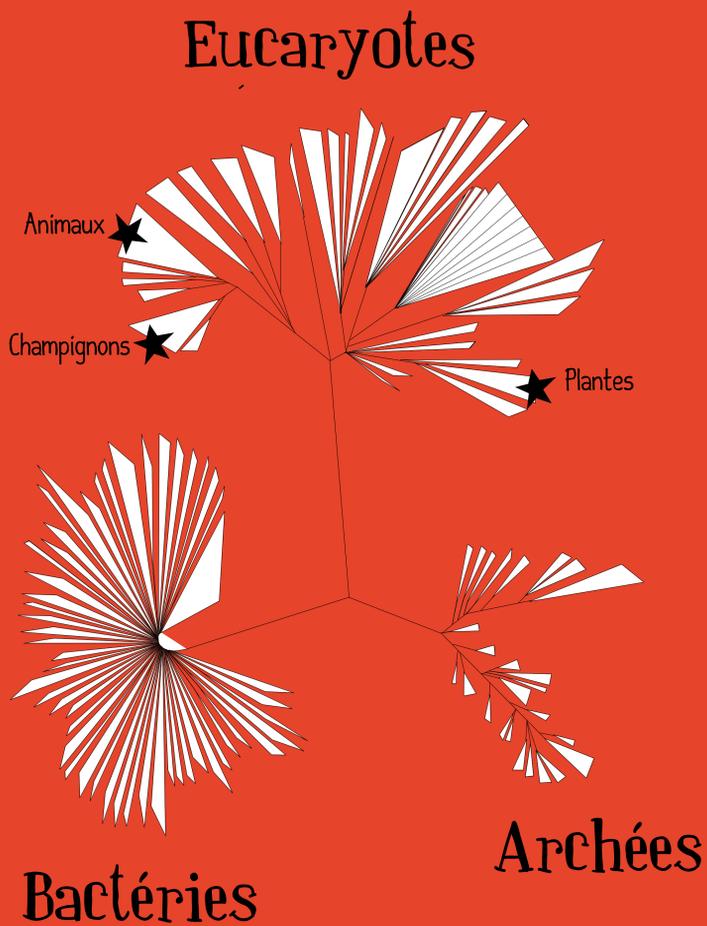
© : P. Lopez-Garcia



© : J. Khatavon



© : Francisco Rodriguez-Velaz



Chaque triangle correspond à des milliers d'espèces, et comme le montre ce schéma, la plus grande partie de la diversité est en réalité composée d'êtres unicellulaires souvent non cultivables et, donc, difficiles à étudier.



© : Dominique Joly

Stromatolites, Australie

ECHELLE DU TEMPS
EN MILLIARDS
D'ANNÉES

0,000 Ma - L'arbre du vivant aujourd'hui

0,0002 Ma - Apparition de *Homo sapiens*

0,42 Ma - Apparition des plantes terrestres

0,55 Ma - Explosion Cambrienne,
naissance d'une grande diversité d'espèces

0,7 - 1,2 Ma - Apparition des premiers eucaryotes pluricellulaires

1,5 - 1,8 Ma - Apparition des eucaryotes unicellulaires

2,1 - 2,4 Ma - Enrichissement de l'atmosphère en oxygène

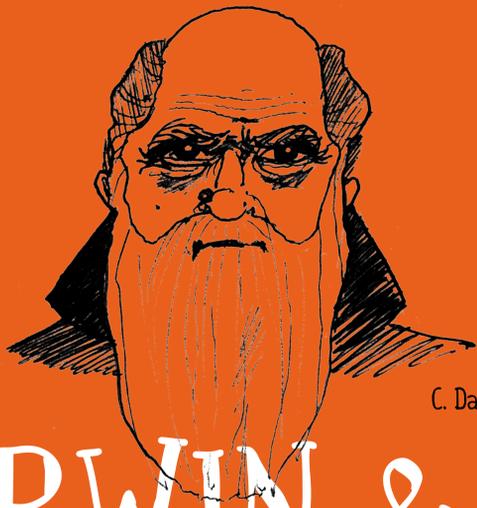
2,7 Ma - Stromatolites fossiles

3 - 4,4 Ma - FOURCHETTE PROBABLE D'EMERGENCE DE LA VIE SUR TERRE

4,4 - 4,5 Ma - Début de la différenciation terrestre,
formation de l'océan et des premiers continents

4,6 Ma - Naissance du Système Solaire et accréation de la Terre





C. Darwin 1809-1882

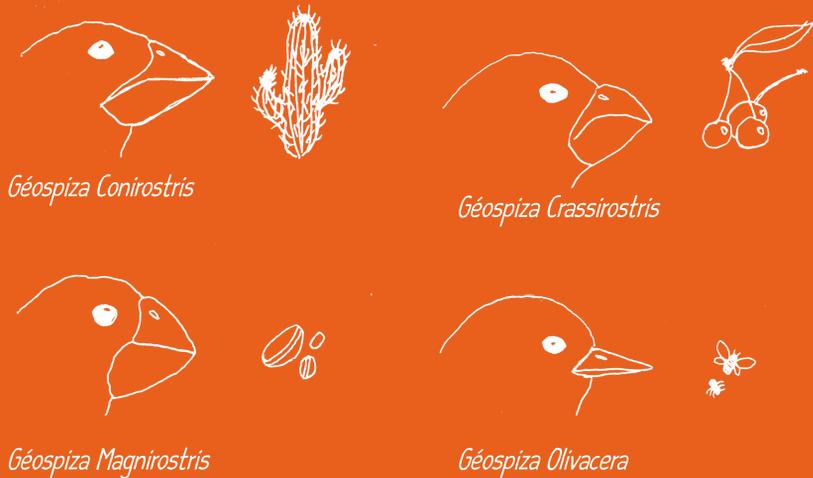
DARWIN & LA SÉLECTION NATURELLE

AVANT DARWIN

Dès 1800, l'étude des fossiles montre que la biodiversité passée est différente de l'actuelle. Mais d'étonnantes ressemblances existent entre espèces vivantes.



L'anatomie comparée de pattes d'oiseaux : une grande similitude d'organisation.

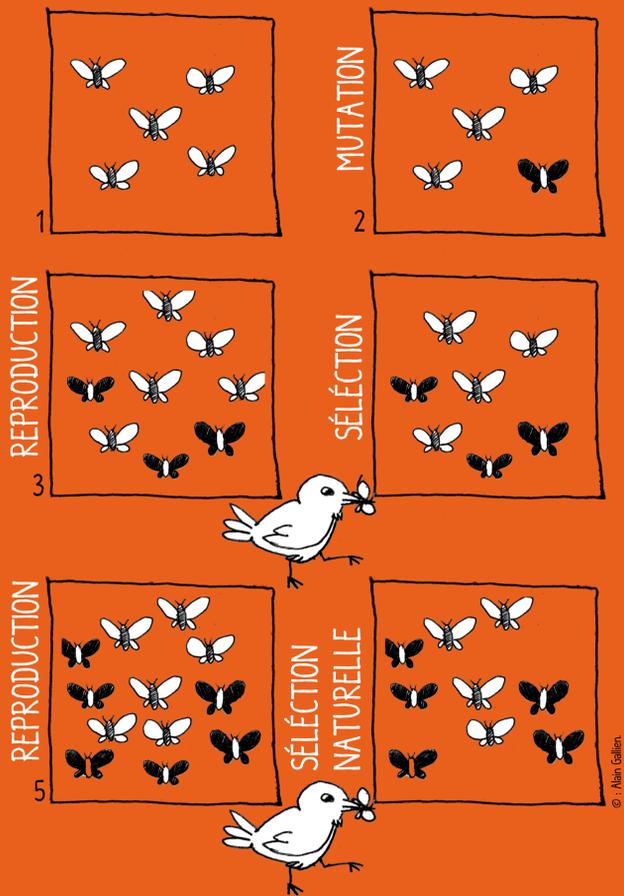


Les pinsons de Darwin : les oiseaux se ressemblent mais la forme du bec dépend du type de nourriture.

L'étude de l'extraordinaire diversité de la vie sur Terre inspire à Charles Darwin la théorie qui va changer la vision du monde vivant :

" De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ".

Dès 1859, il défend l'idée que les espèces ne sont pas fixées. Elles sont le résultat de changements provoqués par la sélection naturelle au fil des générations : les organismes les mieux adaptés à leur environnement survivent et se reproduisent mieux que les autres.



Exemple de sélection naturelle : LA MÉSANGE ET LES PAPILLONS
Une mutation se produit dans la population des papillons. La mésange mange les papillons clairs de préférence aux mutants plus sombres qui finissent par se retrouver plus nombreux.

APRÈS DARWIN

Grégor Mendel en 1865 aidera à comprendre la transmission des caractères d'une génération à l'autre. Mais c'est la découverte des gènes qui, cent ans plus tard, fournira les bases physiques de l'hérédité et permettra d'expliquer comment la sélection naturelle opère : l'information génétique portée par les gènes change d'une génération à l'autre et crée les variations observées.

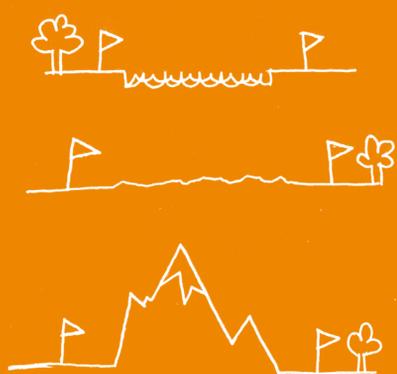
Une des questions fondamentales de la biologie de l'évolution reste de savoir comment se forment des espèces différentes.

DIVERSIFICATION ET MULTIPLICITÉ DES ESPÈCES



Seuls les individus d'une même espèce mélangent leurs gènes quand ils font des enfants; ceux d'espèces différentes ne peuvent faire ni l'un ni l'autre.

Comprendre comment naissent les espèces revient donc à comprendre comment les gènes arrêtent de se mélanger entre deux populations.



Une barrière géographique, comme une chaîne de montagne, un océan ou un habitat défavorable peut stopper tout mélange de gènes.

← Exemples de barrières géographiques.



Différentes espèces de drosophiles.

Charles Darwin avait par exemple observé que chaque île des Galapagos abritait une espèce de pinsons avec un bec différent des autres. Madagascar et les îles de l'Océan Indien contiennent aussi des espèces de mouches qui leurs sont spécifiques, bien que très ressemblantes entre elles.

Mais la question est de savoir si des espèces différentes peuvent se former en absence de barrière géographique : la sélection naturelle peut-elle faire évoluer une préférence pour que seuls les individus les plus proches se croisent entre eux ?

Les champignons des plantes pourraient former des espèces sans barrière géographique car ils ne peuvent mélanger leurs gènes qu'avec les champignons qui ont infecté la même espèce de plante.



Maladie du charbon des anthères sur différentes espèces de plantes: le champignon stérilise les plantes en produisant ses spores dans les anthères à la place du pollen. La maladie est causée par une espèce de champignon spécifique pour chaque espèce de plante.

A certaines échelles, des variations du milieu sont des barrières tout aussi redoutables qu'une montagne ou un océan...

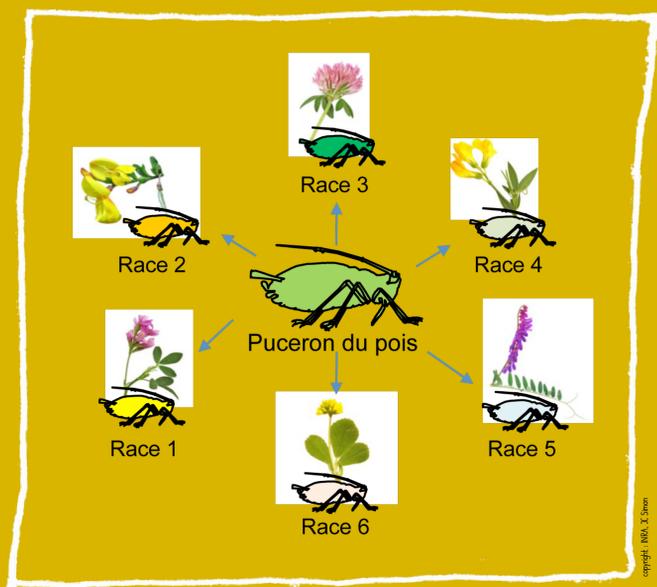


Vue aérienne de la forêt en aval de Makokou au Gabon.

L'ISOLEMENT REPRODUCTEUR, UNE FABRIQUE D'ESPÈCES

Plusieurs habitats existent à l'intérieur d'un même milieu.

Même dans les forêts les plus épaisses, des zones de clairière existent au milieu de zones plus denses. Certains individus iront préférentiellement vers les unes ou les autres, créant des populations qui ne se rencontreront jamais et donneront naissance à de nouvelles espèces. Le puceron du pois par exemple s'est développé sur des plantes variées comme le trèfle ou la luzerne créant ainsi des espèces qui ne se mélangent plus.



Des floraisons décalées peuvent isoler les espèces.

Dans une autre dimension, le temps peut aussi être source de séparation. Des arbres étroitement apparentés, comme le chêne et le saule, fleurissent à des périodes différentes de l'année, ce qui empêche tout mélange de gènes dans la nature. L'abeille noire des Landes, reconnaissable par sa grande bande jaune et ses longs poils, s'est ainsi développée sur la callune dont la floraison est très tardive.



Abeilles noires et reines.

Cette question de l'isolement reproducteur entre espèces est essentielle pour comprendre l'origine de la biodiversité. Elle est abordée aux différentes échelles biologiques, des communautés d'organismes à l'individu et même jusqu'à la cellule.



LA COÉVOLUTION, UNE COURSE AUX ARMEMENTS DANS LA NATURE



Comment les oeufs de coucou peuvent-ils être aussi ressemblants à ceux des oiseaux dont ils parasitent les nids ?



Oeuf de coucou au milieu des oeufs d'un passereau.

Comment les microbes peuvent-ils continuer à rendre malade malgré la sélection naturelle depuis des générations en faveur des individus résistants aux maladies ?

La réponse est une coévolution perpétuelle entre certains êtres vivants.



Champignon *Venturia*, pourriture du pommier.

Par exemple, le champignon *Botrytis* se développe en faisant « pourrir » la plante. Dans le milieu naturel, les plantes résistantes au champignon sont donc sélectionnées. Seules les plantes résistantes arriveront à faire des graines, et donc seules des graines résistantes peuvent pousser. Le champignon va être à son tour sélectionné pour trouver de nouveaux mécanismes lui permettant de contourner la nouvelle résistance : seuls les champignons capables de pousser sur les nouvelles graines résistantes pourront à leur tour laisser des descendants.



Champignon *Botrytis*, pourriture grise de la vigne.



Les parasites évoluent donc sans cesse en s'adaptant à leur hôte, et l'hôte en retour évolue pour échapper à son parasite. Il s'ensuit une course aux armements que l'on appelle coévolution.

ÉVO/DÉVO OU LA BIOLOGIE ÉVOLUTIVE DU DÉVELOPPEMENT

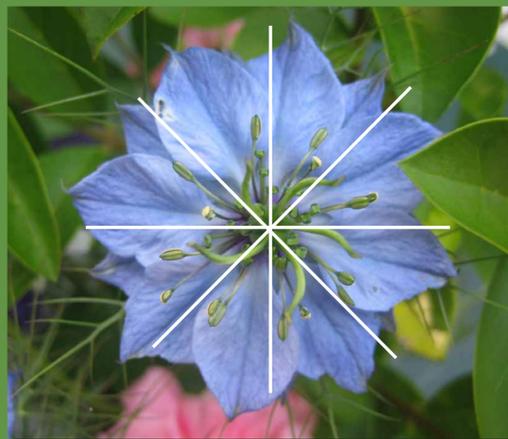


Cette discipline récente cherche à comprendre comment animaux et plantes ont acquis leurs formes au cours de l'évolution.

L'évo-dévo compare le développement d'un organe donné entre différentes espèces plus ou moins éloignées. En identifiant les gènes en cause, on comprend comment le rôle de ces gènes s'est modifié dans les différents organismes avec pour résultat les formes variées que l'on observe aujourd'hui. Depuis quelques décennies, on a identifié des gènes qui contrôlent le développement des organes, leur taille et leur forme, ainsi que la manière dont ils sont organisés les uns par rapport aux autres.

Symétrie de la fleur

Les premières fleurs apparues sur Terre avaient probablement une symétrie radiale. Mais certaines espèces produisent des fleurs à symétrie bilatérale. Des gènes responsables du développement de cette symétrie ont été découverts chez la gueule de loup. Il s'agit de chercher si des gènes similaires contrôlent la symétrie des fleurs chez d'autres espèces très différentes de la gueule de loup comme les orchidées ou la balsamine.



Symétrie radiale chez la Nigelle.



Symétrie bilatérale chez l'Orchidée.

Les yeux



Hibou

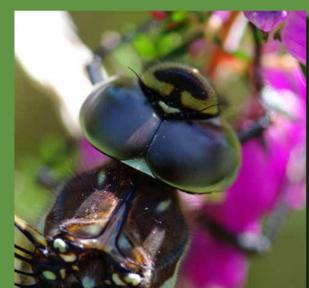


Les yeux

Des gènes qui contrôlent le développement des yeux ont été découverts chez la mouche, puis les mêmes gènes ont été retrouvés chez la souris. Certains gènes de souris peuvent faire « pousser » des yeux chez la mouche. Il s'agit là de comprendre comment des gènes assez semblables peuvent agir pour produire des yeux si différents.



Araignée (haut).
Libellule (bas).



LA GÉNÉTIQUE ÉVOLUTIVE

Certaines protéines ont été conservées au cours de l'évolution et sont retrouvées chez des organismes très éloignés. Cette approche ouvre des pistes prometteuses pour mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement des organismes supérieurs et notamment de l'homme.

Etudier ces protéines chez les organismes modèles permet de pouvoir construire plus facilement des mutants qui serviront à caractériser les effets de ces protéines.

La protéine Brca2

Chez l'homme,

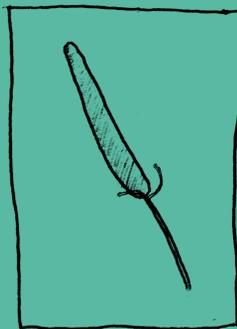
Les mutations de cette protéine sont liées au cancer du sein. Il est impossible de créer une mutation de ce gène chez la souris, organisme modèle privilégié, car les souris en meurent.



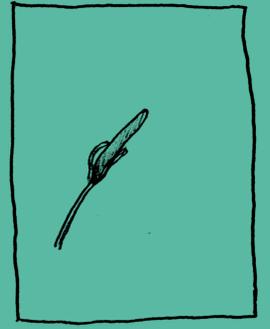
Chez l'arabette,

Arabidopsis thaliana, une plante modèle, le mutant Brca2 d'arabidopsis est viable. Les chercheurs peuvent ainsi l'étudier.

Plante normale fertile

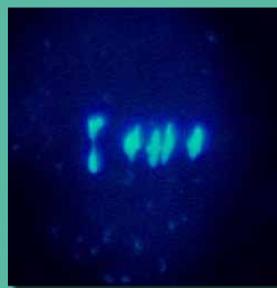


Plante mutante stérile



Chez les plantes

brca2 mutantes, la stérilité des plantes est accompagnée d'une anomalie des chromosomes.



Chromosomes normaux en division.

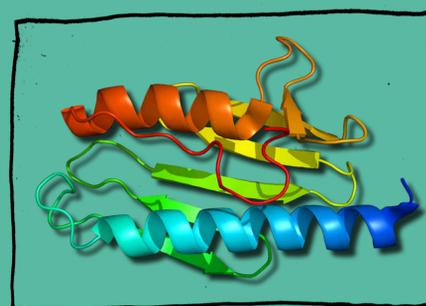


Chromosomes anormaux en division.

De nouvelles idées surgissent pour l'étude de Brca2 chez l'humain : est-ce que les mutations de Brca2 peuvent y être aussi responsables de stérilités ?

La frataxine

Un déficit en frataxine est responsable chez l'homme d'une maladie neurodégénérative. Un homologue de cette protéine existe chez la levure de boulanger. Les études menées chez cet organisme ont permis de montrer que cette protéine est située dans un compartiment de la cellule, la mitochondrie, ce qui a orienté les recherches chez l'homme.

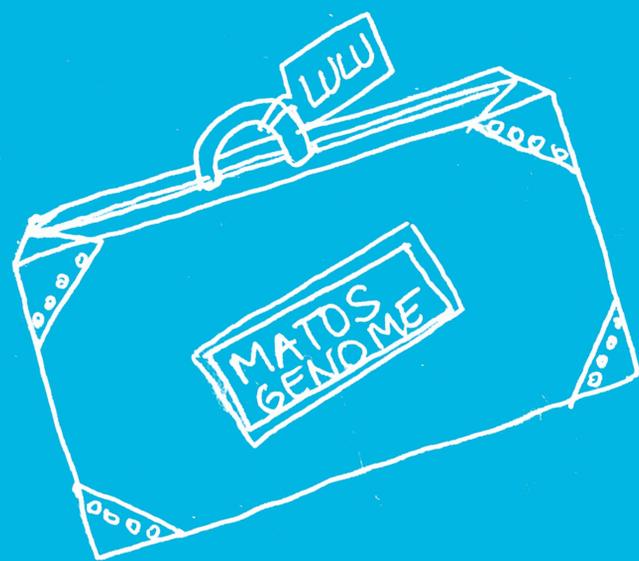


Repliement de la frataxine.



Levure de boulanger en division vue au microscope électronique.

ÉVOLUTION ET GÉNOMES



Le génome contient le matériel génétique d'un individu.

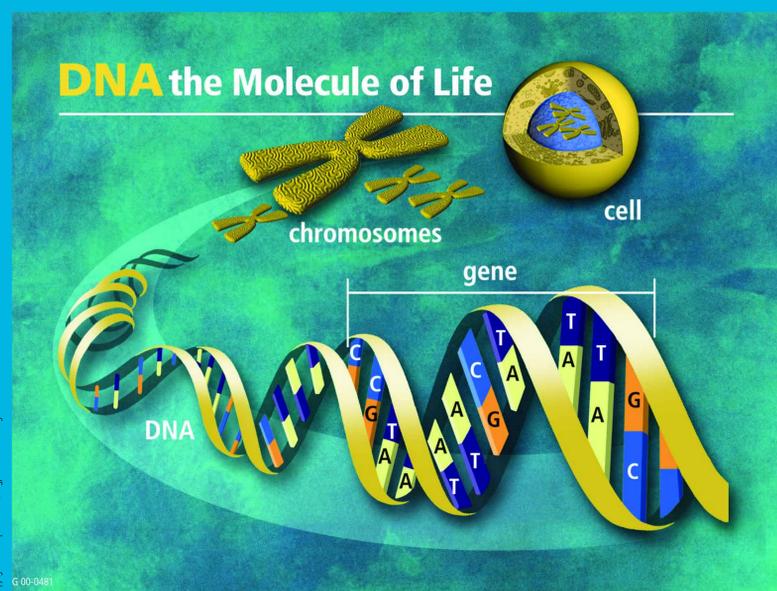
Aux mutations près, il semblerait donc qu'il doive être immuable. Pourtant les analyses des populations et des espèces montrent qu'il est capable d'évoluer rapidement.

Qu'est-ce que le génome ?

Le génome se présente sous la forme d'un ou plusieurs chromosomes, chacun d'eux étant une molécule d'ADN (composée des bases A, T, C et G). Le génome ne contient pas que les gènes d'un organisme qui n'en constituent qu'une faible portion. Chez l'homme par exemple, le génome ne contient que 3% de gènes. Il contient aussi des fragments d'ADN mobile, appelés éléments transposables. Toutes les espèces ont de telles séquences : le génome de l'homme en contient 45%.

Comment évolue le génome ?

De nombreux événements internes (mutation, duplication partielle ou totale d'ADN, déplacement de séquences mobiles, etc...) peuvent changer le contenu d'un génome et la façon dont est lue l'information qu'il contient. Mais un événement externe, tel qu'un stress peut aussi activer des éléments transposables et ainsi générer de la variabilité permettant une adaptation plus rapide des populations à des changements environnementaux.



Le génome dans la cellule.



Les couleurs des grains de maïs proviennent des localisations différentes d'un élément transposable.

**Etudier ces phénomènes,
c'est progresser dans
la compréhension
des capacités d'adaptation
des espèces.**



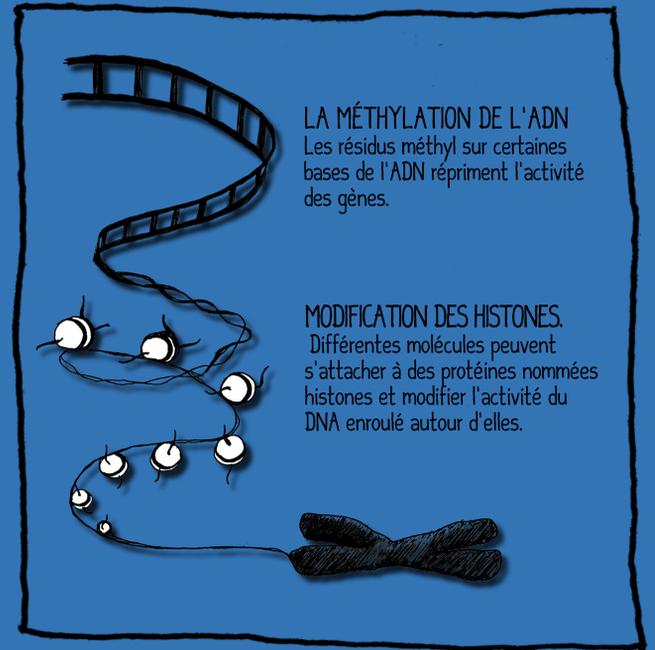
Éléments transposables chez la drosophile. Ils s'insèrent à différents endroits du gène de la couleur des yeux, provoquant les différences de couleur.

ÉVOLUTION ET ÉPIGÉNÉTIQUE

A l'origine, tout être est composé d'une seule cellule.

Certains resteront unicellulaires (bactéries, archées, eucaryotes unicellulaires), d'autres deviendront multicellulaires (eucaryotes multicellulaires tels que plantes, champignons, animaux) par divisions successives de la cellule initiale.

Comment se fait-il que le résultat ne soit pas un tas de cellules identiques mais un organisme avec tissus, organes et membres ?



Principaux mécanismes épigénétiques

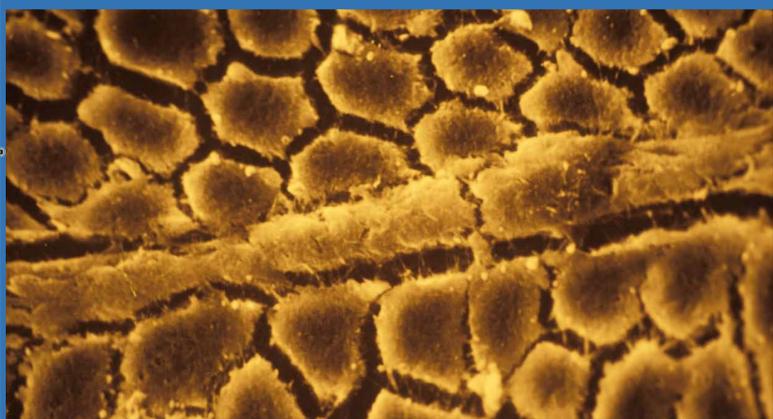
Toutes les cellules d'un individu contiennent le même génome, mais il est lu différemment selon leur rôle dans l'organisme (muscle, os, oeil...).

Les phénomènes épigénétiques sont en partie responsables de cette différence de lecture, visible chez des vrais jumeaux ou des individus clonés. Dans les deux cas, les individus sont génétiquement identiques. Pourtant, on peut déceler des différences morphologiques entre eux.

Nous savons aujourd'hui qu'un stress peut être à l'origine de modifications de la lecture de l'information contenue dans un génome, sans que le génome change.

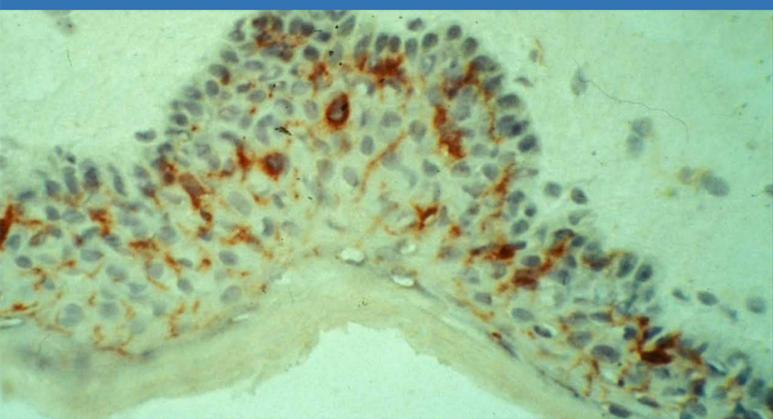
Plus intéressant encore, il a été montré que ces modifications peuvent être transmises à la descendance.

Ces études permettent de comprendre comment une population s'adapte à un changement d'environnement.



Cellules musculaires.

Copyright : INSEEM (A. Roché)



Cellules de la peau.

Copyright : INSEEM (D. Smetil)



Une vache, à gauche, et ses différents clones.

Copyright : INRA (Y. Heymann)

ANTHROPIISATION DES MILIEUX

L'homme exerce une influence considérable sur son environnement : c'est l'anthropisation des milieux.

Cependant, il n'est pas seul dans l'environnement : comment évoluent les autres espèces face aux changements qu'il provoque ?



Paysans allant au champ, Équateur

L'action de l'homme sur l'environnement s'est intensifiée tout d'abord au Néolithique (12000 à 6000 ans avant JC) puis à l'ère industrielle (XIX^{ème} siècle). Au Néolithique il a entrepris l'exploitation du milieu naturel par la sédentarisation (habitations stables), par l'agriculture (domestication des espèces végétales) et par l'élevage (domestication des espèces animales).

Cette exploitation est devenue intensive à l'ère industrielle par l'extension massive des milieux cultivés, d'élevage et de pêche. Des besoins nouveaux sont apparus, provoquant l'utilisation du sol et du sous-sol.

Ceci s'est traduit par une réduction de la biodiversité et un changement profond des écosystèmes naturels.

Pour se prémunir contre un impact irréversible de l'anthropisation sur les milieux naturels, les chercheurs inventorient la biodiversité animale et végétale des milieux naturels encore intacts et étudient les mécanismes d'adaptation des espèces aux milieux anthropisés.



L'homme a domestiqué la pomme de terre en Amérique du Sud. Cette culture constitue actuellement le cinquième produit agricole au niveau mondial après le blé, le riz, le maïs et la canne à sucre (vues : culture de pomme de terre en Equateur).



Exploitations du sol en Nouvelle Calédonie, et du sous sol en Bolivie.



Inventorier ! 

Notamment les papillons dont les larves sont des foreurs de graminées pour comprendre les mécanismes d'adaptation des insectes qui colonisent les plantes cultivées comme le maïs.

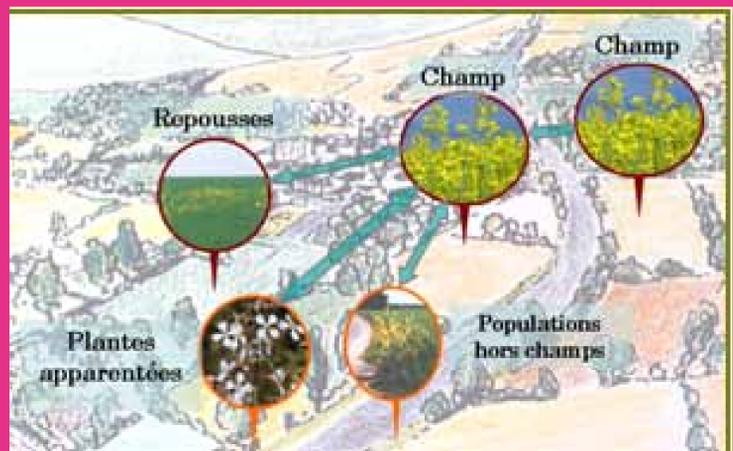
LA NATURE MODIFIÉE PAR L'HOMME



Il y a toujours eu des échanges de gènes entre plantes apparentées ; il peut donc y en avoir entre les plantes cultivées et leurs cousines sauvages.

Les plantes cultivées se différencient visuellement des plantes sauvages dont elles sont issues. De même, le patrimoine génétique des deux types de plantes est différent. De plus, la diversité génétique des plantes cultivées est relativement limitée.

Etudier les conséquences des échanges de gènes est important pour éviter les risques de dissémination des Organismes Génétiquement Modifiés (OGM).



Ces recherches ont des retombées pratiques : connaître le cheminement des gènes du colza dans l'environnement permet de modéliser le comportement des OGM avant leur mise sur le marché européen.

Plusieurs questions se posent :

- ★ Comment la diversité génétique se répartit-elle dans un milieu composé d'espaces cultivés et non cultivés ?
- ★ Comment le pollen et les graines se dispersent-ils dans ces paysages, et par quels moyens ?
- ★ Quel est l'impact du transfert des gènes introduits par génie génétique dans les plantes sur la biodiversité ?

Le colza est un bon modèle pour étudier ces questions. En 2009, 21% de la surface totale cultivée en colza dans le monde l'est avec des variétés OGM tolérantes à des herbicides. Or le colza est une plante cultivée que l'on rencontre fréquemment dans les espaces non cultivés (bords de route, friches). Des échanges génétiques peuvent donc se produire entre les plants de colza cultivés et ceux hors-champ ou même avec certaines plantes apparentées comme la ravenelle.



Colza hors champ.



Colza cultivé et ravenelle sauvage.

UNE ESPÈCE FACE AU CLIMAT

Le frêne, exemple type

Le changement du climat a plusieurs effets sur la diversité biologique. Des chercheurs étudient ces effets notamment chez deux frênes, *Fraxinus excelsior* (frêne commun) et *Fraxinus angustifolia* (frêne oxyphile), ainsi que chez leur hybride (croisement naturel des deux espèces).

On observe une modification de l'aire de répartition (le frêne s'adapte aux nouvelles conditions du climat en migrant). Ces changements d'environnement favorisent l'évolution de certaines caractéristiques, comme par exemple la taille des feuilles ou le nombre de folioles.

Une conséquence de ces changements d'aire de répartition est que les espèces se retrouvent en interaction avec de nouvelles espèces, non présentes dans leur région d'origine.



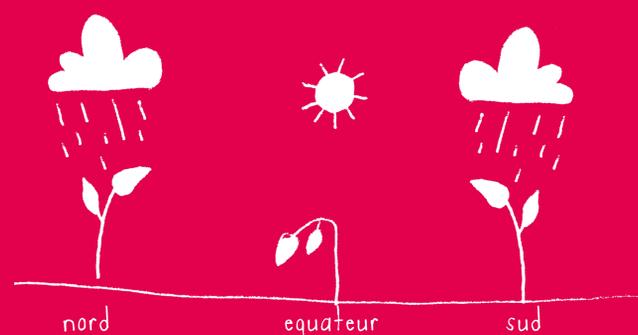
Frêne commun à gauche, oxyphille à droite et hybride au milieu.



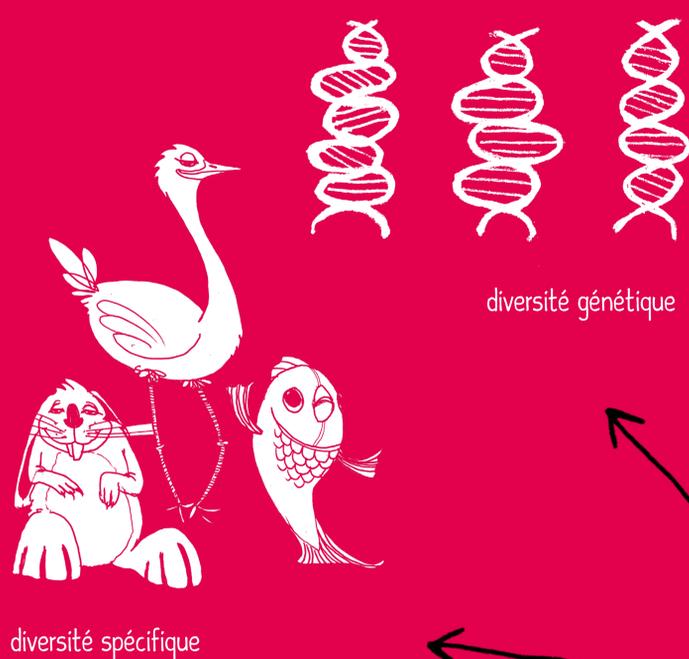
Frêne oxyphille dans un champ.



Augmentation des températures



Modification des précipitations. Elles diminueront autour de l'Equateur et augmenteront dans les régions situées au nord et au sud de cette zone.



Ces recherches permettront de construire des scénarios d'évolution de la diversité biologique. Elles contribueront à une meilleure compréhension de l'environnement dans lequel nous vivons au quotidien et aideront les décideurs à agir pour sa protection.

Qu'est-ce que la diversité biologique (ou biodiversité) ?

C'est la variabilité des organismes vivants de toute origine; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces, ainsi que celle des écosystèmes (définition de la convention des Nations Unies).



diversité des écosystèmes

DOUZE COUPS DE PROJECTEUR SUR L'ÉVOLUTION

L'évolution est au centre de la biologie. T. Dobzhansky (1900-1975), un généticien russe, a écrit que rien en biologie n'a de sens si ce n'est à la lumière de l'évolution. Contrairement à une idée répandue, c'est une discipline en plein essor.

Cette exposition, qui s'applique à présenter quelques aspects actuels de cette discipline a été réalisée par les chercheurs de l'Institut Diversité, Ecologie et Evolution du Vivant (CNRS, Université Paris-Sud 11, IRD, AgroParisTech, INRA).

⇒ ONT PARTICIPÉ : ⇐

Purificación López-García: ESE, CNRS-Université Paris-Sud 11

Sylvie Salamitou: LEGS, CNRS-Université Paris-Sud 11

Marie-Louise Cariou: LEGS, CNRS-Université Paris-Sud 11

Dominique Joly: LEGS, CNRS-Université Paris-Sud 11

Tatiana Giraud: ESE, CNRS-Université Paris-Sud 11

Frank Bourrat: N&D, CNRS

Catherine Damerval: GVM, INRA-CNRS-Université Paris-Sud 11-AgroParisTech

Marie-Pascale Doutriaux: IBP, CNRS-Université Paris-Sud 11

Pierre Capy: LEGS, CNRS-Université Paris-Sud 11

Paul-André Calatayud: DEEIT, IRD

Jane Lecomte: ESE, CNRS-Université Paris-Sud 11

François Rebaudo: DEEIT, IRD

Nathalie Frascaria: ESE, CNRS-Université Paris-Sud 11

Conception et réalisation : Dominique Joly et Sylvie Salamitou.

Conception graphique : Cécile Joly ©.