



# **Les organismes vivants comme pièges à information**

**Antoine Danchin**

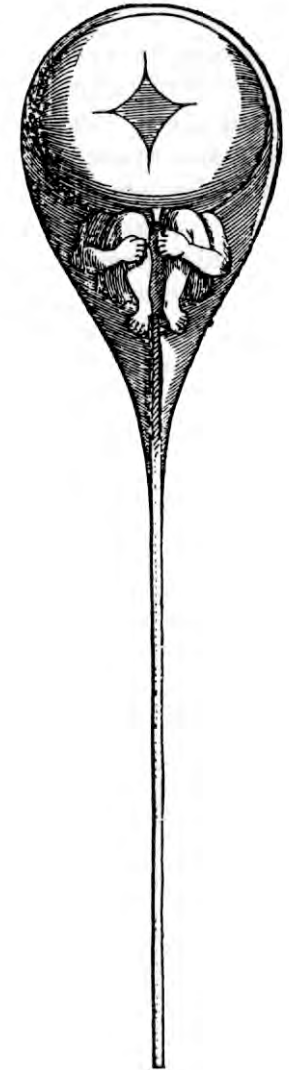
**唐善 安東**

**Ecole Centrale**

**10 février 2009**

# Petit bagage

- Ce n'est pas un organisme qui est transmis au cours des générations, mais un algorithme de construction
- La machine qui met en œuvre l'algorithme en est physiquement séparée
- Ce processus est formellement semblable à celui qui se déroule dans les ordinateurs
- Mais les ordinateurs ne font pas (encore) des ordinateurs : que leur faut-il de plus ?
- L'étude comparative des programmes génétiques permet de découvrir les gènes nécessaires à cette prouesse. Elle permet aussi de penser la vie comme piège à information



# Ce qu'est la vie

La vie demande :

- ➔ Une **machine** permettant à un programme de s'exprimer (qui se **reproduit**)
  - ➔ 1. **Métabolisme** (processus dynamique)
  - ➔ 2. **Compartmentation** (définissant un intérieur et un extérieur)
- ➔ Un **programme** (qui se **réplique**)
  - ➔ 3. **Transfert récursif d'information** => codage d'un premier niveau vers un second comme caractéristique essentielle

**La cellule est l'atome de vie**

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Le métabolisme

## La vie est en perpétuel devenir chimique

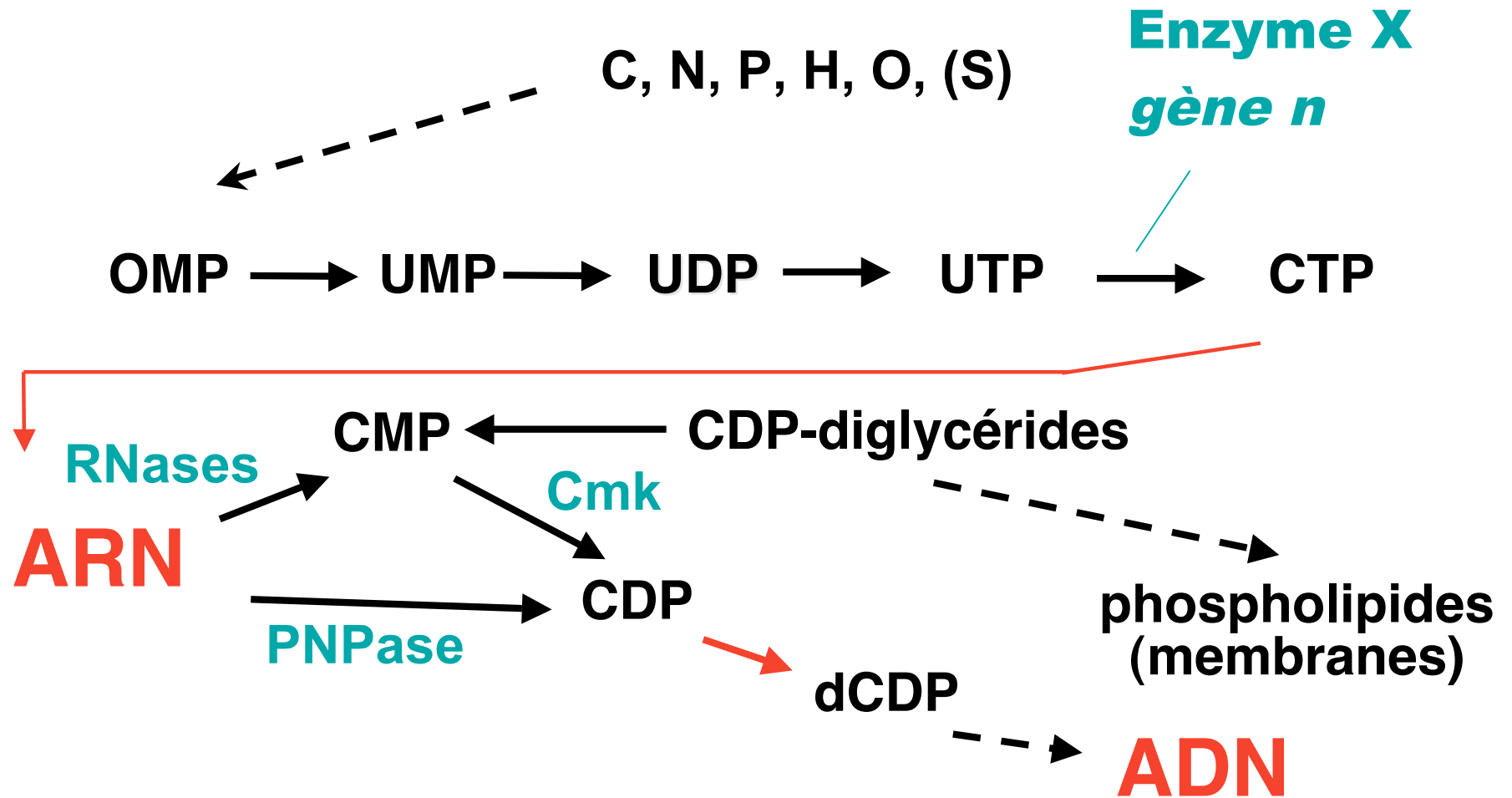
- Environ 800 molécules interconvertibles sont nécessaires à toute forme de vie (“anabolisme et catabolisme”)
- Assimilation de C, N, O, S, P et d’ions
- Gestion de l’énergie (ATP et transferts d’électrons)

Les coenzymes (souvent connus sous le nom de ‘vitamines’) sont des composés essentiels du métabolisme, mais ils sont généralement oubliés dans les scénarios de l’origine de la vie !

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Une voie métabolique



*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

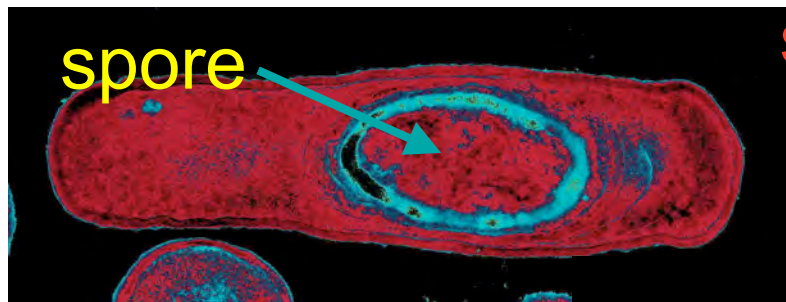
# Compartimentation

Deux stratégies principales distinguent les organismes

→ Une seule enveloppe (plus ou moins compliquée) : les **procaryotes (Archaea et Bacteria)**

→ Multiplication des membranes et des peaux : les **eucaryotes (Eukarya)**

Même chez les bactéries....



*Bacillus subtilis*



*Stigmatella aurantiaca*

# Règles de réécriture

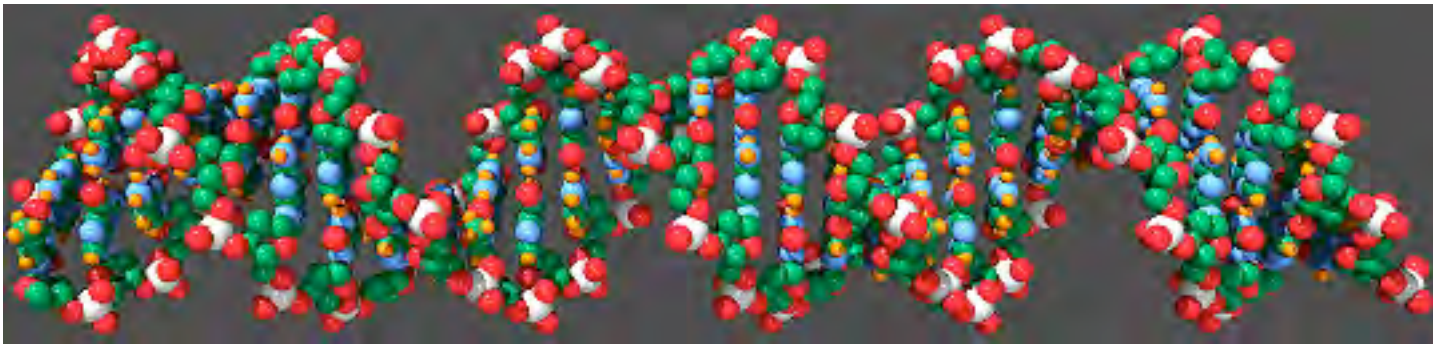
- **Réplication (ADN → ADN)**  
loi: “complémentarité”
- **Transcription (ADN → ARN)**  
loi: “complémentarité”
- **Traduction (ARN → protéine)**  
loi: “code génétique”

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Mémoire

L'Acide Désoxyribonucléique (ADN) conserve la mémoire du programme génétique. Il est fait du chaînage de quatre types de maillons élémentaires. Deux chaînes **complémentaires orientées** se font face, formant une double hélice.



**A => T**

**C => G**

**T => A**

**G => C**



HKU - PASTEUR RESEARCH CENTRE

香港大學—巴斯德研究中心



HKU - PASTEUR RESEARCH CENTRE

香港大學—巴斯德研究中心



# Deuxième loi de complémentarité : la transcription

## L'opéron lactose

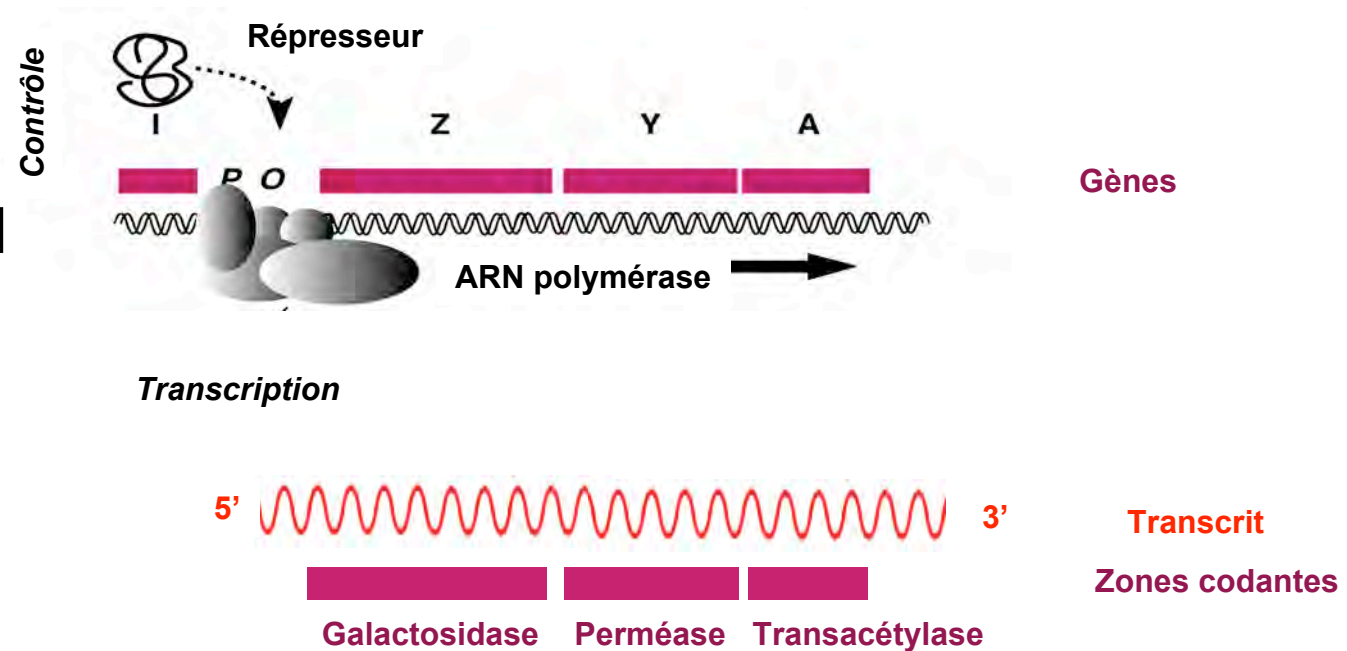
**ADN => ARN**

**dA => rU**

**dC => rG**

**dT => rA**

**dG => rC**



JACOB F, PERRIN D, SANCHEZ C, MONOD J.C R L'opéron: groupe de gènes à expression coordonnée par un opérateur

*C R Hebd Seances Acad Sci.* (1960) **250**:1727-9

JACOB F, MONOD J. Gènes de structure et gènes de régulation dans la biosynthèse des protéines

*C R Hebd Seances Acad Sci.* (1959) **249**:1282-1284.

# Le code génétique et la traduction

La séquence génomique est vue comme un texte écrit avec un alphabet de quatre lettres. Ce texte est associé à un code (au sens de « code secret »), le code génétique, qui conduit d'un alphabet à quatre lettres à un alphabet de 20 lettres.

Ce codage permet la **récurtivité**, puisque ce sont des protéines, codées par des gènes écrits sous forme de séquences de nucléotides dans l'ADN qui le manipulent. Ce processus crée des propriétés originales des liens entre objets.

Douglas Hofstadter (original : Basic Books, 1979 ; traduction, 2000)

Gödel, Escher, Bach : Les Brins d'une Guirlande Eternelle, Dunod.

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

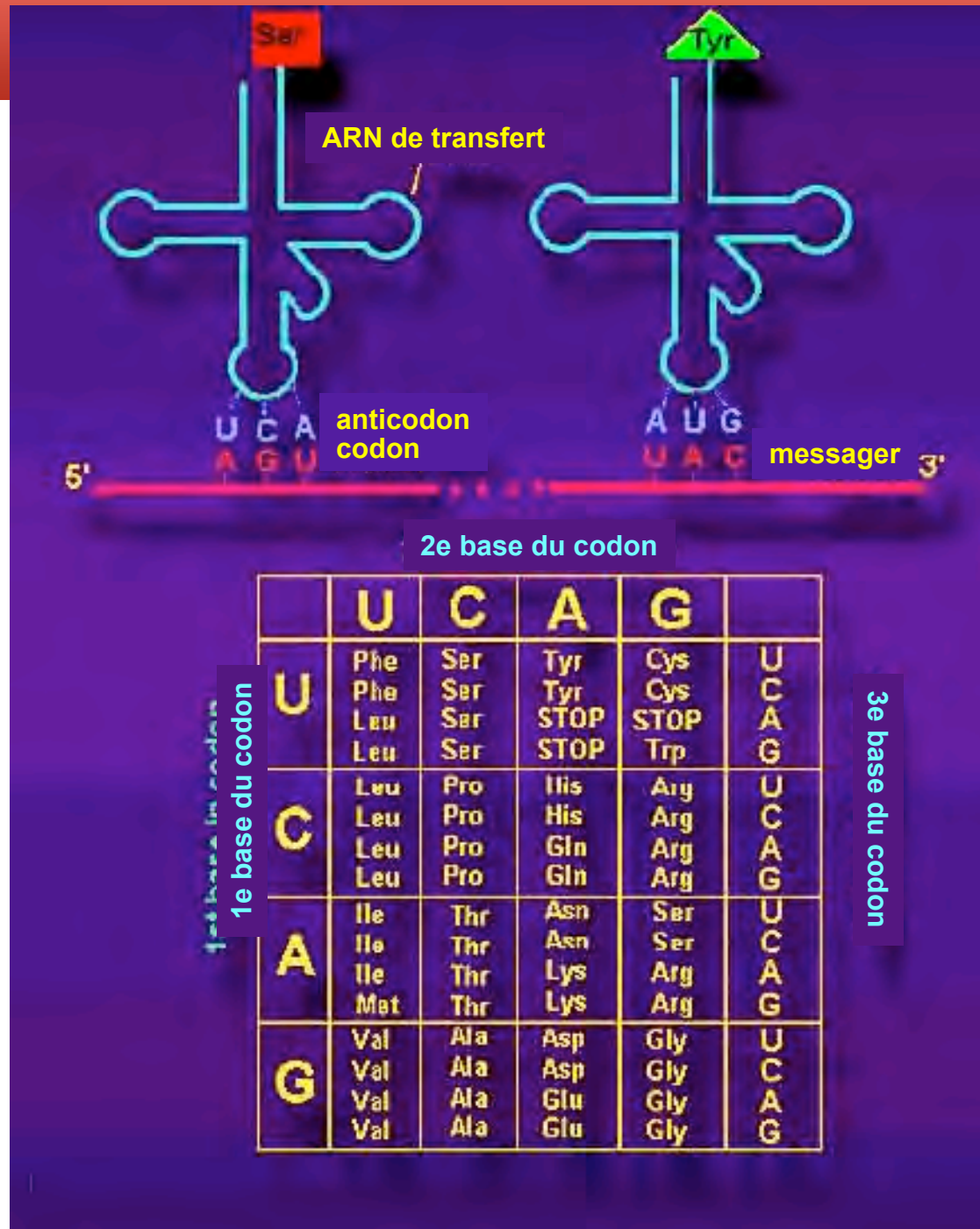
<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Protéine

**Adaptateur**  
ARN de transfert

**ARN messenger**

**Le code génétique**



# Cellules et ordinateurs

La génétique repose sur la description des génomes comme des textes écrits au moyen d'un alphabet : mais **les cellules se comportent-elles comme des ordinateurs ?**

- Transfert Génétique Horizontal
- Virus
- Génie génétique
- **Transplantation d'un génome nu dans une cellule réceptrice** suivie du changement de la machine réceptrice en une nouvelle (2007)

**tout concourt à séparer**

«Machine» (l'usine cellulaire) et «Données/Programme» (le génome)

**CONJECTURE: les organismes vivants sont des pièges à information, et nous pouvons identifier les processus concrets qui permettent l'accumulation de l'information**

# Un ordinateur génétique

- Dans un ordinateur, la machine est séparée des données et du programme
- Données et programme jouent le même rôle (*càd* on peut les considérer comme des ‘déclarations’); ils peuvent être modifiés par la machine (ADN polymérase ‘infidèles’)
- Une réflexion générale (Alan Turing et de nombreux autres penseurs) considère les actions de la machine, **mais pas la façon dont elle est construite**

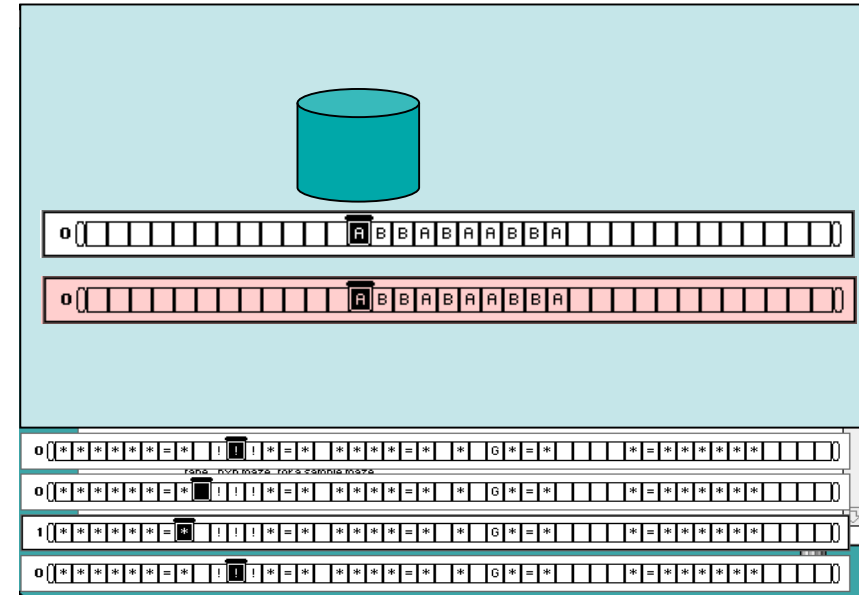
***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Ce qu'est le calcul

Deux entités permettent le calcul :

- Une machine capable de lire et d'écrire
- Un programme (sur un support physique), séparé par l'esprit humain (pas conceptuellement !) en deux entités :
  - Programme (définissant l'"objectif")
  - Données (définissant le contexte)



La machine est distincte de l'entité données/programme

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

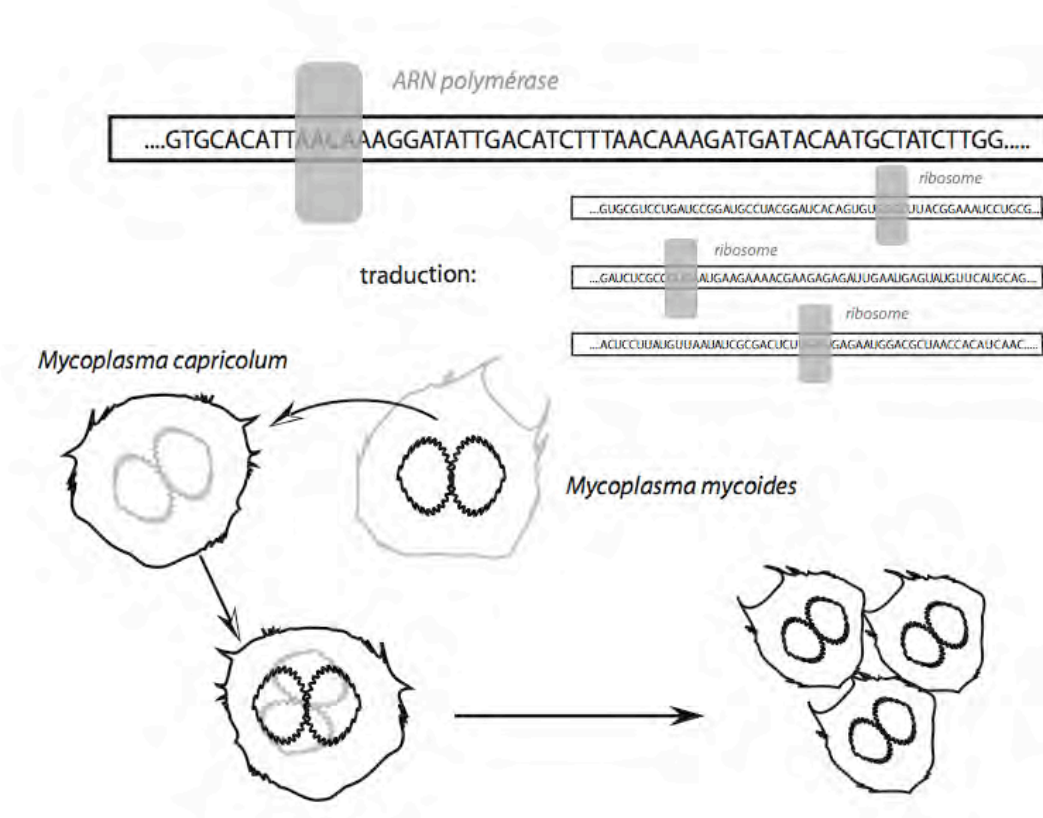
<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# La démonstration de Lartigue-Venter

## La Machine de Turing

Peut être parallélisée

## Transplantation d'un génome



Genome transplantation in bacteria: changing one species to another

Lartigue C, Glass JI, Alperovich N, Pieper R, Parmar PP, Hutchison CA 3rd, Smith HO, Venter JC  
*Science* (2007) **317**: 632-638

**“Les organismes vivants comme pièges à information”**

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

## Objection au modèle de la cellule-ordinateur

**“En plus du programme génétique, la cellule comporte une quantité considérable d’information...”**

**Mais c’est exactement la même chose pour un ordinateur et son système d’exploitation !**

**Cette observation — valide — signifie simplement que notre réflexion sur le concept d’information est incomplète**



Même pour un ordinateur, n'oublions pas le support physique



**Il ne suffit pas d'avoir une molécule d'ADN avec la bonne séquence, il doit encore être correctement replié !**

Gibson DG, Benders GA, Axelrod KC, Zaveri J, Algire MA, Moodie M, Montague MG, Venter JC, Smith HO, Hutchison CA 3rd. One-step assembly in yeast of 25 overlapping DNA fragments to form a complete synthetic *Mycoplasma genitalium* genome. *Proc Natl Acad Sci U S A.* (2008) 105:20404-20409

**“Les organismes vivants comme pièges à information”**

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Une image de la cellule dans le chromosome ?

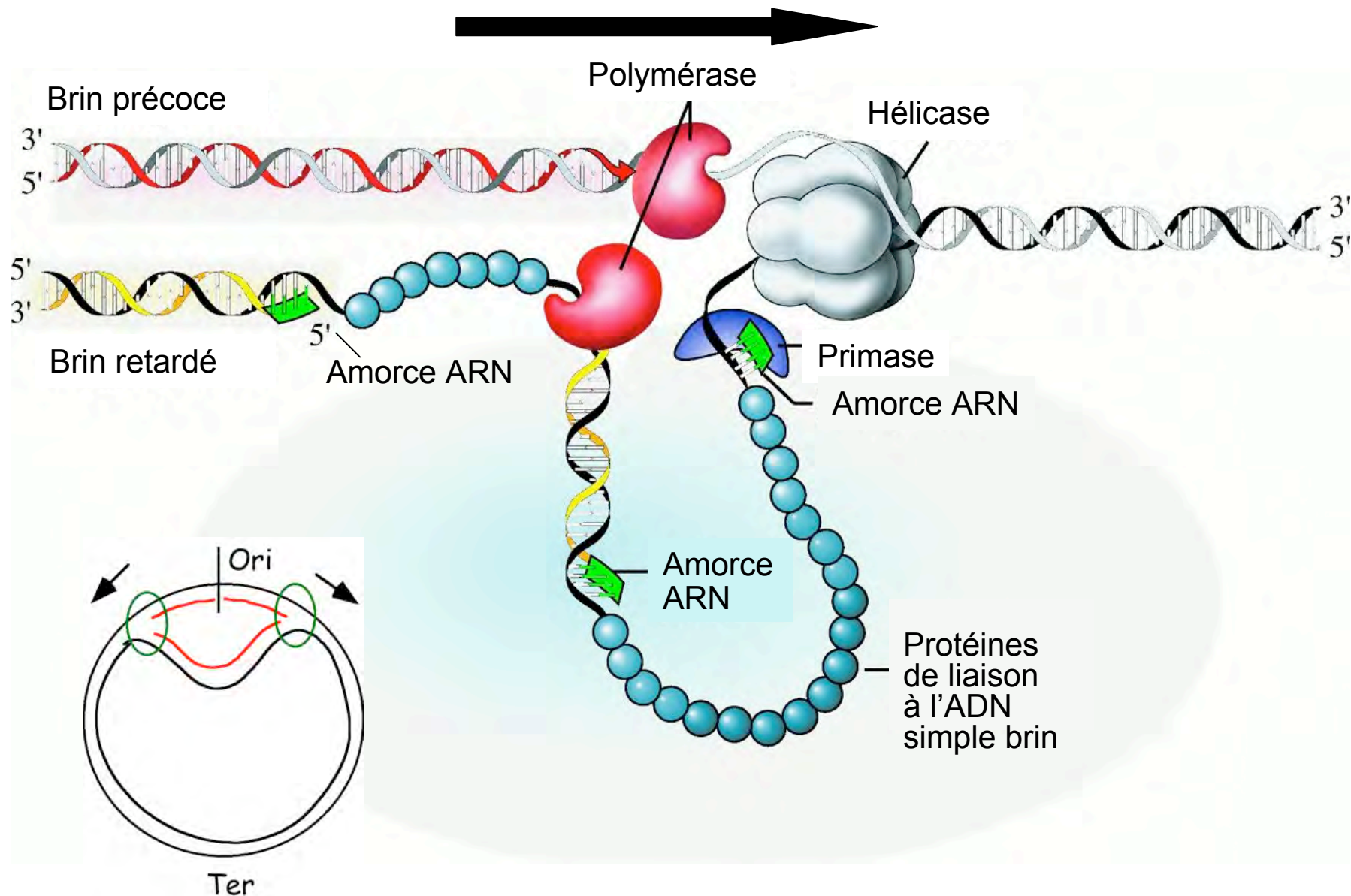
Si la machine doit non seulement se comporter comme un ordinateur mais doit aussi construire la machine, il faut trouver quelque part une image de la machine (John von Neumann)

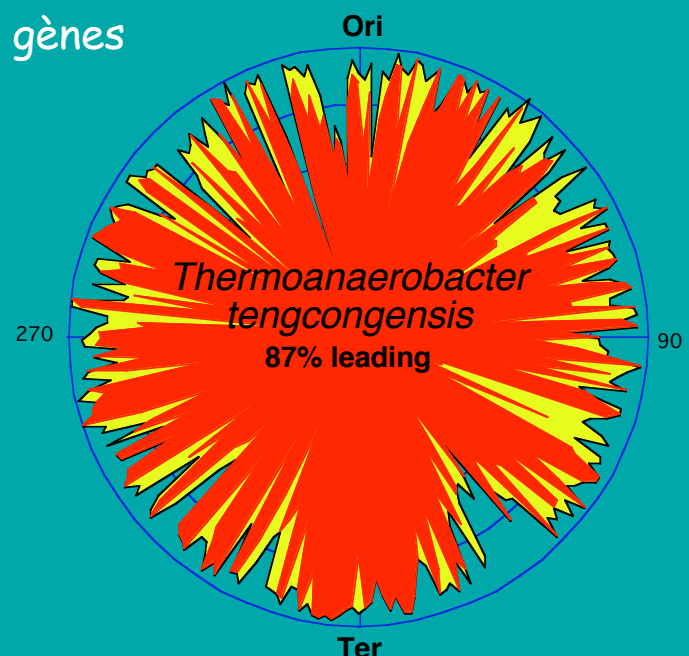
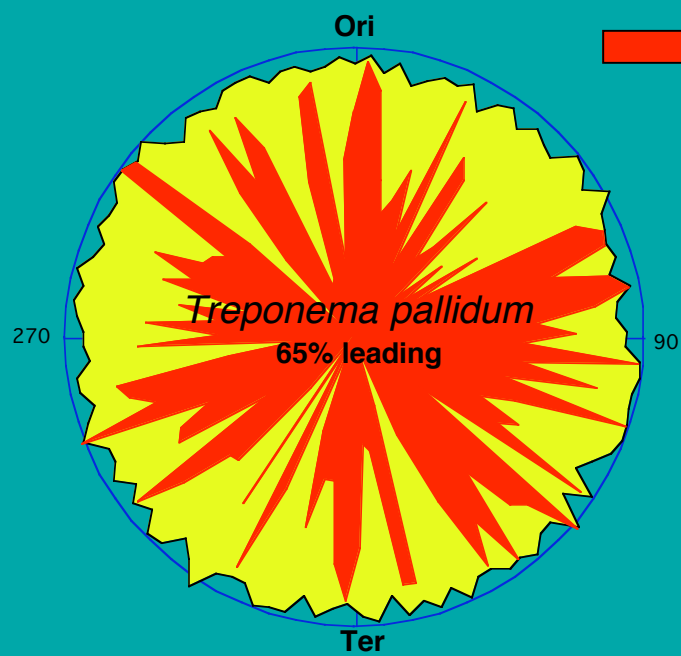
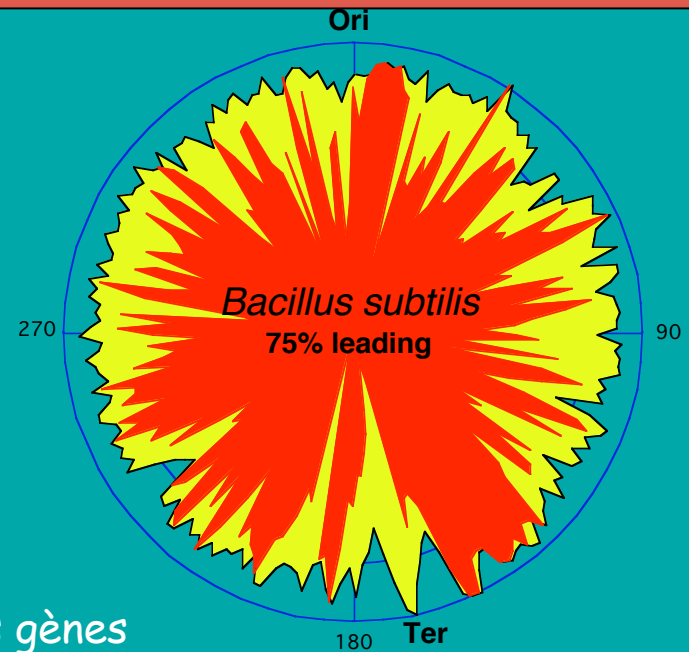
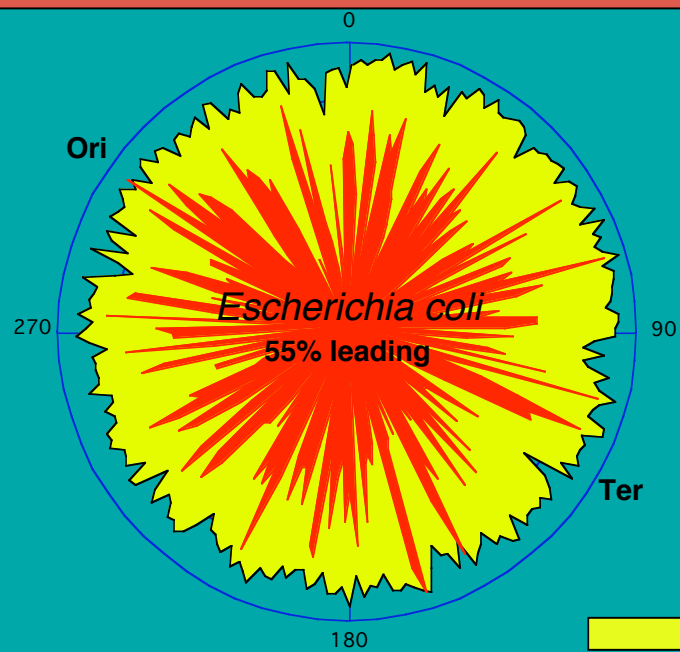
Y a-t-il une image de la cellule (de l'organisme) dans le génome ? L'ordre des gènes est-il aléatoire ?



***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Une dyssymétrie : réplication de l'ADN





 Densité des gènes  
 Densité des gènes dans le brin précoce

# Organisation des génomes

**L'ordre des gènes est-il aléatoire dans les chromosomes ?**

En plus d'une gestion différente de l'ADN dans les divers organismes les gènes semblent répartis plus au moins au hasard dans le génomes

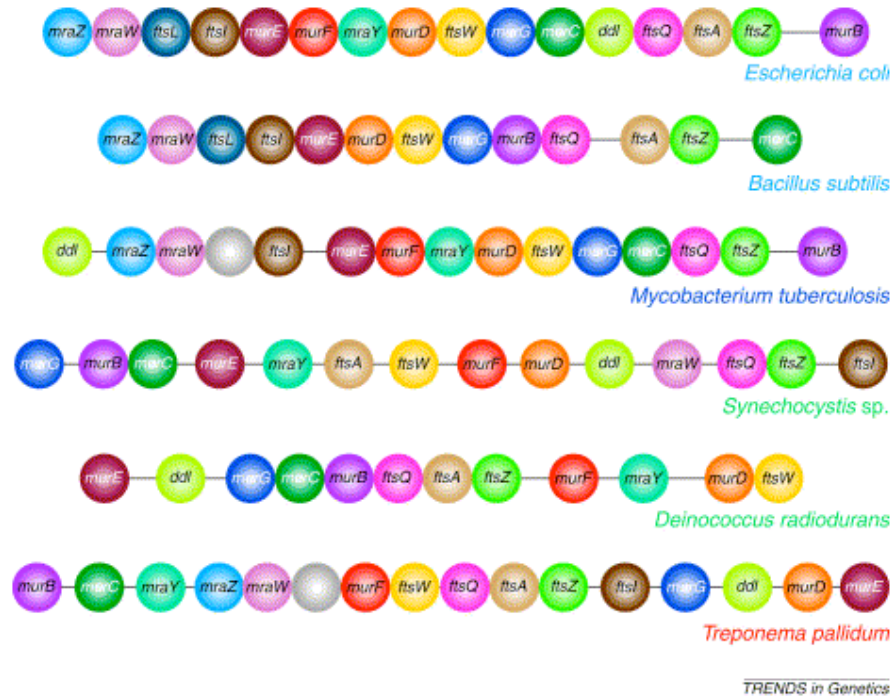
Pourtant, des groupes de gènes comme les **opérons** ou les **îlots de pathogénicité** se regroupent, et codent des protéines dont les fonctions sont reliées

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

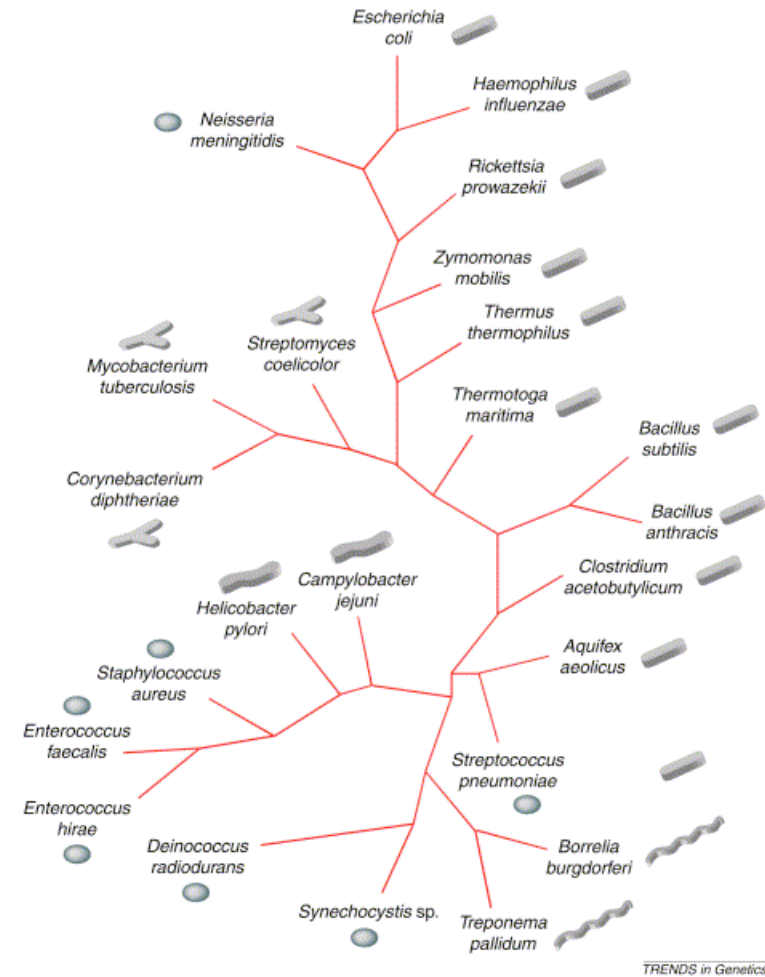
# Ordre des gènes et forme de la cellule

## Les îlots *mur-fts*



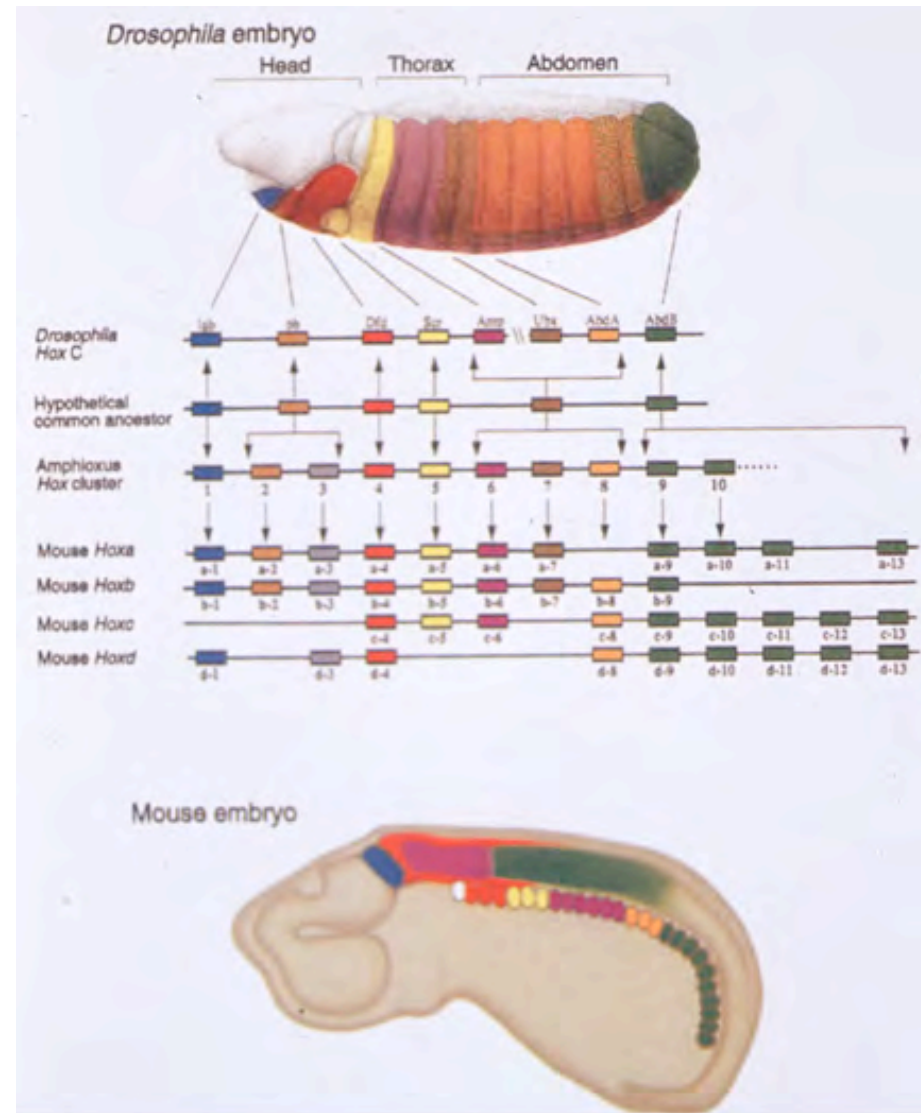
Tamames J, Gonzalez-Moreno M, Mingorance J, Valencia A, Vicente M

Bringing gene order into bacterial shape  
 Trends in Genetics (2001) 17: 124-126



# Les homéogènes

Drosophiloculus,  
Homunculus?  
Celluloculus?



From Carroll, S. B. (1995) Nature 376, 479

# À la recherche des fonctions ubiquistes

Variation / Sélection / Amplification

↪ Stabilisation ↻

Évolution



*crée (l'information apparaît ici)*

Fonction



*capture ("recrute")*

Structure



*code*

Séquence

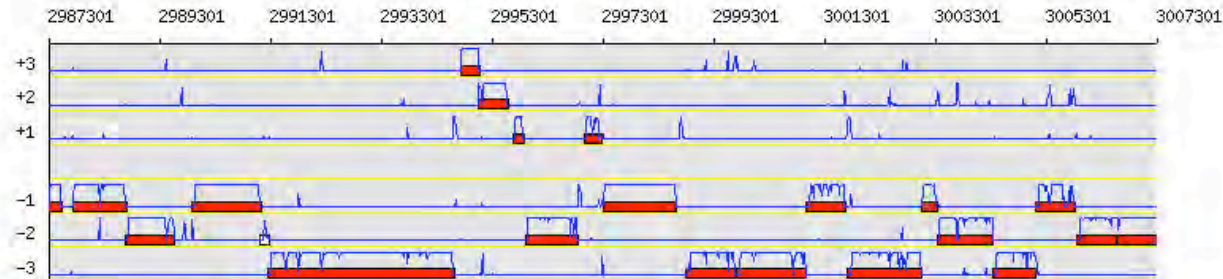
**L'ubiquité fonctionnelle n'implique pas l'ubiquité structurale  
Mais il est possible de comparer les programmes génétiques**



# La pierre de Rosette de la génomique comparative



## Bacillus subtilis 168 chromosome BSU 843 2987301 -- 3007301 ( sequence length : 4215606 bases )



### ▼ Synteny results



**C. Médigue**

# De l'ubiquité fonctionnelle à la persistance des gènes

L'ubiquité fonctionnelle n'implique pas l'ubiquité des gènes  
Mais les objets efficaces tendent à persister (et à persister **ensemble**) au cours des générations :

➔ Rechercher la « persistance » permet d'identifier la plupart des fonctions ubiquistes

➔ « Ubiquiste » est-il un synonyme d'« essentiel »?

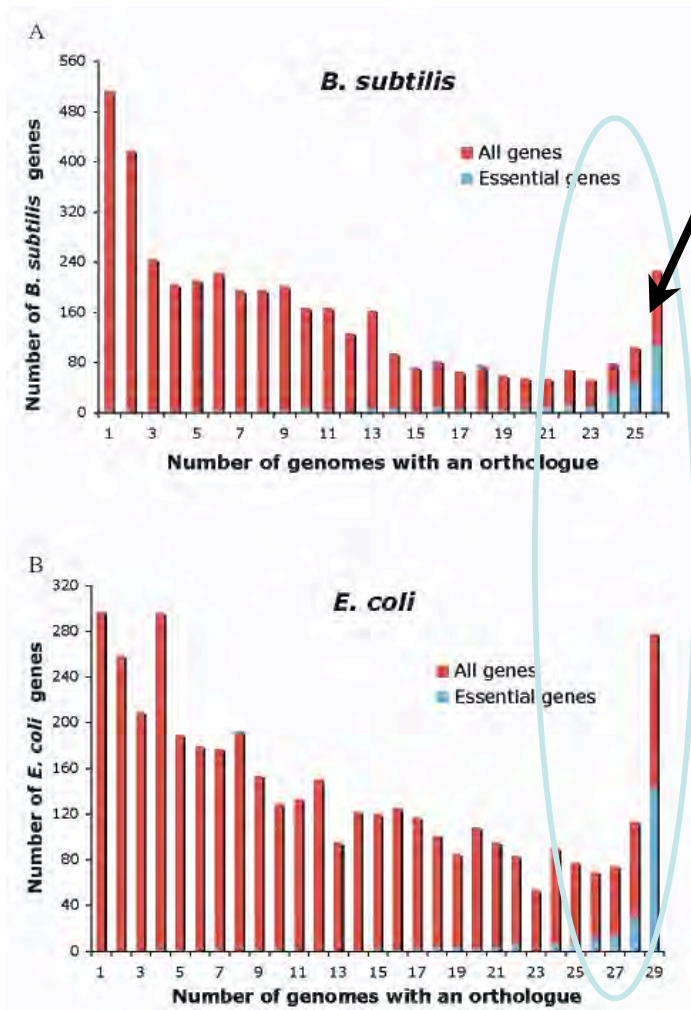
Les gènes « essentiels en laboratoire » sont situés dans le brin direct de l'ADN

~ 500 gènes persistent dans les génomes bactériens ; ils sont impliqués non seulement dans les trois processus nécessaires à la vie, mais aussi dans la **maintenance** et l'**adaptation** aux **phénomènes transitoires**

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Persistence : des gènes en trop !



Gènes persistants

Gènes essentiels et ....

Stress, maintenance et réparation

Dégradation utilisant de l'énergie

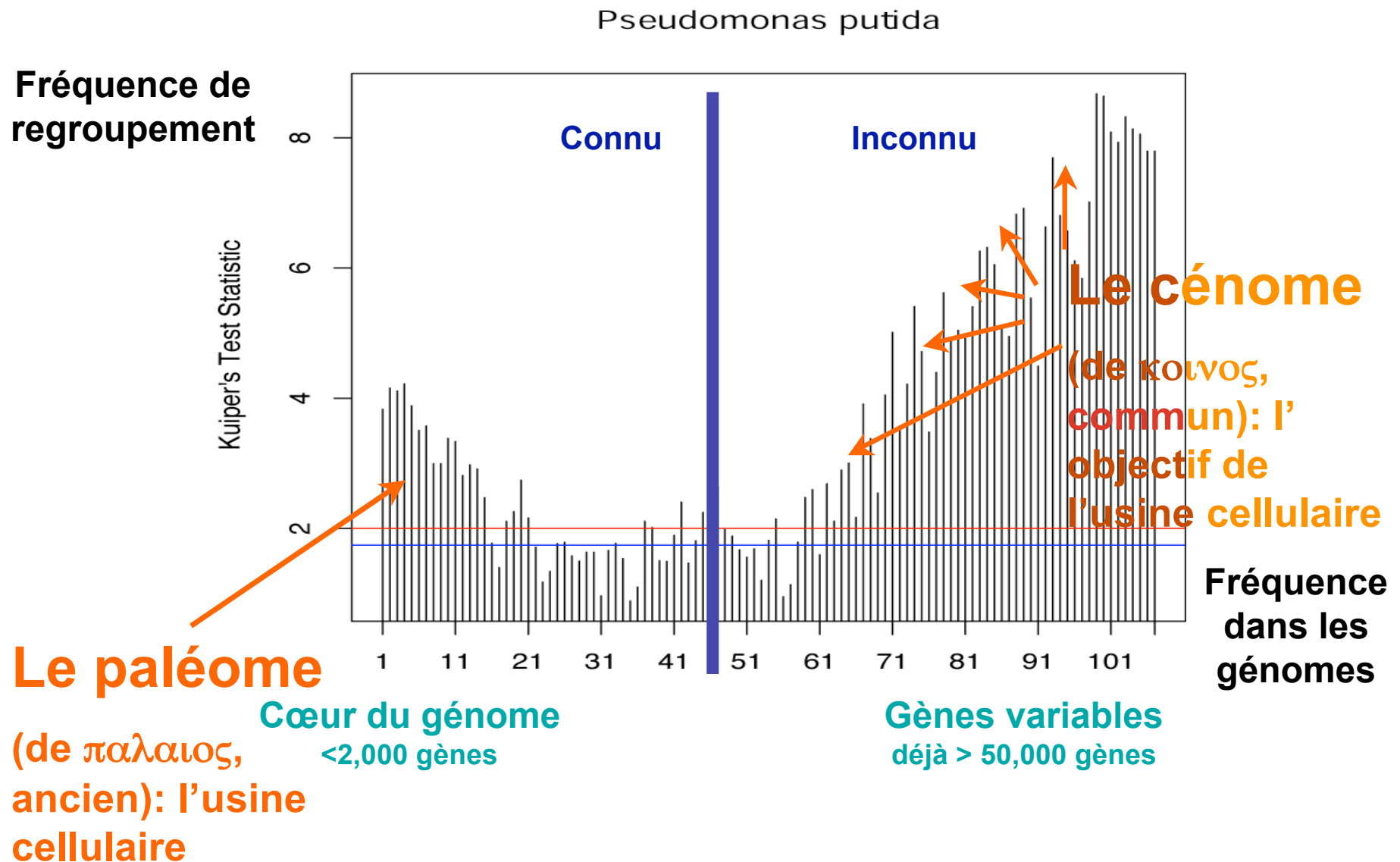
Rustines métaboliques (effet sérine)

G Fang, EPC Rocha, A Danchin  
How essential are non-essential genes?  
Mol Biol Evol (2005) 22: 2147-2156

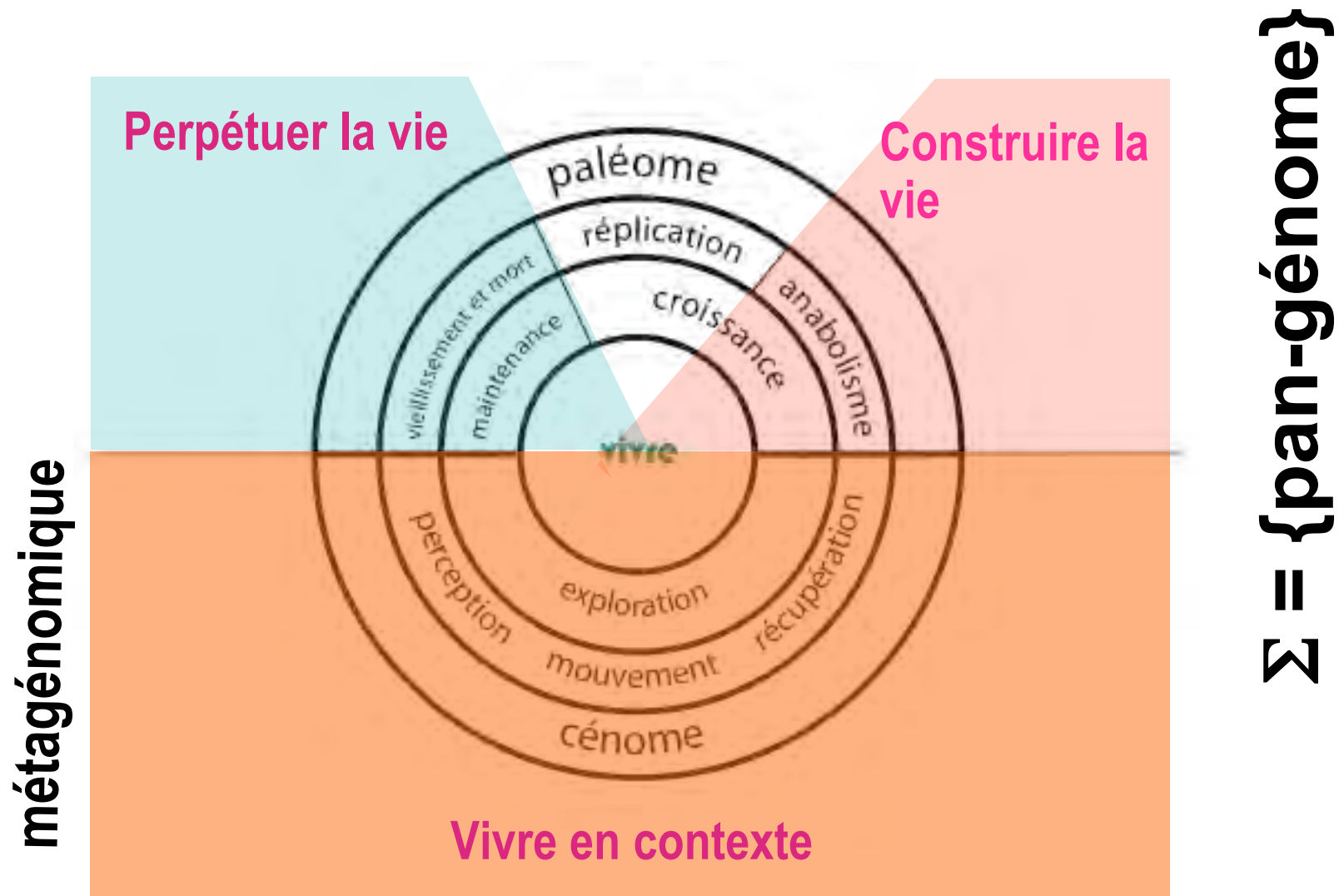
**“Les organismes vivants comme pièges à information”**

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Organisation des génomes bactériens



# Histoire de deux génomes



Organised Genome Dynamics in the *Escherichia coli* Species Results in Highly Diverse Adaptive Paths  
Touchon M, Hoede C, Tenailon O, Barbe V, ..., Médigue C, Rocha EP, Denamur E.  
PLoS Genet. 2009 Jan;5:e1000344

# Le paléome et le cénome

## → La structure du paléome

→ Fonctions essentielles ; évolution de la machinerie de l'expression des gènes

→ Dégradation utilisant de l'énergie

→ Métabolisme du soufre (anabolisme, récupération, catabolisme)

→ « Frustration » chimique ( « rustines » métaboliques)

→ Le cénome : occupation d'une niche écologique

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Un ordinateur qui ferait des ordinateurs ?

**Mais voici la situation dans la réalité ...**

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

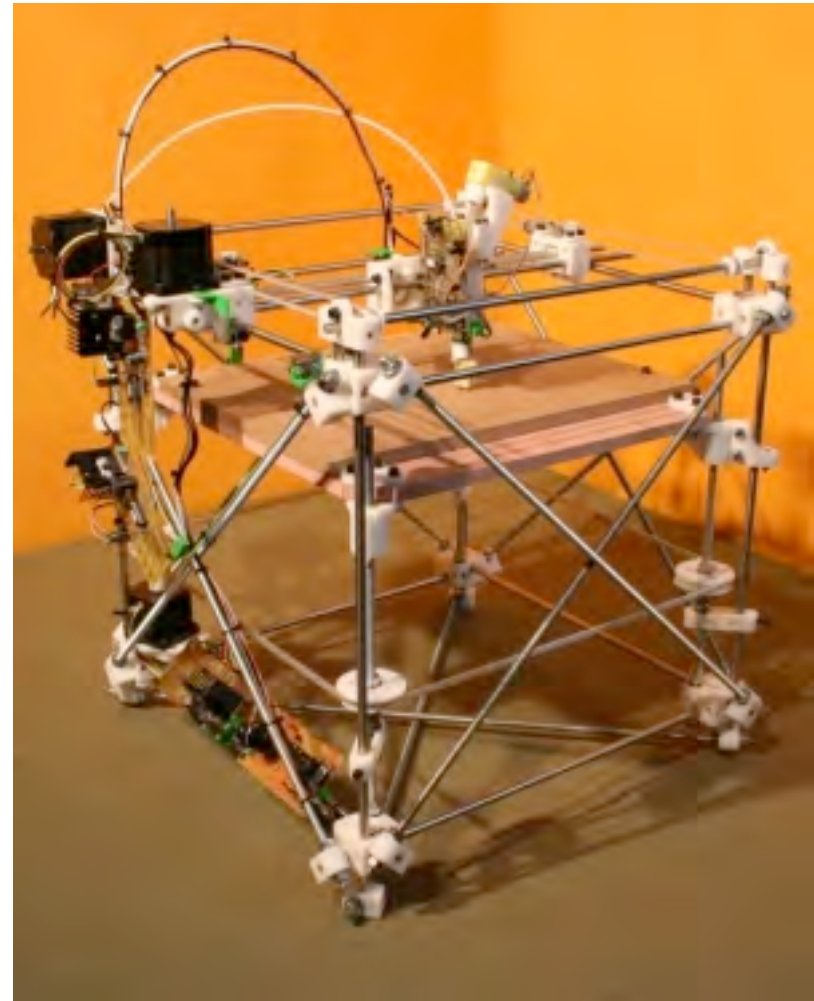
<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Une imprimante 3D auto-reproductrice

**Le projet RepRap (Replicating Rapid-prototyper, 2004 <http://reprap.org/>) vise à créer une imprimante laser 3D auto-reproductrice :**

- **La machine produit la plupart de ses composants (= “biobriques”)**
- **Ce qui manque :**
  - **Le programme**
  - **La ligne d’assemblage** (gestion de l’espace et du temps - séquence des événements, et fonctions spécifiques comme la lubrification)

**Comment qualifier ce manque ?**



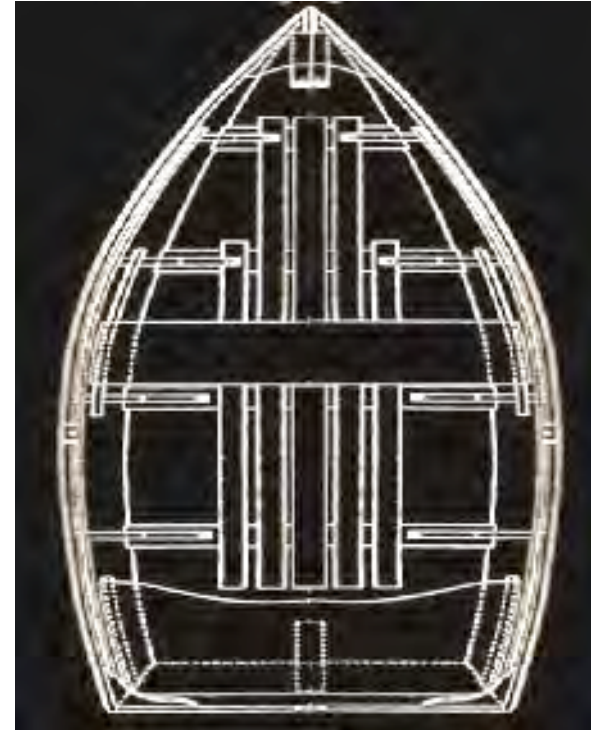
***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>



# La barque de Delphes

- La biologie est une science des relations entre objets
- Elle est **symplectique** (de συν ensemble, πλεκτειν, tisser), le même mot que « complexe » en Latin; utilisé ici pour éviter les connotations malheureuses associées au mot « complexité » ; une connotation avec la Géométrie n'aura pas d'inconvénient...
- C'est une information qui exprime ce qui est conservé dans la barque et non la matière de ses planches !



A. Danchin      The Delphic Boat, Harvard University Press, 2003  
La barque de Delphes, Odile Jacob, 1998

V. de Lorenzo, A. Danchin Synthetic Biology: discovering new worlds and new words 9: 822-827. EMBO Reports, 2008

**“Les organismes vivants comme pièges à information”**

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Au delà des catégories usuelles

*Dans l'histoire, la physique fondamentale s'est occupée de découvrir les particules fondamentales de la nature et les équations qui décrivent leurs mouvements et leurs interactions. Il apparaît désormais qu'un programme différent peut avoir une importance équivalente : découvrir les modes que la nature prend pour moduler et prévenir l'expression et la manipulation de l'information plutôt que s'occuper du mouvement des particules*

**Andrew Steane (1998) Université d'Oxford**

*Des systèmes génétiques reconstruits ont été utilisés pour manipuler l'information, construire des matériaux, retraiter des produits chimiques, produire de l'énergie, produire de la nourriture, et aider à conserver et améliorer la santé humaine et notre environnement*

**Drew Endy (2005) MIT**

**“Les organismes vivants comme pièges à information”**

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Explorer l'information : l'infotaxie



Grand Paon de Nuit  
*Saturnia pyri*  
<http://pdubois.free.fr/>

Comment un papillon peut-il trouver un partenaire 1 000 mètres plus loin ?

Remonter un gradient chimique est impossible à une telle distance (turbulence de l'air, obstacles...)

Vergassola et collègues ont montré que maximiser la collecte d'**information** permet d'atteindre cet objectif...

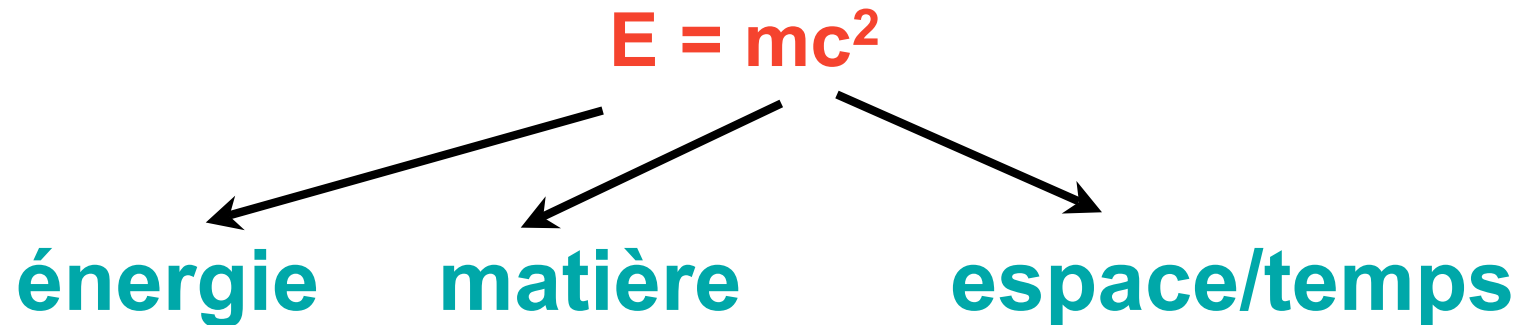
'Infotaxis' as a strategy for searching without gradients

Vergassola M, Villermaux E, Shraiman BI  
*Nature* (2007) **445**: 406-409



# L'information, une cinquième catégorie de la nature ?

## Physique classique



## Physique Quantique

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$$

indétermination = manque d'**information**

*"Les organismes vivants comme pièges à information"*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Nouvelle heuristique

## Matière / Énergie / Espace / Temps

- Physique Classique
- Physique Quantique
- Chimie
- Biologie
  - Développement
  - Neurobiologie
  - Linguistique
- Mathématique (Informatique)

Information



***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Différents niveaux de l'information

- Ce qui est vu par la réplication : aucune « signification », information de Shannon
- Ce qui est vu par la machinerie de l'expression des gènes et par l'évolution
  - **Complexité algorithmique (espace)**
  - **Profondeur logique (temps)**
  - **(Profondeur critique) (compaction)**

Danchin, A. 1996. On genomes and cosmologies. In *Integrative Approaches to Molecular Biology* (eds. J. Collado-Vides B. Magasanik, and T. Smith), pp. 91-111. The MIT Press, Cambridge (USA)

**“Les organismes vivants comme pièges à information”**

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Ce que voit la réplication

**Au cours de la réplication la séquence de l'ADN est recopiée exactement. La copie ne se soucie nullement de la signification de la séquence**

**L'enveloppe génétique (la collection des séquences recopiées) peut être étudiée à un premier niveau de l'information qui lui correspond. Typiquement on utilise à ce stade l'« information » ou « entropie » de Shannon**

# L'entropie de Shannon

L'information d'une collection de messages communiqués au travers d'un canal bruité :

$$H(p_i) = - \sum \{p_i \log_2 p_i \mid i \in I\}$$

Notons que cette formule est si générale que de nombreux modèles d'autres phénomènes que la communication de suite de symboles peuvent être représentés de la même manière. Une comparaison montre le **danger des extrapolations** : la sphère est caractéristique des étoiles, des oranges, et des bulles de savon...

Notons aussi que la **validité** de cette formule repose sur des hypothèses très fortes sur la nature des signaux en cause (en particulier ils doivent satisfaire aux lois des probabilité de Laplace-Gauss)

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*  
<http://www.normalesup.org/~adanchin>



# Complexité algorithmique

- Kolmogorov et d'autres ont proposé de définir un autre niveau d'information par la **longueur du plus petit programme définissant exactement une suite de symboles** : la complexité algorithmique. Cela permet de définir le hasard : **ce qui est aléatoire est non-compressible**
- Cette définition ne permet pas, connaissant une séquence de symbole, d'en connaître la complexité... Mais cela nous fournit un **programme de recherche** : afin d'approcher la complexité algorithmique d'une séquence, on s'intéresse à la façon dont elle a été engendrée (au cours de l'évolution, au cours des synthèses, etc)

# Procaryotes et eucaryotes

→ **Procaryotes** : une seule enveloppe, plus ou moins compliquée, génome superficiellement « aléatoire » ; superposition des signaux (combinatoire pour l'interaction avec des protéines impossible)

→ **Eucaryotes** : multiplication des membranes et des peaux ; génome riche en répétitions, juxtaposition des signaux (riche combinatoire des protéines qui contrôlent la transcription)

Dans les deux cas cela semble inintéressant ; n'est-ce pas la marque d'une faille dans notre description ?

# Le contexte : “valeur” d’une information

**La complexité algorithmique est insuffisante. Elle ne suffit nullement à définir le hasard. Tout dépend du **contexte**. Une séquence quelconque doit se trouver quelque part dans le développement des décimales de  $\pi$  : si l’on sait en donner la position, alors la complexité algorithmique de la séquence diminue !**

**De même, les répétitions ont un sens, une valeur :**

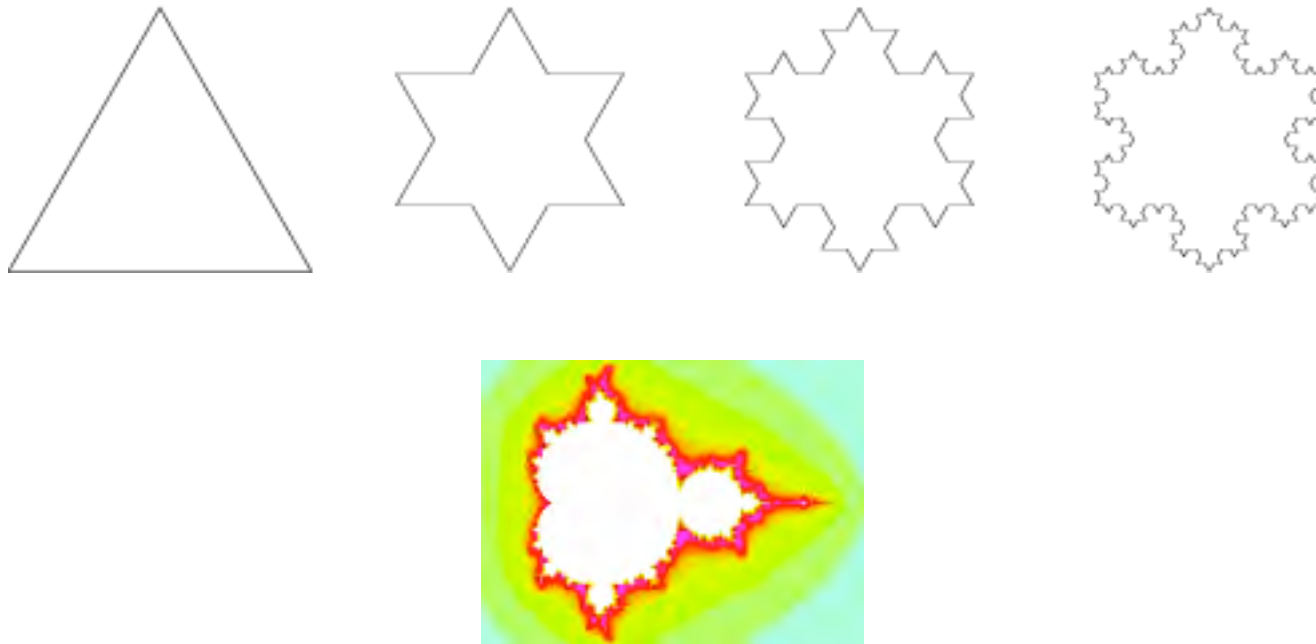
**Les poules du couvent couvent**

Pour un ordinateur, un locuteur français, un locuteur non-francophone ?

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*  
<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# La profondeur logique

Un programme très court (**faible complexité algorithmique**) peut décrire une simple séquence répétée, mais aussi une figure fractale comme le flocon de Koch ou l'ensemble de Mandelbrot



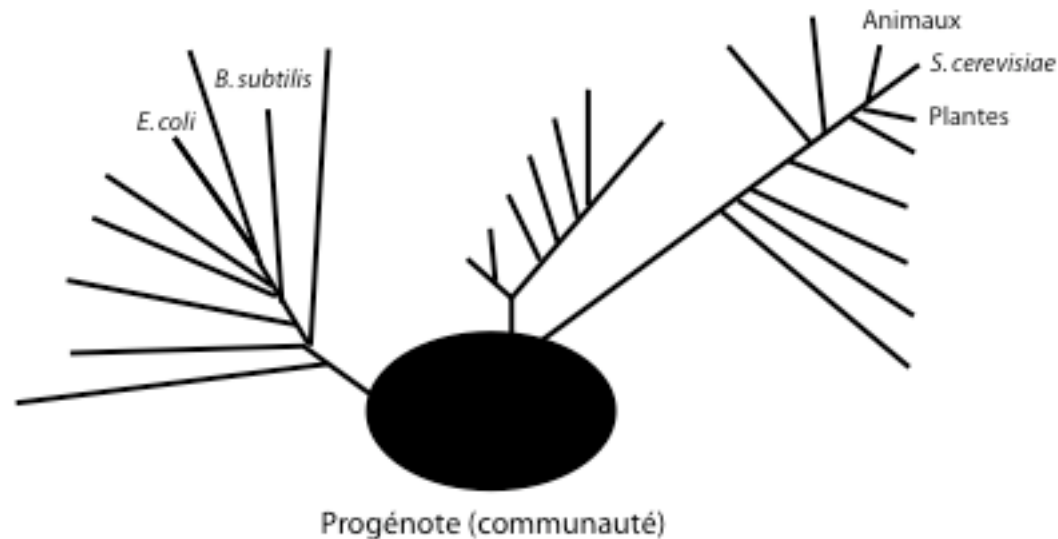
*“Les organismes vivants comme pièges à information”*  
<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Vision phylogénétique du monde vivant

**Bactéries**

**Archées**

**Eucaryotes**



Tout organisme est le fruit d'une longue évolution, la profondeur logique implique qu'il n'y a pas d'ADN « poubelle » (« junk » DNA)

L'origine des fonctions est floue, elle distingue la machine du programme : ne soyons pas « adamistes » !

# Origines de la vie

- Le physicien Freeman Dyson a montré qu'il ne peut y avoir une seule origine de la vie
- La **réplication** conduit presque inmanquablement à une avalanche d'erreurs (sauf en cas d'échanges avec l'extérieur qui permettent de revenir en arrière)
- La **reproduction**, qui concerne des relations entre objets, peut s'améliorer au cours du temps
- **La reproduction a donc dû précéder la réplication.** Elle est le fruit d'un métabolisme originel

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Les bébés naissent très jeunes !

- **La machine se reproduit**
  - La reproduction peut s'améliorer au cours du temps : c'est toujours un organisme âgé qui donne naissance à un jeune (cela implique création d'information)
- **Le programme se réplique**
  - La réplication accumule progressivement des erreurs

Quels gènes permettent l'accumulation d'information ?

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Revisiter ce qu'est l'information

On peut concevoir que le métabolisme s'améliore progressivement car la **création d'information est réversible** (Landauer, 1961; Bennett, 1982, 1988); accumuler l'information requiert un processus **dépendant de l'énergie pour "faire de la place"**

**Question ouverte** : "faire de la place" est nécessaire pour accumuler l'information ; comment est-ce réalisé ? Pouvons-nous identifier dans les génomes les gènes codant les fonctions pour mettre en œuvre ce processus ? Pouvons-nous trouver une source ubiquiste et stable d'énergie ?

***"Les organismes vivants comme pièges à information"***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>



# Valeur de l'information

Dans les modèles classiques de l'information on ne se soucie pas de la signification, ou de la **valeur** de l'information

L'information du programme est transmise telle quelle par la réplication, sans valeur, mais d'où vient donc l'information de la Machine ? L'idée sous-jacente est qu'il faut entièrement reconsidérer le concept dès qu'on a affaire à des objets individualisés : peut-on **imaginer les gènes d'un Démon de Maxwell** qui ferait le tri entre ce qui est fonctionnel (localement) et ce qui ne l'est pas ?

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Un paléome diversifié

- **Paléome 1 (gènes essentiels)**
  - **Constructeur**: l'ADN spécifie les protéines qui forment la machine qui construit la cellule (reproduction)
  - **Répliqueur**: l'ADN spécifie les protéines qui répliquent l'ADN (réplication)
- **Paléome 2 (gènes persistants non-essentiels)**
  - Pérennisation de la vie, **dégradation dépendant de l'énergie**
  - Rustines métaboliques (« frustration » chimique)

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Les gènes du démon de Maxwell

- Les processus dégradatifs dépendant de l'énergie font de la place pour des entités nouvellement synthétisées ; de l'énergie est consommée pour **prévenir** la dégradation des entités fonctionnelles
- Ce processus accumule de l'information, quelle que soit son origine, par effet de cliquet
- Comme ce processus est ubiquiste, on attend que les fonctions correspondantes soient codées dans le paléome, y compris la gestion des sources d'énergie postulées ici

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Conjecture : les polyphosphates

- La synthèse et la dégradation des poly-P se retrouve codée dans les gènes non-essentiels persistants ; ce processus est encore peu connu et associé à la dégradation de l'ARN
- Le poly-P est un **minéral**, donc extrêmement stable; il est présent de façon ubiquiste dans les cellules
- Les NTPs peuvent être régénérés à partir des NMP et de poly-P; la protéase Lon peut utiliser le poly-P au lieu d'ATP; le NADP (anabolisme) peut être engendré à partir de NAD et de poly-P...

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Mutations adaptatives

## Construction de bactéries "intelligentes"

Mises en croissance sur un milieu limitant en éléments nutritifs. Forment des colonies de  $10^8$  bactéries environ. Le milieu contient aussi des nutriments qu'elles ne savent pas utiliser

Au bout de quelques semaines apparaissent des papilles qui se mettent à croître et qui utilisent les éléments ajoutés. Ce sont des **mutations adaptatives**

Elles ne préexistaient pas et supposent donc la **création d'information**



***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Mutations adaptatives et CVNC

- ⇒ **Prédiction** : les mutations adaptatives sont des créations *de novo* d'information ; elles dépendent donc des gènes impliqués dans l'accumulation d'information
- ⇒ Le statut des « cellules viables mais non cultivables » est prédit par le modèle (manque de potentiel régénératif)
- ⇒ L'accumulation d'information dépendant de l'énergie est **aveugle** ; elle ignore d'où l'information proviendra
- ⇒ L'information peut provenir d'une mémoire ; elle peut aussi être créée *de novo*

***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Prédictions diverses

→ La persistance bactérienne dans un hôte dépend de gènes persistants non-essentiels

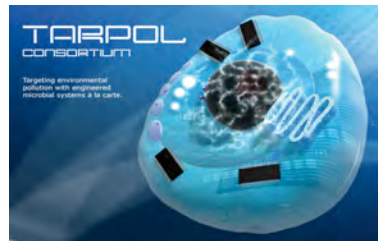
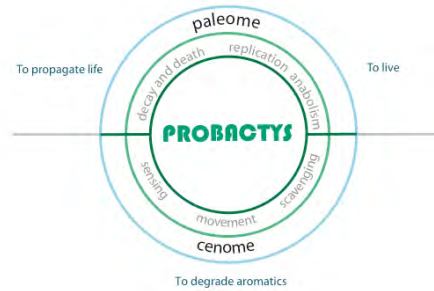
→ L'initiation du cancer provient de cellules (souches) qui ont découvert des mutations adaptives leur permettant de créer une descendance immortelle

→ L'accumulation d'information dans le cerveau (mémoire et apprentissage) implique des processus pour faire de la place tout en préservant les connexions fonctionnelles, d'une façon qui doit dépendre de l'énergie

*“Les organismes vivants comme pièges à information”*

<http://www.normalesup.org/~adanchin>

# Financement



FONDATION  
SCIENTIFIQUE  
FOURMENTIN-GUILBERT



POUR LE RAYONNEMENT DE LA BIOLOGIE



***“Les organismes vivants comme pièges à information”***

<http://www.normalesup.org/~adanchin>