

# 2 Les succès du hasard pris sur le vif

Voir le hasard à l'œuvre lorsqu'il invente du vivant : voici ce que permettent depuis peu des programmes informatiques parés pour l'aléatoire. Un exploit qui livre de nouvelles données sur la vie.

Becs, ailes, écailles, carapaces, mains, yeux à facettes... Les inventions de la nature composent une symphonie dont les biologistes ont cherché la partition... pour découvrir que la diversité exubérante du vivant était le fruit d'un improvisateur génial : le hasard (voir p. 48). Un improvisateur dont certaines des compositions ont disparu à jamais – les êtres vivants mal adaptés à leur milieu finissent par ne pas laisser de descendance – tandis que d'autres ont eu du succès – les espèces disposant d'attributs leur permettant de régner sur leur milieu se perpétuent.

Troublante et frustrante découverte : comment faire la part des "bonnes" et des "mauvaises" improvisations d'un récital commencé il y a plus de trois

d'un squelette... Ils tâchaient de reconstituer à rebours les différentes étapes du vivant en remontant patiemment le fil du temps. Mais des pièces manquaient au puzzle... Les biologistes rêvaient alors de pouvoir raconter la même histoire, en commençant cette fois par le début. De suivre la carrière évolutive d'un être vivant depuis son apparition sur Terre, d'assister en direct à ses mutations, ses impasses... Bref, d'avoir enfin sous les yeux le hasard à l'œuvre.

Un rêve ? Plus maintenant ! Car désormais, les biologistes ont les moyens de recréer *a priori* les instants où le hasard invente des compositions qui prennent place dans la symphonie du vivant. Comment ? En s'associant à des informaticiens s'improvisant compositeurs de l'aléatoire, à l'aide de programmes informatiques très particuliers, capables de produire des résultats parfaitement... imprévisibles ! Le principe de ces programmes est simple : ils associent un environnement virtuel à des êtres virtuels, dotés

**Avec l'informatique, c'est l'évolution du vivant qui se dévoile enfin en direct !**

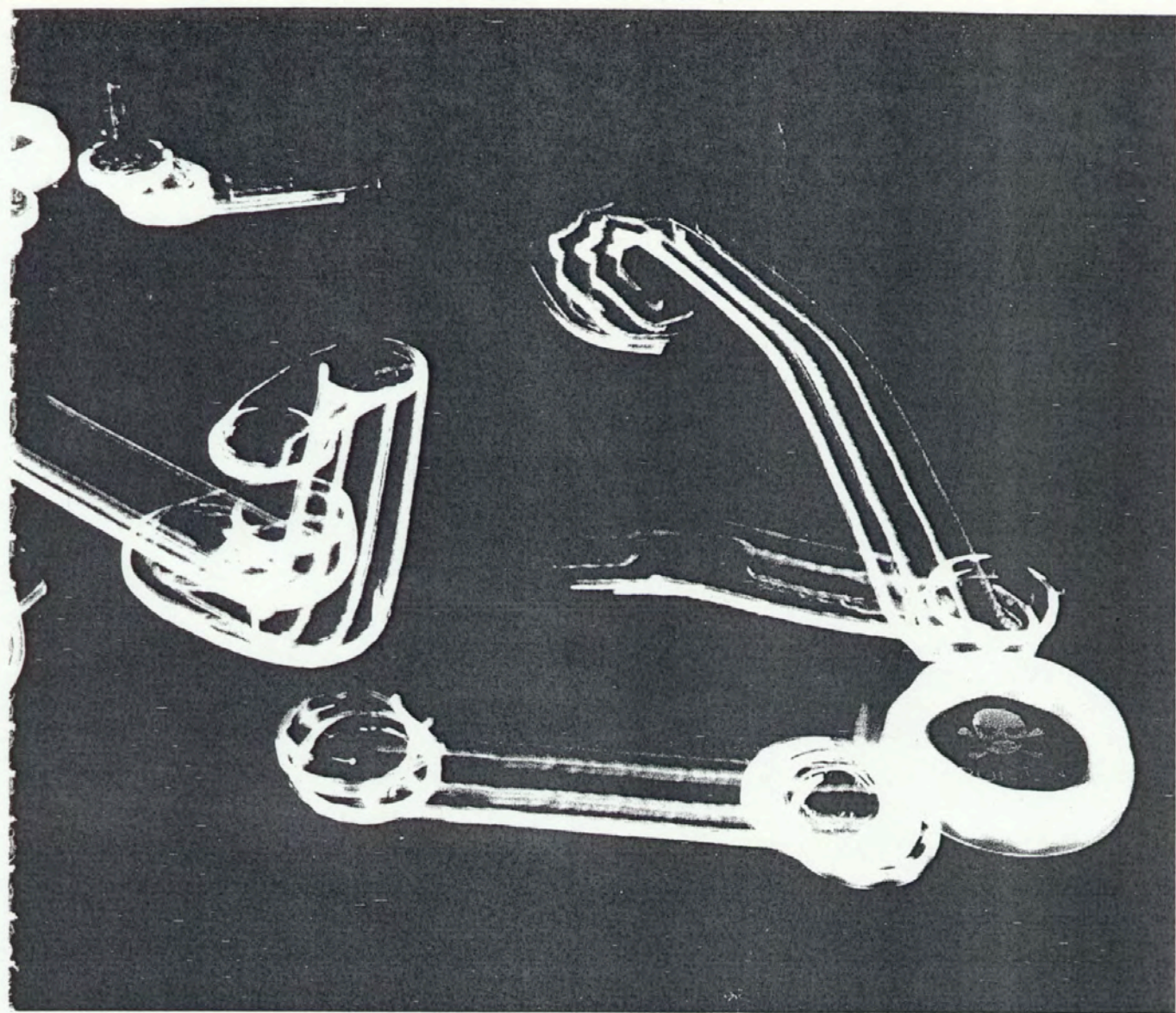
milliards d'années ? Pour le savoir, les biologistes n'avaient, jusqu'à très récemment, d'autre choix que de traquer l'inventivité du hasard *a posteriori*, c'est-à-dire une fois l'œuvre accomplie : à partir de l'analyse de roches hébergeant des fossiles, de protéines produites par des bactéries, de la forme

de gènes et de fonctions physiologiques analogues à ceux observés chez certains organismes simples : se déplacer, se nourrir, envoyer un signal aux autres, se reproduire. À partir de ces conditions basiques, ces êtres virtuels vivent et meurent, sur des milliers de générations, et leur vie est soumise à l'arbi-

Actuellement en cours, une expérience montre que des robots évoluant aléatoirement se sont mis à communiquer entre eux.

trage du hasard : dans les simulations, l'abondance de nourriture et le patrimoine génétique de chaque génération d'individus virtuels sont laissés au soin du hasard, grâce à de complexes algorithmes qui leur attribuent des valeurs de manière parfaitement aléatoire. Aucun risque, dès lors, que le résultat de la simulation ne soit que le résultat des paramètres qu'on y entre : le hasard joue bien son rôle de moteur. "Il suffit d'imaginer l'ADN comme une suite de bits, des 0 et des 1," explique Carole Knibbe, membre d'un projet de simulation sur la structuration des génomes, à l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Lyon (voir info-





graphie p. 56). Chaque individu possède sa propre séquence de bits. Et quand on veut le faire se reproduire, on duplique cette séquence, en introduisant aléatoirement des modifications. Au lieu de 011, on obtient par exemple 010, ce qui simule ainsi les mutations qui se produisent chez le vivant.”

#### MILLE POPULATIONS VIRTUELLES

À l'issue des simulations, tout reste enregistré sur le disque dur de l'ordinateur, ce qui permet de comparer des scénarios, d'effectuer des “arrêts sur image” au cours de l'évolution. Ce que constatent les chercheurs, lorsqu'ils se penchent sur les données en-

registrées pour chaque individu à l'issue d'un enchaînement effréné de générations? Souvent... rien. Que les populations aient prospéré ou se soient éteintes, les enregistrements ne permettent pas d'établir une relation mathématique – une corrélation – entre les valeurs des paramètres du modèle (taux de mutation, taille de la population) et les caractéristiques des organismes apparus au cours de l'évolution (état du génome, efficacité d'une fonction physiologique, etc.). Oui, mais il arrive que les chercheurs détectent de telles corrélations. Par exemple, l'efficacité particulière d'un groupe d'individus à se nourrir dans une situation

donnée peut s'avérer dépendre de l'apparition d'une mutation particulière de leurs gènes, à partir d'un certain nombre de générations. Pour les chercheurs, de telles trouvailles sont des instants magiques: car c'est le hasard des mutations qui fait apparaître ces corrélations, totalement imprévisibles!

Or, rappelons-le, biologistes et informaticiens n'ont aucune idée *a priori* de ce que vont produire leurs modèles aléatoires... Ce qui, avant de vérifier si ces observations ont leur équivalent dans le monde naturel, les pousse dans un premier temps à voir si, en modifiant par exemple les conditions initiales de l'environnement (plus →

→ ou moins de nourriture disponible) ou le taux de mutation des gènes, la même relation apparaît. Ils lancent pour cela en parallèle les exécutions de plusieurs programmes d'évolution artificielle. Ainsi, c'est dix, cent, voire mille populations distinctes qui vont se mettre à vivre artificiellement sous leurs yeux, avec des paramètres différents pour chaque simulation. Cette efficacité particulière d'un groupe d'individus à se nourrir va-t-elle continuer à se manifester si leurs gènes subissent un taux de mutation plus fort? La mutation ayant conduit à l'apparition d'une nouvelle fonction physiologique va-t-elle se diffuser largement dans certaines simulations, ou bien disparaître et faire mourir les individus dans d'autres simulations? Autant de questions cruciales qui laissent jusqu'ici les biologistes sans certitude, mais que l'informatique leur permet désormais d'appréhender efficacement, sans se soucier du temps qui passe.

### LE TEMPS N'EST PLUS UNE LIMITE

Pour Guillaume Beslon, responsable du projet de l'Insa et membre de l'Institut rhône-alpin des systèmes complexes, c'est un atout incroyable: "Avec les simulations, nous pouvons décortiquer finement tous les événements qui se produisent au cours de l'évolution pour repérer, par exemple, à quel moment et dans quel contexte une fonction biologique a été acquise ou perdue par un individu. La simulation permet ainsi de chercher des invariants et de les expliquer". Un enthousiasme que partage Laurent Duret, chercheur en biologie moléculaire à l'université Lyon 1: "Cela permet de faire des expériences sur des millions de générations, ce que l'on ne peut évidemment pas faire en labo puisque même la bactérie, qui est un organisme qui se reproduit très vite, a besoin de vingt minutes pour donner naissance à une nouvelle génération.

## Quand le hasard organise la

En 2006, une équipe de l'Insa de Lyon met au point un programme pour évaluer l'influence du hasard sur le génome des organismes. Le principe: 1000 bactéries virtuelles sont dotées d'un génome, constitué d'une séquence aléatoire de 5000 bases, formant un seul gène, le reste formant le "non codant". D'une génération

à l'autre, le génome de chaque bactérie est susceptible de subir des mutations. Le taux de mutation est fixe, mais les mutations interviennent au hasard (si le taux est de 1/10000, il y a une chance sur 10000 que le génome gagne une nouvelle base, qu'une base existante change de valeur, ou qu'elle disparaisse). L'ex-

perience est menée sur plusieurs colonies de bactéries, avec des taux de mutation différents. Résultat? Après 20000 générations, la structure des génomes, qui a évolué au hasard, présente une organisation singulière. Quand le taux de mutation est élevé, la taille du génome diminue, part "non codante" comprise

Des bactéries virtuelles sont créées. Mille bactéries virtuelles identiques sont créées. Leur génome est simulé par une séquence de 0 et de 1. Seul un groupe de 70 de ces chiffres forme un gène utile à l'organisme. Le reste est de l'ADN vierge non codant.

ADN non codant

Filtre sélectif

Chromosome numérique, composé de 5000 bits (suite de 0 et de 1)

Gène 1

SÉLECTION

Bactéries virtuelles

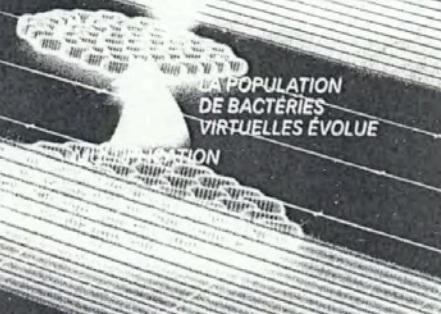
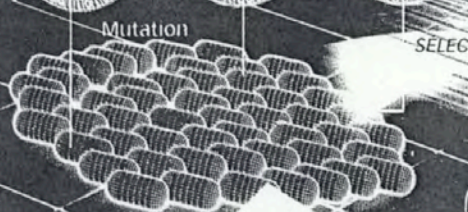
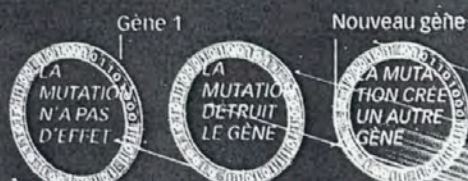
On peut explorer des phénomènes d'évolution sur une échelle de temps phénoménale. Ces travaux vont faire apparaître des nouvelles sources d'explications et des propriétés auxquelles nous n'avons jamais pensé jusqu'ici, et nous allons progresser dans la compréhension du vivant et du hasard."

Reste la difficulté majeure: s'assurer que les modèles utilisés, aussi imprévisibles qu'ils soient – ce qui est le pro-

pre de la vie – ressemblent véritablement à leurs analogues biologiques réels. Pour ce faire, les biologistes tiennent compte de certaines règles observées dans la nature. Exemple: un individu X dont les dispositions physiologiques virtuelles le rendent plus efficace qu'un individu Y pour tirer profit de son environnement virtuel est programmé pour avoir en moyenne plus de descendants que l'individu Y.

# structure du génome

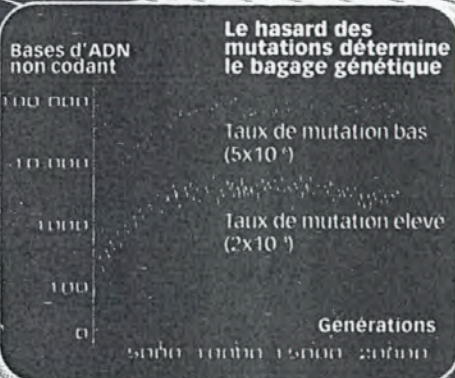
A l'inverse, quand le taux de mutation est faible, la taille du bagage génétique augmente. Dans ces deux situations, le génome des bactéries réagit de manière construite et identifiable, alors que le seul moteur de ces changements est le hasard. Un résultat surprenant : cette hypothèse n'avait jamais été énoncée pour la quantité de génome non codant !



**BACTÉRIE INADAPTÉE :** elle aura 0 descendant.

**BACTÉRIE TRÈS BIEN ADAPTÉE :** elle aura 8 descendants.

**BACTÉRIE ADAPTÉE :** elle aura 4 descendants.



1 Elles subissent l'influence de l'environnement. Les bactéries sont évaluées pour leur capacité à tirer partie de leur environnement. Plus elles ont de gènes efficaces, plus leur capacité à se reproduire est grande. Les plus fortes donneront 8 descendants, les plus faibles 0 descendant.

2 Elles se multiplient et mutent. Les bactéries meurent en laissant la place à leurs descendantes. Pendant cette reproduction, le génome mute selon un taux fixe par les informaticiens. Au fil des mutations, des gènes apparaissent ou disparaissent et le chromosome change de taille.

3 Ce que le hasard produit au final... On observe qu'au bout de 20 000 générations, les bactéries ayant subi le plus faible taux de mutation présentent le plus grand nombre de gènes, mais aussi la plus grosse quantité d'ADN non codant (voir ci-dessus).

Cette règle de la nature étant fixée, c'est ensuite le hasard qui décide : à chaque génération, les gènes virtuels des descendants de tous les individus subiront indifféremment la même quantité de mutations aléatoires. Résultat ? Après des dizaines de générations, les descendants virtuels ont effectivement évolué par rapport à leurs ancêtres, sous l'influence du hasard, de manière assez réaliste pour que les

biologistes en tirent des enseignements pertinents dans le monde réel. Car ça marche ! A l'Insa, les chercheurs de l'équipe de Guillaume Beslon ont constaté que la taille des génomes de groupes d'individus virtuels ayant évolué indépendamment les uns des autres, de manière aléatoire, avait changé de manière semblable. Une surprise de taille pour cette équipe, qui a comparé les génomes virtuels

obtenus par évolution artificielle avec les génomes de vraies bactéries, les organismes réels les plus proches de leurs modèles... et découvert qu'ils avaient des structures similaires. Du jamais vu en biologie "classique" ! Ce n'est pas tout. De l'autre côté de l'Atlantique, une équipe du Caltech (en Californie), dirigée par Christopher Adami, a mis en compétition des individus virtuels, vivant dans un environnement →

→ stable. Et a montré un résultat étonnant: si un individu est mal adapté à un environnement mais qu'il est peu pénalisé quand des mutations génomiques s'attaquent à lui (parce qu'il a par exemple des gènes en double exemplaire), alors il va se montrer plus résistant qu'un autre bien adapté à l'environnement, mais très sensible aux mutations. Un vrai pied de nez à ce qui était posé jusqu'ici comme un dogme chez le vivant: à savoir que les individus les mieux adaptés sont en général les plus aptes à survivre...

### UNE VRAIE LEÇON D'HUMILITÉ

Une équipe, pilotée par Dario Floreano à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), a, quant à elle, travaillé avec des robots virtuels, et mis en évidence qu'ils étaient capables de faire émerger une vraie forme de communication, à l'issue d'un certain nombre de générations ayant évolué... au hasard (voir ci-contre). Devant des résultats aussi bouleversants, impossible de ne pas se poser la question: comment garantir qu'une dose de hasard introduite dans un modèle simpliste sur quelques centaines de milliers de générations rende compte de l'œuvre minutieuse et permanente du hasard qui influence le moindre des mécanismes intimes du vivant, des protéines aux organismes complets? Prudents et lucides, les chercheurs répondent que leurs modèles ne prétendent en rien mimer le réel trait par trait. Comme le rappelle Carole Knibbe: "Quand une similitude apparaît, on n'est jamais certain que le scénario évolutif simulé aura représenté exactement ce qui a pu se produire réellement. On peut juste dire qu'il nous ouvre de nouvelles voies à explorer". Des voies qui apportent en tout cas la preuve que le hasard est bel et bien un moteur de création. Une vraie leçon d'humilité pour l'espèce humaine, à qui le hasard a laissé sa chance! M.V. ■

## Le hasard joue aussi un rôle dans

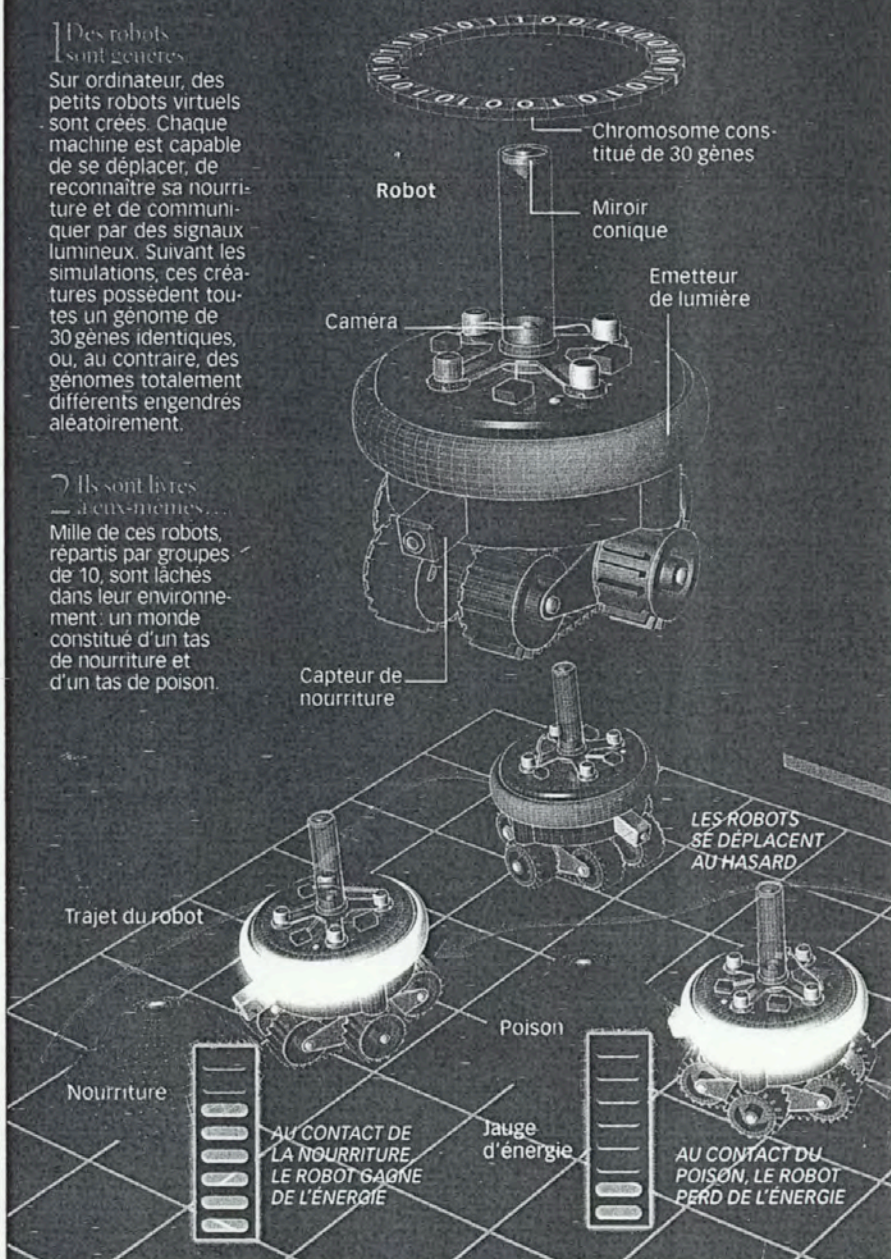
Début 2007, des chercheurs de l'université et de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) simulent des colonies de robots virtuels qu'ils laissent évoluer dans un environnement où se trouvent de la nourriture et du poison. Chaque robot a un genome

virtuel et un réseau de neurones artificiel, lui permettant de distinguer la nourriture du poison, ainsi qu'un système de signalisation lumineuse. Le but de l'expérience? Observer comment ces machines virtuelles se comportent dans quatre situations différentes: soit les robots

de la colonie ont des patrimoines génétiques identiques, soit ils sont tous différents. Soit ils sont sélectionnés en fonction de leur aptitude individuelle à se nourrir, soit en fonction de leur performance de groupe. Ces situations donnent lieu à quatre scénarios d'évolution, con-

Des robots sont créés sur ordinateur, des petits robots virtuels sont créés. Chaque machine est capable de se déplacer, de reconnaître sa nourriture et de communiquer par des signaux lumineux. Suivant les simulations, ces créatures possèdent toutes un genome de 30 gènes identiques, ou, au contraire, des genomes totalement différents engendrés aléatoirement.

Ils sont livrés à eux-mêmes... Mille de ces robots, répartis par groupes de 10, sont lâchés dans leur environnement: un monde constitué d'un tas de nourriture et d'un tas de poison.



# l'émergence de la communication

duits sur des dizaines de génération de robots. Résultat : les robots se mettent tous à communiquer *via* leur système de signalisation lumineuse... mais avec des performances inégales. Les robots apparentés et "altruistes" s'entraident en s'informant sur les endroits où se trouve la nourriture. A

*contrario*, les robots non apparentés et "individualistes" se transmettent de fausses informations : ils s'allument quand ils sont loin de la nourriture et trompent leurs acolytes ! Après 500 générations, les chercheurs ont implémenté ces programmes sur six robots réels, et ont vérifié leurs résultats : la structure

génétique et le mode de sélection jouent effectivement un rôle déterminant dans l'évolution de la communication. Pour la première fois, des chercheurs ont réussi à simuler et à décrypter le comportement d'espèces comme des insectes sociaux, tout en tenant compte de la part aléatoire de leur évolution.

LE PROCESSUS EST RENOUELE 500 FOIS

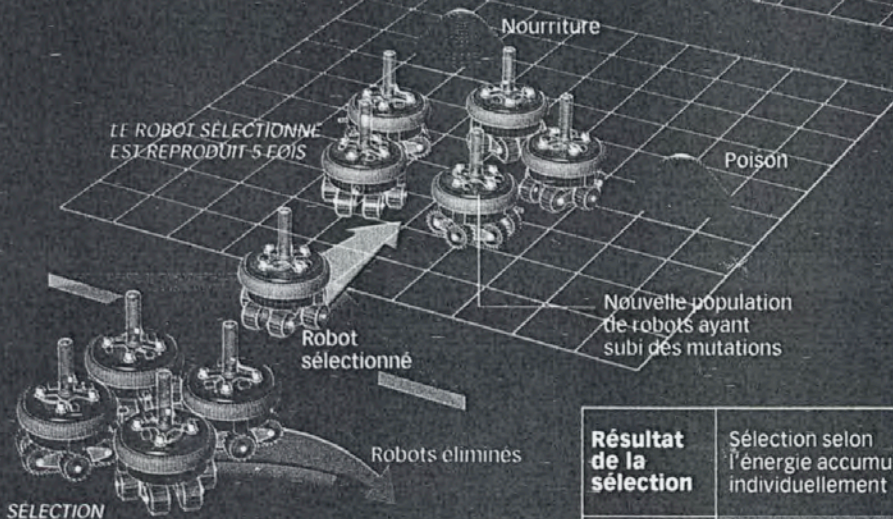
### 3 sélectionnés

Les machines sont notées à la fin de leur vie en fonction de la quantité d'énergie accumulée individuellement ou par chaque groupe de 10. Les 200 robots les plus performants sont sélectionnés.

### 4 puis multipliés

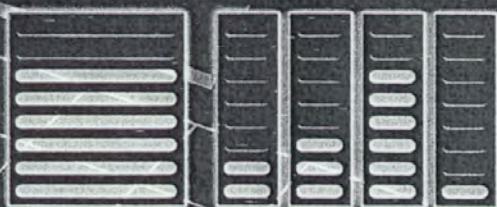
Les 200 élus sont reproduits en 5 exemplaires ; leur génome est légèrement modifié, avec un taux de mutation de 1%. On se retrouve à nouveau avec 1000 individus, replongés dans leur environnement.

LES ROBOTS COOPÈRENT : CELUI QUI A TROUVÉ DE LA NOURRITURE ATTIRE LES AUTRES AVEC SA LUMIÈRE



### 5 Ils évoluent et apprennent à communiquer

Au bout de 500 générations, on observe le comportement des robots. Les machines au génome apparenté et sélectionnées pour leur capacité à se nourrir en groupe développent un mode de communication très efficace, comparable à celui observé chez les fourmis.



Energie accumulée par chaque groupe de dix robots.

Energie accumulée individuellement par chaque robot.

Résultat de la sélection	Sélection selon l'énergie accumulée individuellement	Sélection selon l'énergie accumulée par tout le groupe
Génomes différents	Les robots se transmettent de fausses informations. Certains accumulent beaucoup d'énergie, les autres pas	Communication moyennement efficace : peu d'énergie accumulée
Génomes apparentés	Communication moyennement efficace : peu d'énergie accumulée	Les robots coopèrent les uns avec les autres ; l'énergie se répartit équitablement entre eux