

Conférence Pierre-Dansereau

A-t-on besoin du hasard pour évoluer?



Terre ~ 4,5 Ga

Fossiles
cyanobactéries
~ 1 Ga
Australie

Cambrien
~0,545 Ga
Burgess
Canada

*Australopithecus
afarensis*
~ 0,0032 Ga



*Homo
Sapiens*
~0,0002 Ga

Prébiotique

Luca
~ 3,9 Ga



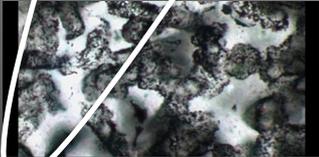
1ers métazoaires ?
~2,1 GA
Gabon



Ediacara
Métazoaires
~0,575 Ga
Australie
Reconstitution
Musée Adélaïde



Dinosaures
~0,220 – 0,066 GA
Mid. Trias – Fin Crétacé



Traces
Bactériennes
~ 3,8 Ga
Australie



Évolution



CLASSIFICATION PHYLOGÉNÉTIQUE DU VIVANT

D'après H. Le Guyader, G. Lecointre, P. Lopez-Garcia

- = photosynthétiques
- = méthanogénétiques
- = chimiosynthétiques
- = connus seulement par leur ARNr

Eucaryotes pluricellulaires : ★

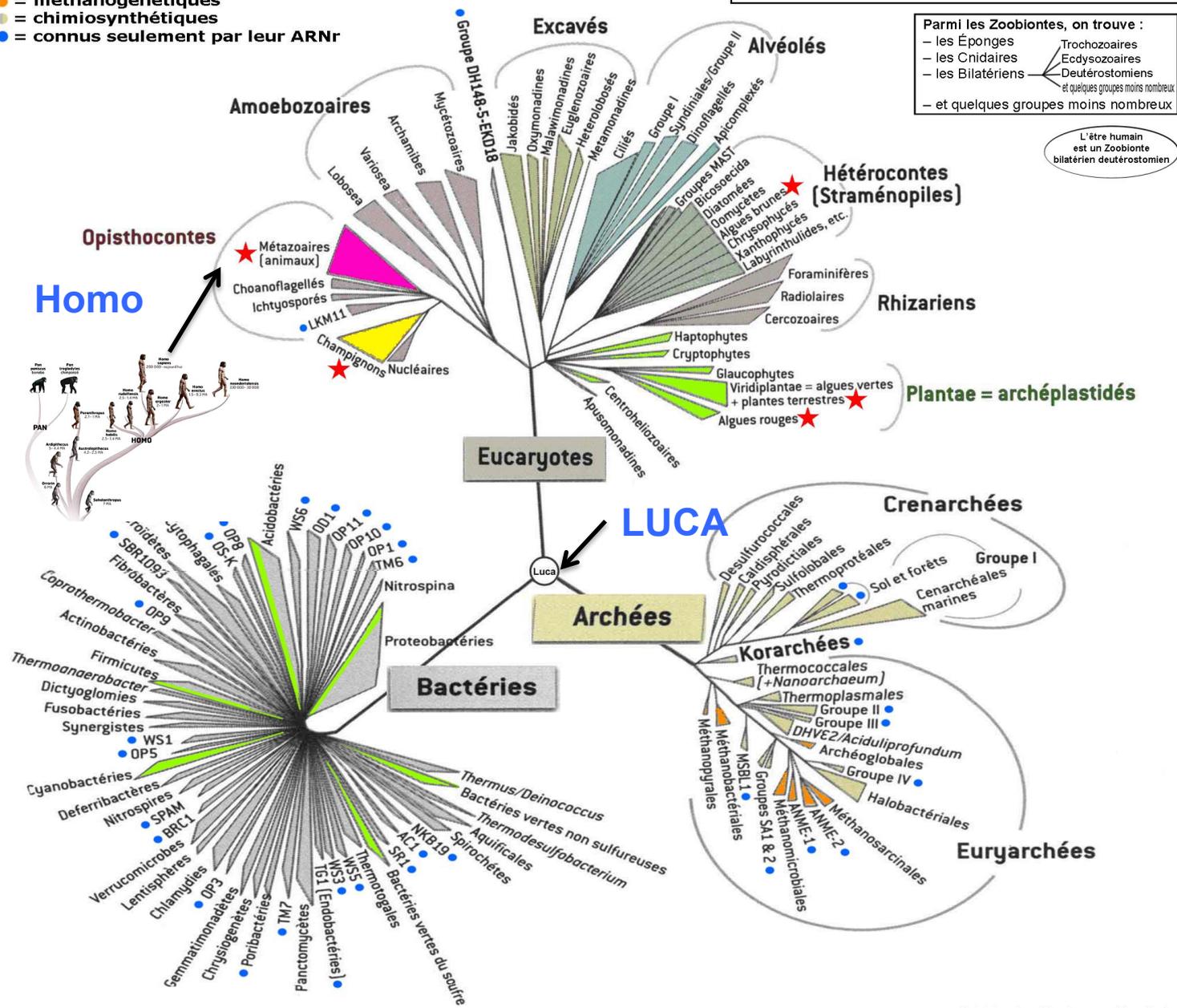
- = Zoobiontes (Animaux)
- = Mycètes (Champignons et Myxomycètes)
- = Chlorobiontes (Végétaux)

Parmi les Zoobiontes, on trouve :

- les Éponges
- les Cnidaires
- les Bilatériens

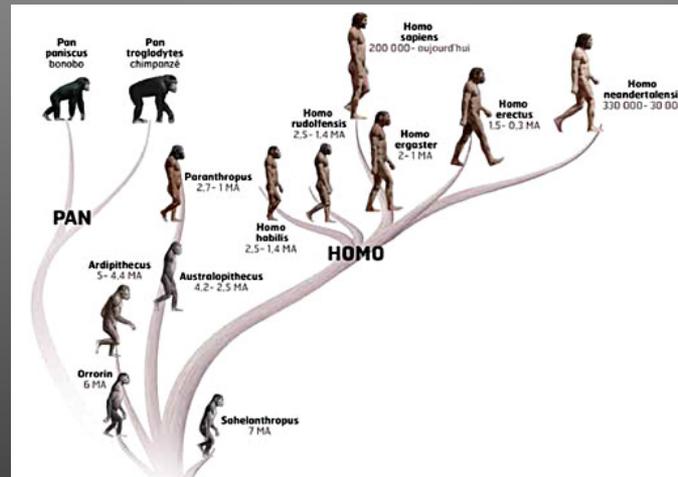
Trochozoaires
Ecdysozoaires
Deutérostomiens
et quelques groupes moins nombreux

L'être humain est un Zoobionte bilatérien deutérostomien



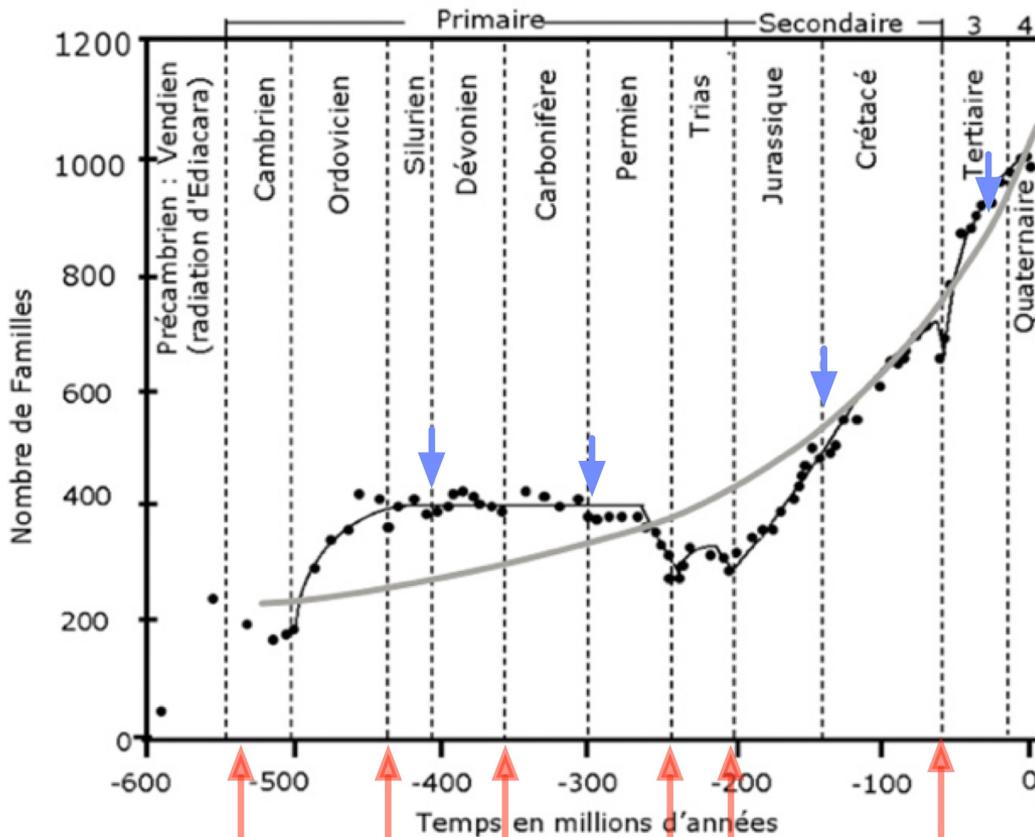
Du côté de l'homme : son évolution

- Premier grand débat (1860), altercation entre Thomas Huxley et Samuel Wilberforce
- L'homme n'est pas une création divine, il est le produit de l'évolution, comme les autres êtres vivants de la planète



En plus : ni cause finale, ni force vitale
Prudence sur l'hérédité des caractères acquis

Dynamique de la biodiversité



Extinction fin d'Ediacara
()

Extinction fin de l'Ordovicien
(1)

Extinction fin du Dévonien
(2)

Extinction fin du Permien
(3)

Extinction fin du Trias
(4)

Extinction fin du Crétacé
(5)

Les aléas environnementaux :

- météorites,
- éruptions volcaniques,
- fluctuations du climat
- ...

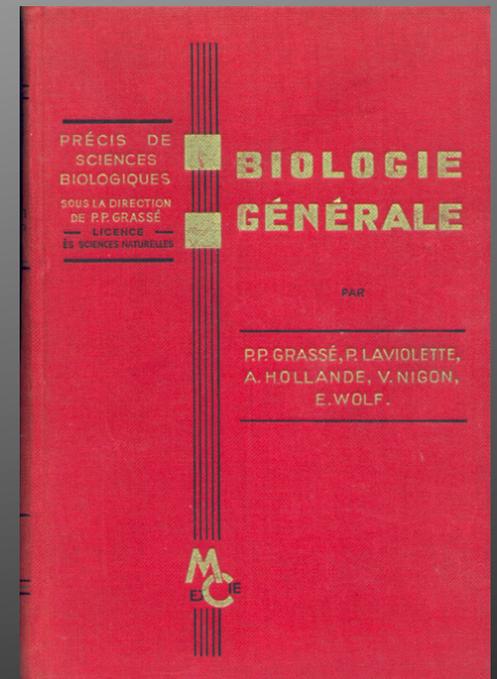
combinés ou non, sont à l'origine des variations de la biodiversité.

Note :

Les trajectoires des météorites ont une composante chaotique (problème de la stabilité du Système solaire) => forme de hasard

Le hasard et la vie : une banalité ?

- Le hasard est évoqué dans tous les ouvrages de biologie et d'écologie, dans tout ce qui concerne l'évolution des êtres vivants et beaucoup d'autres aspects... Alors ?
- Oui, on en parle, mais sans réellement approfondir la question :
 - Difficultés persistantes à le penser
 - D'où vient-il ?
 - Est-il néfaste, inutile, utile, voire nécessaire ?
 - ...



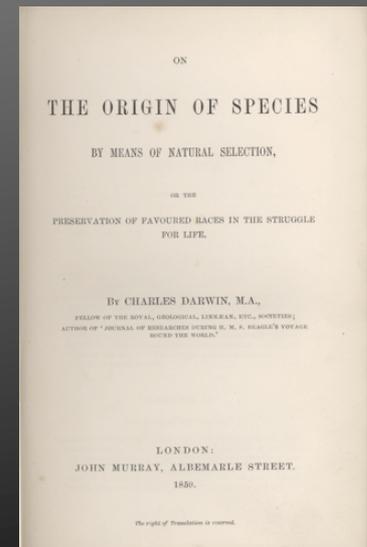
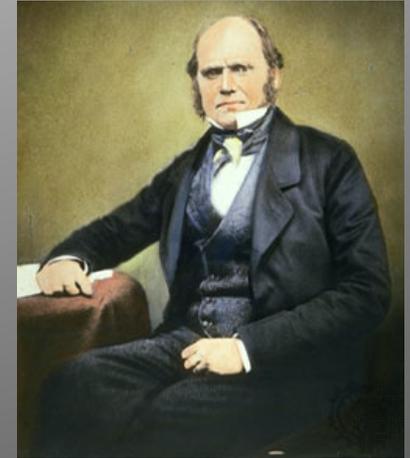
1966

Qu'en disaient les « grands ancêtres » ?

Charles Darwin

J'ai, jusqu'à présent, parlé des *variations* - comme si elles étaient dues au hasard expression qui sert à démontrer notre *ignorance absolue sur les causes de chaque variation particulière*. Une des fonctions du système reproducteur consiste autant à produire des différences individuelles qu'à rendre les descendants semblables à leurs parents. (résumé)

De l'origine des espèces (Ed. 1862, traduction E. Barbier)
Chapitre V. Les lois de la variation.



1859

Gregor Mendel

P 29



1866



die Pollenzellen $A + A + a + a$
die Keimzellen $A + A + a + a$

Es bleibt ganz dem **Zufalle** überlassen, welche von den beiden Pollenarten sich mit jeder einzelnen Keimzelle verbindet. Indessen wird

Les deux sortes de pollens sont reliées au hasard avec chaque cellule de l'œuf.
(i.e., Recombinaison aléatoire des caractères).

Théorie de l'évolution ... en bref

Hasard

Au niveau individuel et populationnel (ensemble d'individus d'une même espèce)

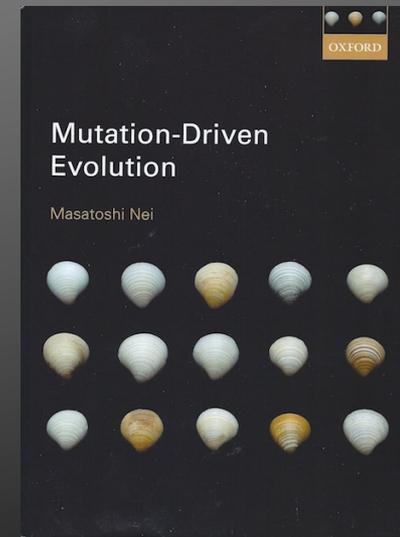
- Phase 1 : reproduction->descendants ressemblant au(x) parent(s) mais présentant des différences : hérédité + variations (diversification)
- Phase 2 : sélection naturelle des individus les mieux adaptés qui assureront les futures descendance (fitness)

Sans hasard :

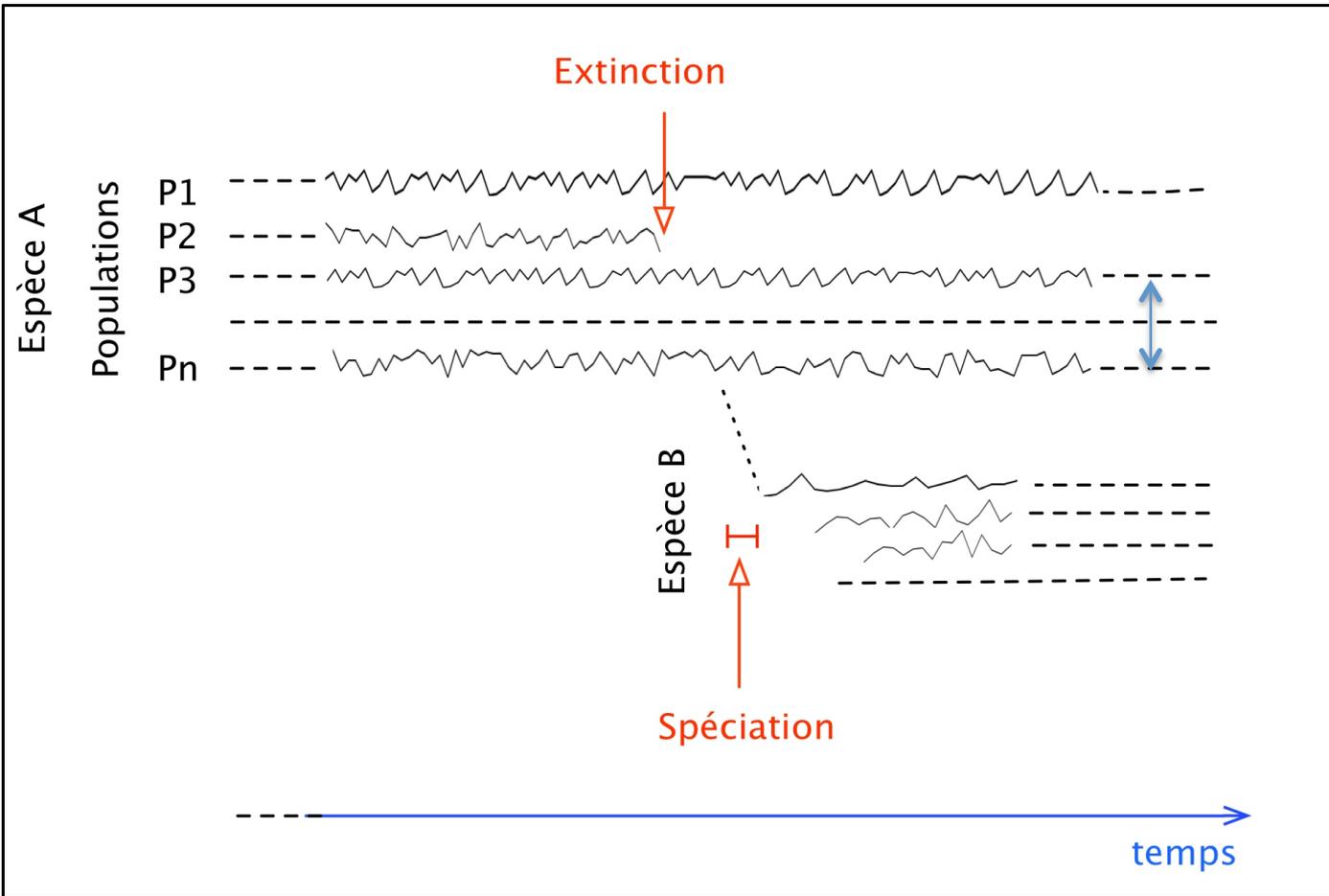
- ✓ pas de diversification,
- ✓ pas d'individus potentiellement adaptés à des changement environnementaux,
- ✓ pas de sélection après un changement,
- ✓ pas d'évolution => Risque d'extinction

Schéma classique : évolution pilotée par la sélection

Schéma nouveau : évolution pilotée par les « mutations »



Dynamique évolutive



Hasard

Et pourtant,
150 ans après...



the guardian

home > UK > society

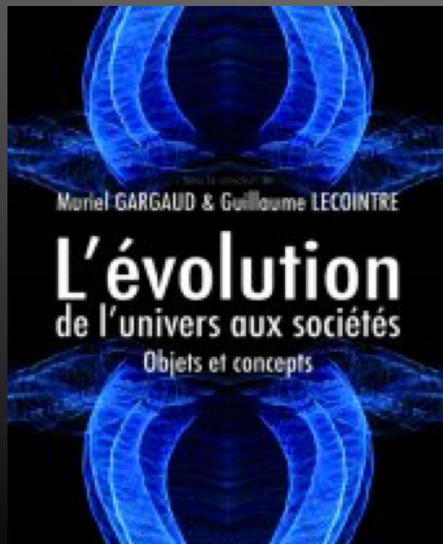
Cancer
The Observer

Are scientists wrong to talk about 'luck'?

Alice Roberts

The strong reaction to recent press reports about cancer risk have highlighted our deep-seated need for reason

18 janvier 2015



20 novembre 2015

6 ans de réflexion collective

33 scientifiques

De l'astrophysique aux sciences sociales

Du Big Bang à la vie en société

De l'univers à l'anthroposphère

Le hasard est omniprésent... pas de chapitre spécifique

Mais un point de vue (presque) commun

Hasard

Disséquer le hasard

- Les êtres vivants et plus généralement les systèmes vivants sont soumis à deux sortes de hasards, à deux sources de phénomènes aléatoires :
 - l'une externe, provenant de leur environnement,
 - l'autre interne, engendré par des processus biologiques, des « roulettes biologiques » :

« Les corps biologiques et les entités sociales qui en émergent manifestent des propriétés qu'on ne voit pas en physique ou en chimie. Ces entités présentent des processus générateurs de hasard qui produisent de la diversité. Cette diversité multiplie le nombre de « versions disponibles » à un moment où la population traverse des conditions de l'environnement particulièrement difficiles. C'est le hasard endogène. »

Hasard externe
ou exogène



Hasard interne



ou endogène

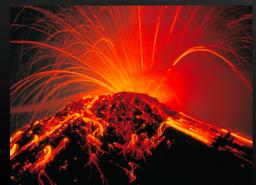


Le hasard exogène



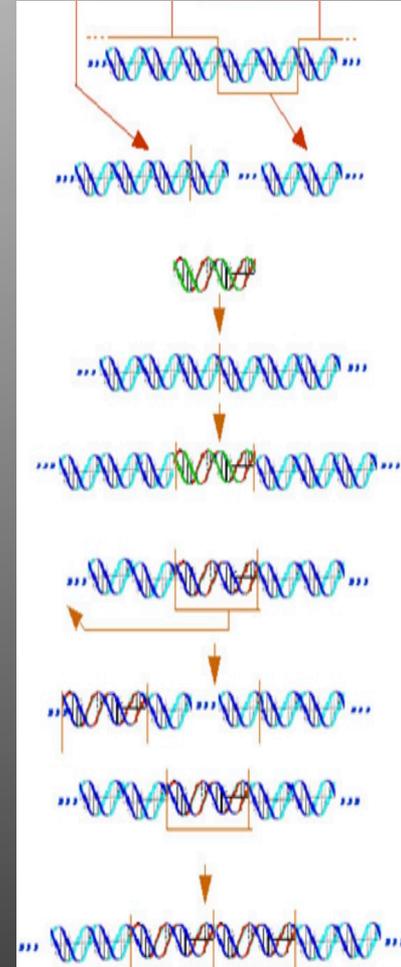
On peut citer : des facteurs aléatoires d'origines cosmique, géologique, climatologique, écologique ou anthropique produisant des mutations, des disparitions (ex. dinosaures), facilitant aussi des émergences (spéciations) ou modifiant les interactions écologiques et sociales (compétition, coopération, prédation, etc.). On retiendra, à titre d'exemples :

- Les atteintes aux génomes, sachant qu'une autorégulation interne peut ou non amplifier leurs effets (ex. système SOS, ou expression du gène *mut* chez E. Coli)
- Les atteintes aux individus et aux populations, sachant que les disparitions libèrent des « habitats » qui peuvent être occupés par d'autres êtres vivants
- L'émergence de conditions favorables , mais... pas nécessairement pour tout le monde
- La nature aléatoire est d'origine physique ou bio-écologique (chaos cosmique, fluctuations quantiques, éruptions volcaniques, variations climatiques, accidents industriels, interactions écologiques...)



Le hasard endogène

- **Le hasard endogène et fonctionnel** résulte de processus :
 - cellulaires (ex. systèmes de réactions biochimiques couplées ou mouvements dans le milieu intracellulaire),
Ce hasard produit des mutations ponctuelles, des inhibitions locales (dus par exemple à la méthylation), mais aussi des remaniements du génome (échange de gènes, échange de morceaux de chromosomes, migration aléatoire des chromosomes appariés, etc.), il produit aussi des erreurs de copie lors des divisions cellulaire. **Ces erreurs peuvent ou non être corrigées.**
 - physiologiques (engendrant, par exemple, des comportements aléatoires : d'une proie face à un prédateur, le « fourragement » pour la recherche de nourriture, etc...), ,
 - écologiques (par exemple, la dispersion des graines conduisant à des distributions aléatoires d'individus, comme les arbres en forêt amazonienne).
 - ...





Hasard

Pourquoi ce hasard persiste-t-il encore ?

- Pourquoi n'a-t-il pas été éliminé après 4 milliards d'années d'évolution ?
- Pourquoi cette évolution n'a-t-elle pas seulement conduit à des mécaniques bien huilées ?
- Présente-t-il parfois un avantage sélectif ?
- Est-il parfois nécessaire ?



Hasard

Le hasard est un facteur de survie

- Sans hasard, pas de diversité biologique, pas d'adaptation individuelle ou populationnelle potentielle aux risques environnementaux, et **pas d'évolution**
- Bonne solution en environnement et en avenir incertains (paradigme des méthodes de Monte-Carlo), **le hasard a assuré et assure la survie de la vie**
- **Les processus endogènes produisant du hasard sont à la fois des produits et des moteurs de l'évolution**
- Mais la chance des uns peut faire la malchance des autres !

« Rien en biologie ne prend de sens si ce n'est à la lumière de l'évolution »
Theodosius Dobzhansky (1973)

Les processus darwiniens ne s'expriment pas seulement à l'échelle de la « grande évolution »

Exemples :

- Évolution rapide des agents pathogènes
- Approche évolutive du cancer
- Du côté de l'homme : dimensions darwiniennes des pathologies

Vers une médecine évolutive

Agents pathogènes et évolution

- En présence d'antibiotiques, les **variations** au moment de la reproduction conduisent à un nombre limité d'individus résistants qui sont **sélectionnés** et peuvent alors proliférer. Cette résistance est amplifiée lorsque le support génétique de cette résistance est porté par un plasmide (transmission horizontale intra-générationnelle).
- La situation est voisine pour les ravageurs et les vecteurs de maladies infectieuses résistants aux pesticides
- **Micro-évolution** (aussi utilisée en pratique)

Approche évolutive du Cancer

- Contrairement aux cellules saines, les cellules cancéreuses sont génétiquement instables et connaissent de nombreuses mutations :

(reproduction, hérédité) ET diversification

- Certaines d'entre elles résistent au système immunitaire, puis aux anticancéreux. Des véritables lignées sont **sélectionnées**
 - Elles peuvent diffuser et coloniser l'organisme (métastases).
 - Elles perdent la possibilité de mourir (apoptose)
 - Elles prolifèrent indéfiniment
- **Qu'en est-il des processus de réparation de l'ADN ? Sont-ils inhibés ?**

Du côté de l'homme : dimensions darwiniennes des pathologies

- Meilleure compréhension de phénomènes :
 - Maladies et avantages génétiques
 - Sélection de populations (résistance nécessaire ou non au rayonnement solaire: couleur de peau, à des pathologies infectieuses, capacités alimentaires, ...)
 - Cas de la drépanocytose ou anémie falciforme
 - Sensibilités des populations amérindiennes aux pathologies infectieuses importées
 - Le cancer est aussi une maladie de l'âge, les humains n'ont pas été sélectionnés contre cette maladie
 - ...

Que faire ?

- On pratique déjà la sélection, pourquoi ne pas aussi essayer de manipuler le hasard « diversificateur » ?
 - On sait que des joueurs « malhonnêtes » peuvent tricher (dé pipés), que des roulettes mal équilibrées conduisent à des biais, ...
 - Pourquoi ne pas gripper, ne pas biaiser ou mieux huiler les « roulettes biologiques », génératrices de diversité ?
 - Par exemple, pour diminuer la diversification des cellules cancéreuses ou des agents pathogènes, ou l'augmenter pour accroître la biodiversité et la vitesse évolutive ?
 - Pourquoi ne pas créer du hasard nous-mêmes pour accroître la résilience d'écosystèmes (exemple en faisant des plantations multi-spécifiques, mélangées)

Quelques compléments « culturels »



Az-zahr

الزهر

« Le hasard a longtemps été nié par l'Église qui y voyait une insulte aux plans de Dieu.

Puis il a été nié par les savants pour qui l'univers était une mécanique bien huilée.

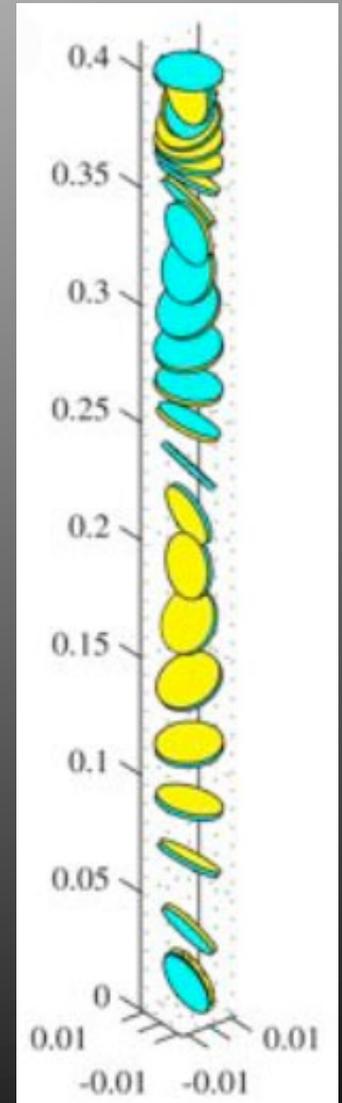
À la limite, il y avait des lois que nous ne connaissions pas encore. »

Robert Solé, Journaliste et écrivain.

Le Monde littéraire, 7/12/07 à propos du livre « Qu'est-ce que le hasard ? » de Denis Lejeune, Ed. Max Milo, 2007.

Débusquer le hasard

- **Mécanique quantique**: incertitude de Heisenberg, fluctuation quantique, c'est un hasard « irréductible, intrinsèque, ontologique »
- **Le hasard de Cournot** : rencontre de chaînes causales indépendantes, paradigme du piéton vs pot de fleurs
- **Le hasard mécanique** : sensibilité aux CI, les jeux de hasard (ex. pile ou face), etc. (H. Poincaré, B. Russell, A Kolmogorov, I. Sinai, ...)
- **Le hasard brownien** : chocs aléatoires entre molécules (gaz)
- Turbulences (ex. chaos déterministe)
- Systèmes écologiques et socio-économiques
- Historicité et hasard
- **Pour en traiter** : le calcul des probabilités et de plus en plus la **théorie des systèmes dynamiques « non linéaires »**.



Pour traiter du hasard: le calcul des probabilités

- Fondé sur l'algèbre des événements et une mesure associée à ces événements comprise entre 0 et 1, appelée probabilité
- Approche fréquentiste
- Approche bayésienne et décision
- Probabilités subjectives et décision
- Il traite très efficacement des symptômes mais pas des causes



Pascal



Fermat

Hasard et systèmes dynamiques

- « *Il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit* » Henri Poincaré. Calcul des probabilités. Gauthier-Villard, 1912. (introduction)
- Travaux de A. Kolmogorov de Iakov Sinai, etc.
- Stabilité du système solaire et autres systèmes planétaires ? (cf., par exemple, les travaux de « l'école de Nice »)
- Et : ne pas confondre déterminisme et prédictibilité

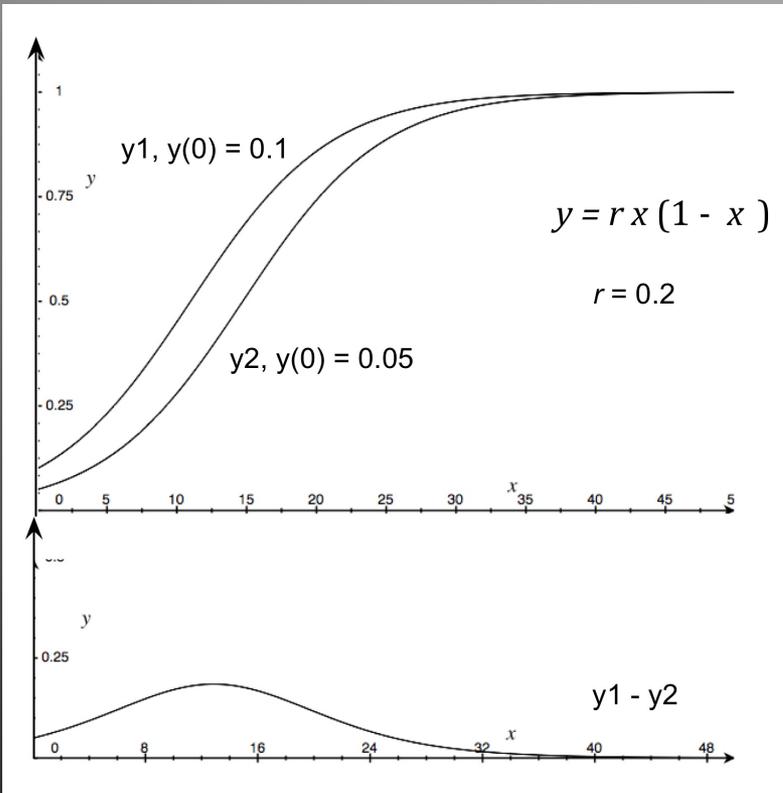


Portrait de Henri Poincaré par Eugène Pirou (1890)
Image disponible sur le site :

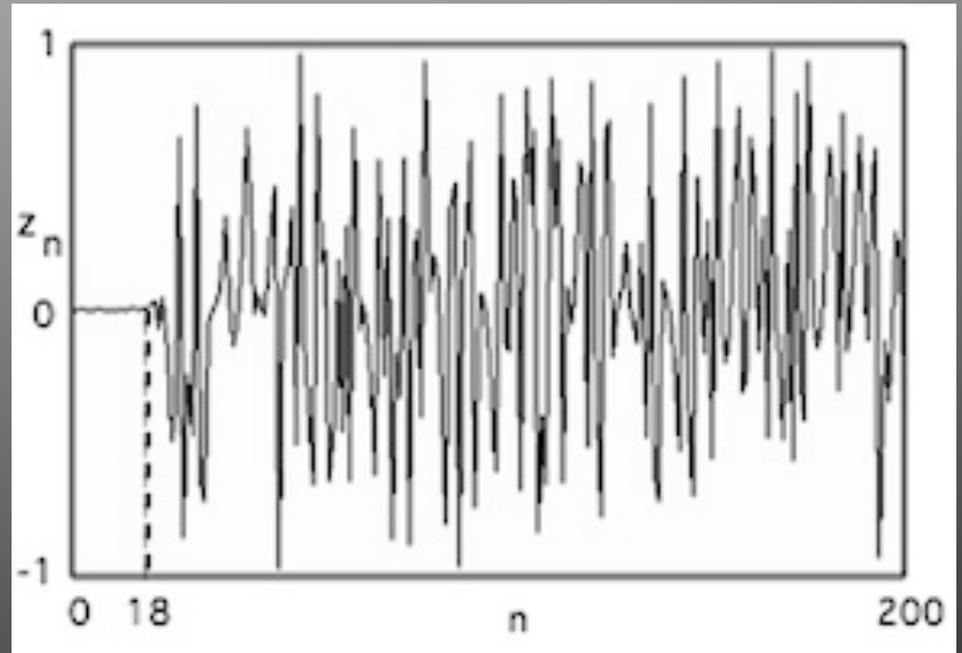
<http://henri-poincare.ahp-numerique.fr/items/show/136>

Sensibilité aux conditions initiales

Chaos « déterministe »



Logistique en temps continu



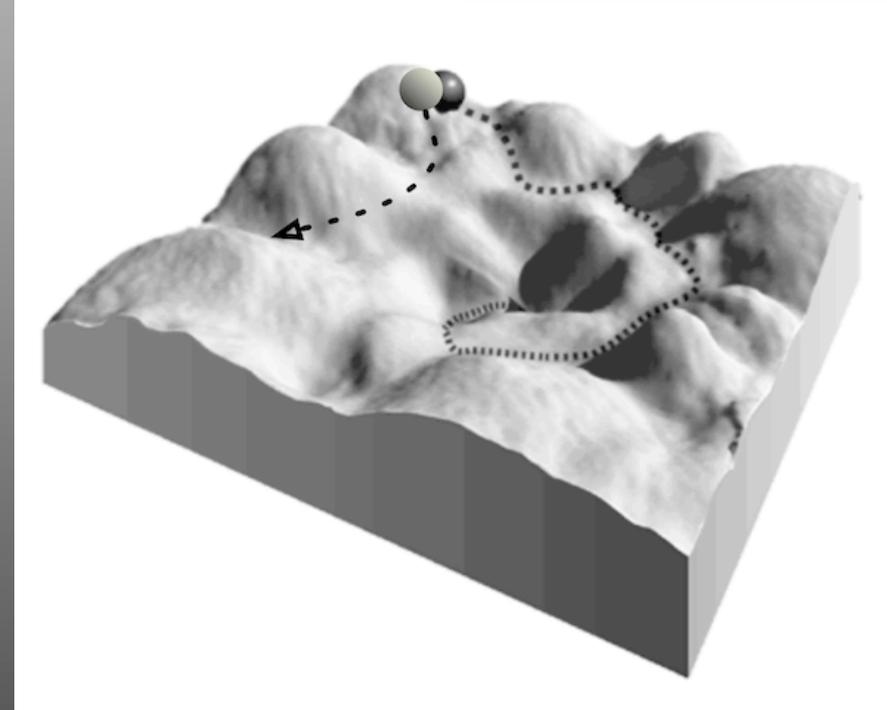
$$z_n = x_n - y_n$$
$$x_n = r x_n (1 - x_n), r = 3,98, x_0 = 0,5000$$
$$y_n = r y_n (1 - y_n), r = 3,98, y_0 = 0,5001$$

Logistique en temps discret

Espace des phases



Jurassic Park



Représentation « pédagogique »

Un hasard dû à la « complexité » de l'espace des phases.

L'évolution est-elle prédictible ?

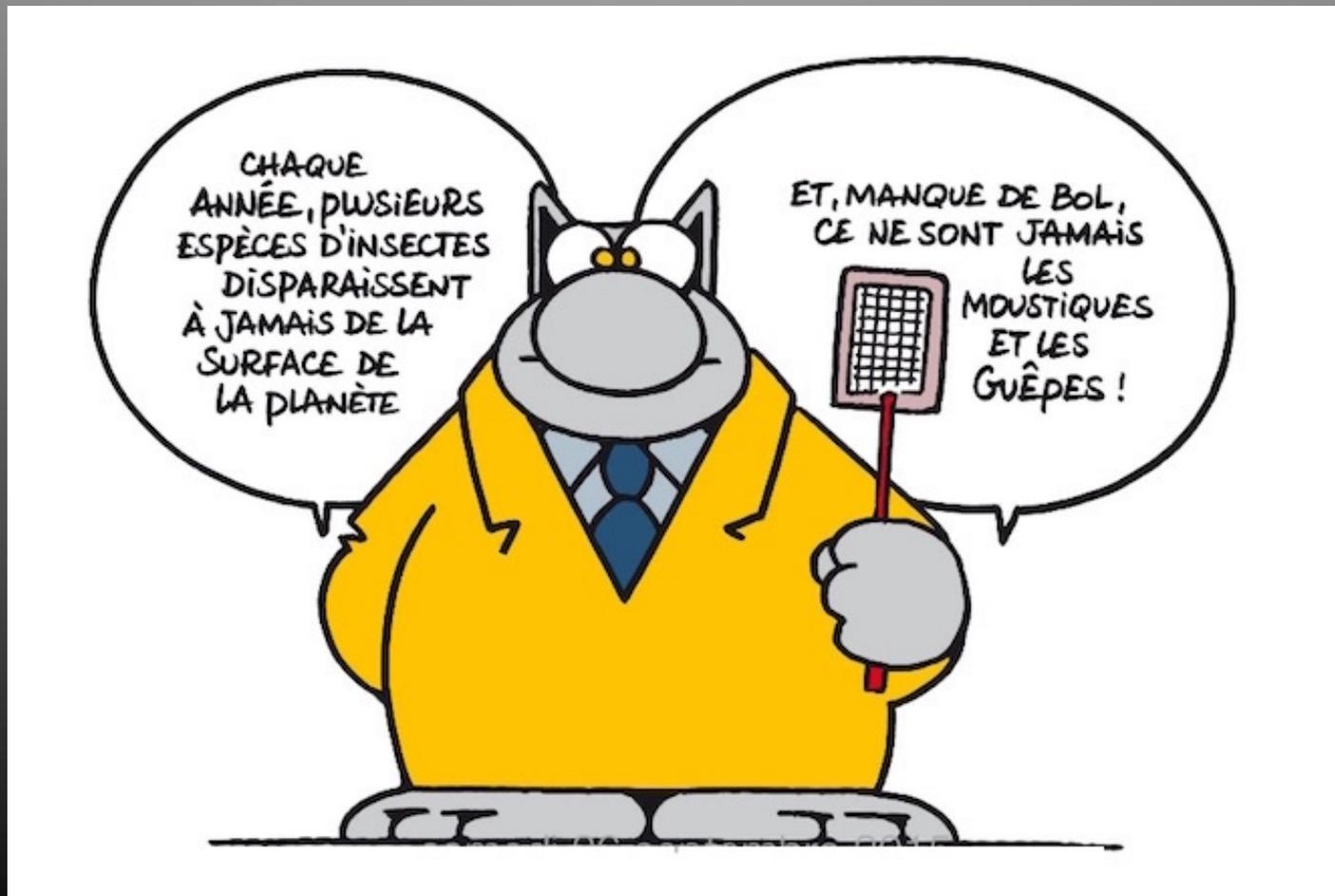
- Seul le passé est prédictible... C'est d'ailleurs ainsi qu'on a pu reconstituer l'évolution : preuve de la cohérence d'ensemble de la théorie en notant que ce schéma s'appuie sur l'analyse des couples : **hérédité – variabilité : ressemblances/dyssemblances**
- Pour l'avenir, à très court terme, un peu, à long terme, sans doute impossible pour des raisons très profondes :
 - Imprédictibilité dû au hasard exogène, mais aussi endogène, dû notamment à la complexité de *l'espace des phases*, qui en plus est de dimension variable, dont on ne connaît pas les mathématiques...
 - **Très grande incertitude**
 - Rappelons que dans les années 1980, certains auteurs prévoyait que 50 % des espèces existantes auraient disparu en 2000, c'est maintenant 25 % en 2100
 - En fait, il existe une quasi infinité de possibilités, seul un suivi, voire un certain contrôle est raisonnable, en pratiquant une "gestion adaptative"

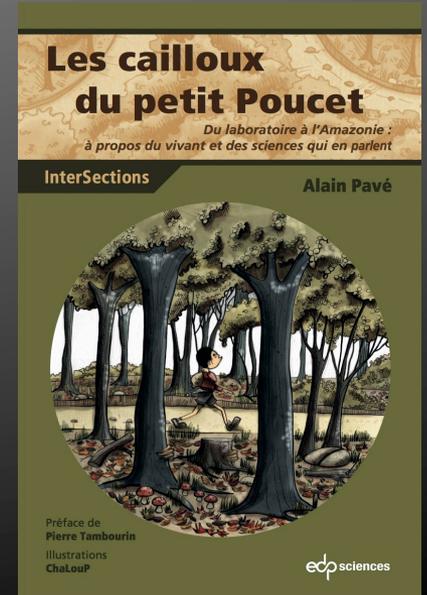
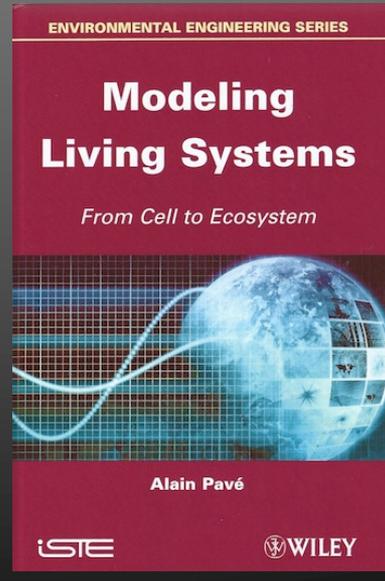
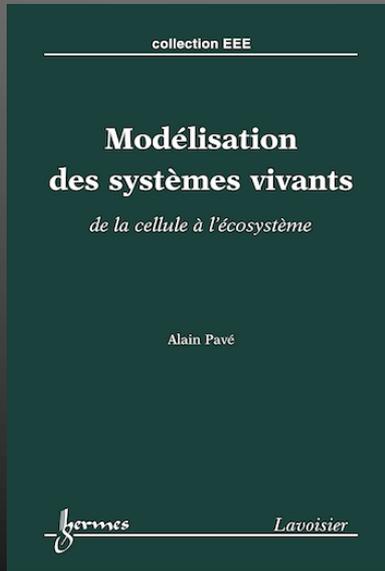
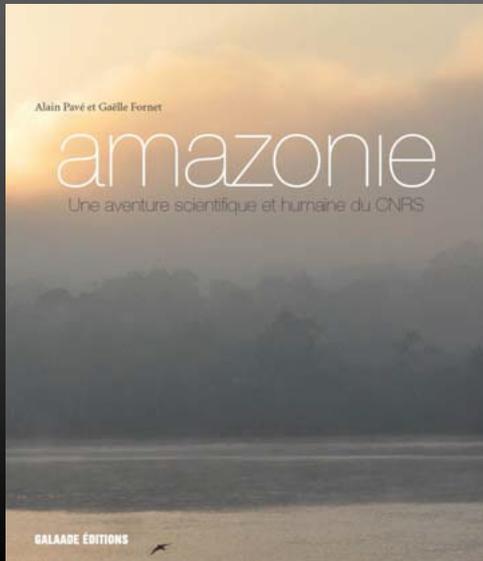
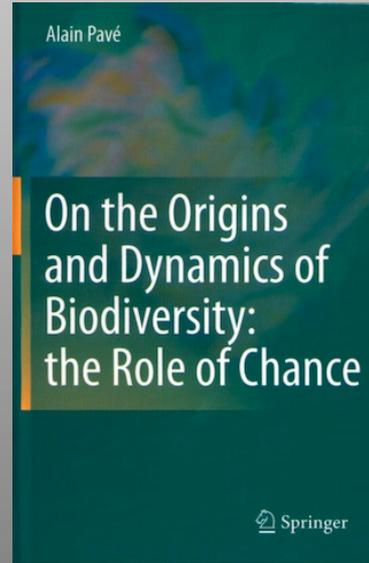
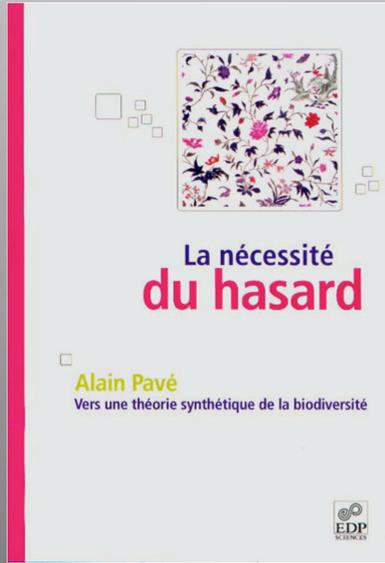
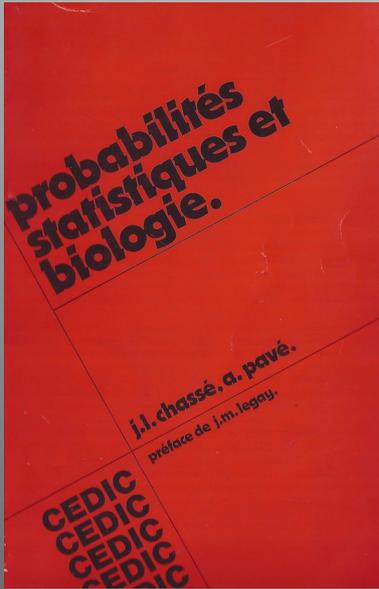
Le hasard et ses conséquences

- Hasard =>
 - Surprise
 - Incertitude,
 - Prédicibilité limitée, voire imprédictibilité
 - Variabilité, diversité
 - Aléas, risques...
- Quelques questions
 - Un *système complexe* peut-il engendrer sa propre incertitude ?
Quelles en sont les conséquences ?
 - Une *évolution* spontanée est-elle possible sans hasard ?
 - Y a-t-il une parenté avec les notions *d'incomplétude et d'indécidabilité* en mathématiques ?
 - Un système sans imprévu, sans hasard, a-t-il une histoire ?

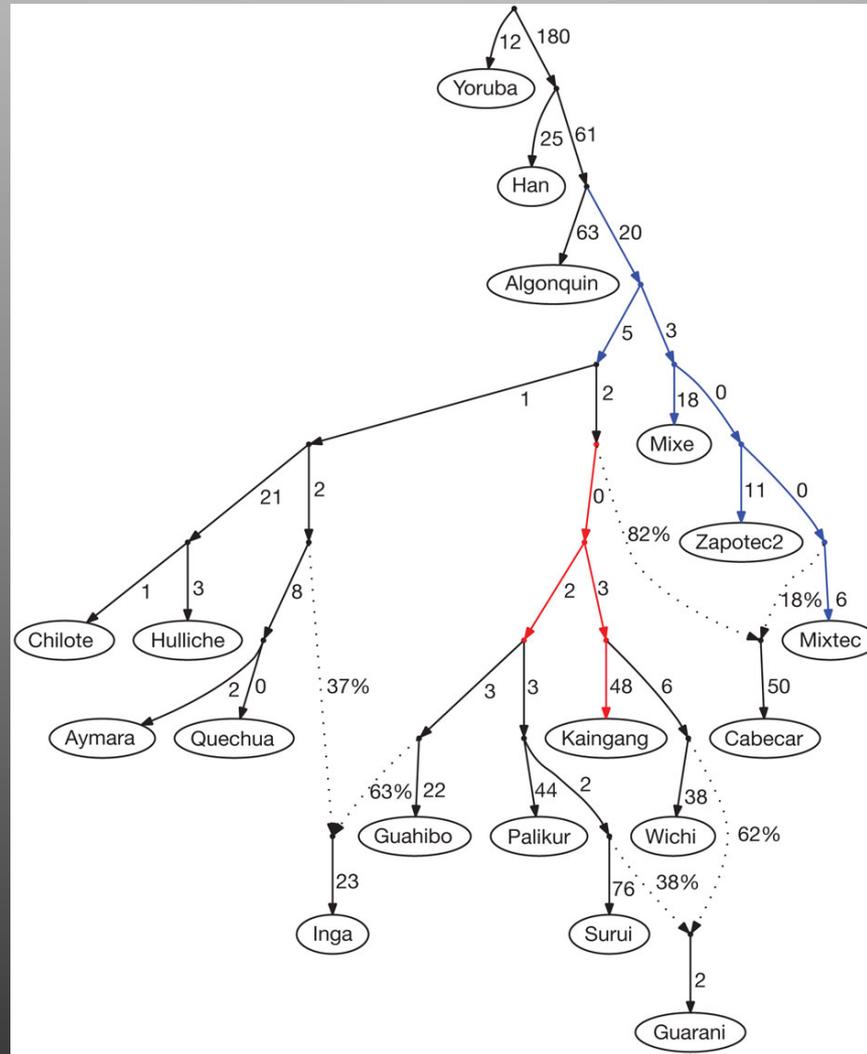
C'est... fini pour aujourd'hui

Merci de votre attention 😊



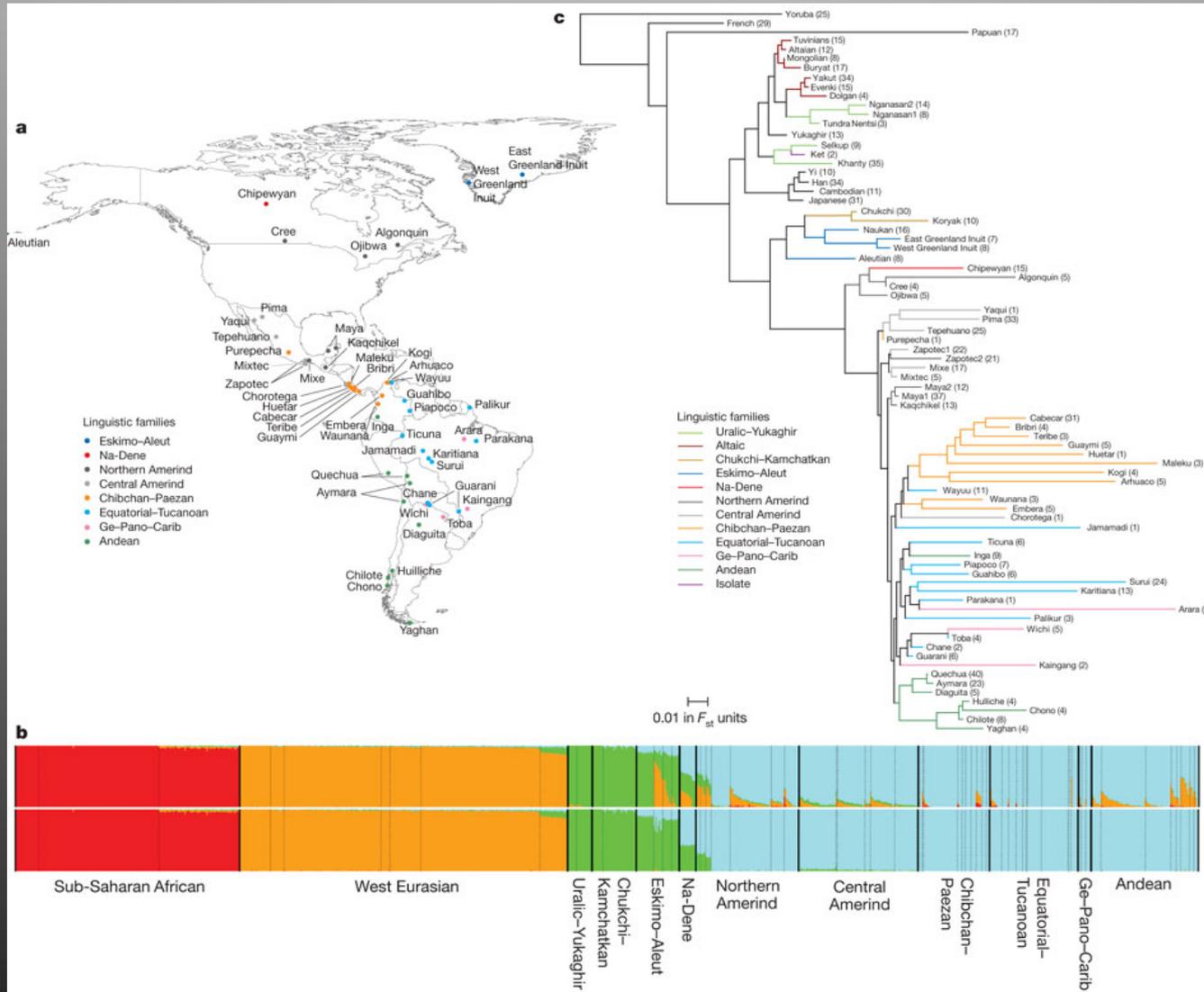


A model fitting populations of entirely First American ancestry.



D Reich *et al.* *Nature* **488**, 370-374 (2012) doi:10.1038/nature11258

Geographic, linguistic and genetic overview of 52 Native American populations.



D Reich et al. *Nature* 488, 370-374 (2012) doi:10.1038/nature11258