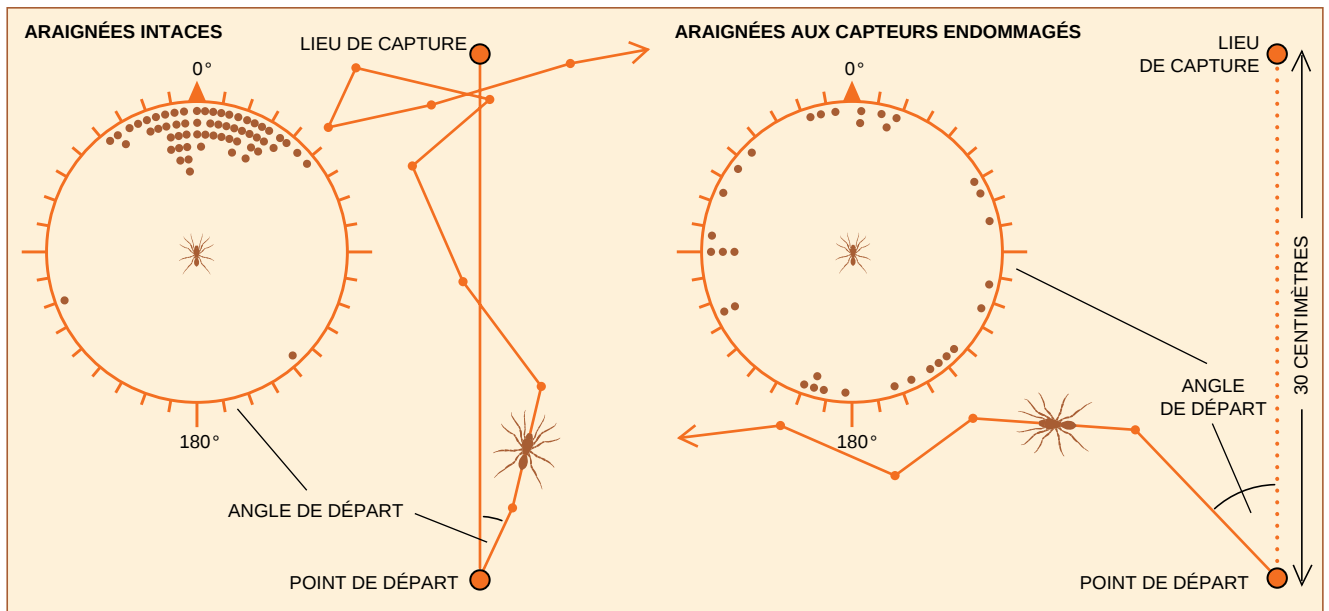




6. L'ARAIGNÉE CUPHENNIUS mémorise ses déplacements grâce à ses organes sensoriels en forme de fentes. Aveuglées, la plupart de ces araignées repartent dans la direction où elles avaient précédemment capturé une mouche (à gauche), même si elles progressent en zigzag. Les

points représentés sur le diagramme circulaire correspondent aux angles de départ. Au contraire, des araignées chez qui ces organes sensoriels sont endommagés repartent dans des directions aléatoires (à droite), le plus souvent sans jamais atteindre le point de capture.

sinueuse, elle ne retourne pas à son point de départ en suivant cette trajectoire, mais coupe les angles : elle a mémorisé l'emplacement de la mouche.

Cette mémorisation provient des jauges de contrainte, non des indications extérieures de type visuel, olfactif, ou liées à la pesanteur : quand on détruit les organes sensibles aux forces situés près des articulations des pattes, les araignées ne savent plus s'orienter ; elles partent dans de mauvaises directions, sont incapables de corriger leurs erreurs au cours du trajet et manquent finalement leur cible. L'absence des capteurs de force est pourtant leur seul handicap pour capturer la proie. En l'absence d'indications externes qui leur permettent de s'orienter, ces animaux nocturnes utilisent des informations relatives à leurs propres mouvements, que leur fournissent les détecteurs de contraintes.

L'étude des jauges de contrainte des arthropodes améliore notre connaissance de ces invertébrés, mais elle fournit aussi des indications importantes aux spécialistes de la robotique. Elle confirme, tout d'abord, que les ingénieurs ont sans doute choisi correctement la disposition du matériau conducteur des jauges artificielles : cette organisation en réseau ou en bandes adjacentes donne, comme chez les arthropodes, une sensibilité directionnelle, et une précision accrue par

la réalisation simultanée de plusieurs mesures.

En outre, plusieurs équipes d'ingénieurs tentent d'utiliser des réseaux de capteurs simples pour obtenir des comportements aussi complexes que ceux des arthropodes. Un robot aussi agile et aussi bien équilibré qu'un arthropode aurait de nombreux usages. Il serait adapté au déplacement sur des terrains accidentés où des véhicules à roues ne peuvent pas circuler. Aussi pourrait-il se déplacer dans des sites de stockage de déchets toxiques ou dans les cratères volcaniques de la Terre, sur la Lune ou sur Mars. La Marine américaine, notamment, voudrait mettre au point des robots ressemblant à des crabes qui partiraient des bateaux, atteindraient le rivage et rechercheraient des mines.

Une équipe de l'Université de Case Western Reserve a construit des robots à six pattes en s'inspirant du système nerveux des arthropodes : la commande des mouvements est répartie dans différents segments. Ces robots parviennent à marcher assez rapidement sur un réseau de lames largement espacées. Une telle conception remédie partiellement à des problèmes qui se posent avec la plupart des robots à plusieurs pattes : ceux-ci doivent, pour faire un pas, procéder à de laborieux calculs à partir de données fournies par de nombreux capteurs.

Les jauges de contrainte biologiques sont apparues chez les arthropodes il y a plus de 300 millions d'années : nous avons un certain retard à combler pour les utiliser aussi bien. Nous devons attendre encore un peu avant de voir des robots aussi perfectionnés que leurs modèles vivants.

Sasha ZILL est professeur à la Faculté de médecine de l'Université Marshall, à Huntington. Ernst-August SEYFARTH est professeur de zoologie et de neurosciences à l'Université de Francfort.

Sasha N. ZILL et David T. MORAN, *The Exoskeleton and Insect Proprioception*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 91, pp. 1-24 et 57-75, 1981.

Neurobiology of Arachnids, sous la direction de F.G. Barth, Springer-Verlag, 1985.

F. LIBERSAT, F. CLARAC et S. ZILL, *Force-Sensitive Mechanoreceptors of the Dactyl of the Crab : Single-Unit Responses during Walking and Evaluation of Function*, in *Journal of Neurophysiology*, vol. 57, n° 5, pp. 1618-1637, mai 1987.

Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics, sous la direction de R.D. Beer, R.E. Ritzmann et T. McKenna, Academic Press, 1993.

Ernst-August SEYFARTH et Andrew S. FRENCH, *Intracellular Characterization of Identified Sensory Cells in a New Spider Mechanoreceptor Preparation*, in *Journal of Neurophysiology*, vol. 71, n° 4, pp. 1422-1427, avril 1994.

Caïmans et piranhas

Photographies :
Xavier Ferrer et Adolfo de Sostoa

Texte : Xavier Ferrer

La famille des Crocodiliens comporte 21 espèces vivantes. Parmi celles-ci, le caïman (*Caiman yacaré*) vit dans le Mato Grosso, au Brésil, et dans des zones adjacentes du Paraguay, de la Bolivie et de l'Argentine. Il peut atteindre trois mètres de long et se nourrit principalement de poissons. Sa nourriture favorite est le piranha (*Serrasalmus*), qu'il décime : c'est l'appétit du caïman qui détermine la taille de la population des piranhas. Ces poissons essentiellement carnivores enrichissent leur alimentation de fruits et de végétaux à certaines périodes de l'année.

L'étroite relation entre le caïman et le piranha a été étudiée à Corrientes, en Argentine, où la diminution des populations de caïmans résulte de la surpêche de poissons comestibles dont se nourrissent les piranhas.

La photographie n'est pas facile : après de longues heures d'observation à la jumelle, nous avons couru dans le marécage pour saisir l'instant propice où le caïman sort de l'eau tenant sa proie.





π en musique

JEAN-PHILIPPE FONTANILLE

Écoutez les décimales du nombre π .

La racine carrée du nombre deux fascinait les Pythagoriciens, qui découvraient là le premier nombre irrationnel ; puis on a cru que le nombre d'or contenait les canons de la beauté. π , rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre, est auréolé du même mystère. A-t-il vraiment des vertus esthétiques ? Compositeur et passionné de sciences, j'ai cherché la réponse dans le domaine musical. Le morceau intitulé *Harmonisation de π* , dont le début est donné ici, fait entendre les décimales de π . Quel mathématicien non prévenu les reconnaîtrait-il à l'audition du morceau ?

Comment est-il construit ? La gamme naturelle comportant sept degrés (*do, ré, mi, fa, sol, la, si*), j'ai d'abord écrit π en base sept. À cette fin, on considère d'abord le premier chiffre, 3, que l'on conserve. On soustrait 3 à π , puis on multiplie par sept ; on obtient 0,9911... Le premier chiffre étant 0, on conserve ce 0 comme première décimale en base sept. On multiplie alors 0,991... par sept, et l'on obtient 6,9379... : la deuxième décimale est 6. En poursuivant ainsi, on trouve l'écriture en base sept suivante : 3,066 365 143 203 613 411 026 340 224 465 222 664 352 065 024 015 544 321 542 643 102 51. De la sorte, on peut convertir toute décimale en une note, selon le code suivant : 0 pour *do*, 1 pour *ré*, 2 pour *mi*, 3 pour *fa*, 4 pour *sol*, 5 pour *la*, 6 pour *si*.

À ce stade, n'importe qui pourrait jouer les décimales de π sur un instrument, mais le résultat est musicalement limité. Une façon d'améliorer la musique des décimales consiste à utiliser chaque chiffre, non pour coder une seule note, mais un accord complet, dont cette note sera la fondamentale ; par exemple, 0 codera l'accord de *do* majeur (*do-mi-sol*) ou ses renversements, tel *mi-sol-do*. Pour des raisons que nous examinerons plus loin, le code a été choisi de la façon suivante : 0 pour *do* majeur, (*do-mi-sol-do*), 1 pour *ré* mineur (*ré-fa-la-ré*), 2 pour *mi* mineur (*mi-sol-si-mi*), 3 pour *fa* majeur (*fa-la-do-fa*), 4 pour *sol* majeur (*sol-si-ré-sol*), 5 pour *la* mineur (*la-do-mi-la*) et 6 pour *si* mineur (*si-ré-fa-si*).

Ce nouveau codage impose alors un véritable travail d'harmonisation, mais il reste le reflet fidèle des décimales de π . Bien que déposée comme telle, cette

œuvre n'est pas vraiment une composition, mais un arrangement sur des accords donnés, le travail artistique se limitant à choisir si ces accords seront majeurs ou mineurs, dièses ou bémols, selon le jeu des tonalités, ou à leur apporter d'éventuels enrichissements. Musicalement, l'irrationalité de π pose un problème : toute

composition musicale normale est fondée sur la répétition, l'alternance et le développement des thèmes. Ici, en revanche, ces procédés sont exclus, car les décimales sont réparties de façon aléatoire. C'est donc un parti pris que d'avoir limité l'œuvre aux premières décimales.

L'HARMONISATION

Examinons maintenant la réalisation dont les premières mesures sont proposées ici. C'est un extrait d'un morceau qui dure deux minutes et demie, pour guitare. Il se divise en quatre parties. Afin de donner au chiffre 3, à gauche de la virgule, une importance particulière, la note qui lui est associée (un *fa*) détermine non seulement le premier accord (un *fa*

majeur) mais aussi la tonalité des 18 premières mesures. Ainsi, bien que les décimales continuent ensuite d'égrener les accords qui leur sont associés, elles restent sous la « tutelle » de ce 3.

Certaines décimales, créant un contexte harmonique favorable, ont reçu un développement dans le respect de l'accord qui leur était associé. Ainsi la 44^e décimale (un 2, associé à un accord de *mi* mineur), est traitée sur huit mesures, tandis que les 17^e et 16^e décimales ne durent qu'un temps et demi. D'autres décimales dont la suite donnait naturellement de belles successions d'accords n'ont pas été privilégiées : je voulais rester le plus fidèle possible à la suite des décimales, qui jouent toutes le même rôle dans le

nombre π . D'ailleurs, ce changement aurait fait perdre des informations intéressantes : ainsi les décimales 45 à 50 donnent une belle succession d'accords formant une cadence.

Le nombre π fascine, mais d'autres harmonisations peuvent être tentées : racine de deux, le nombre d'or... Dans les trois cas, c'est le système tonal traditionnel qui a été retenu pour le codage, mais on pourrait également utiliser le système dodécaphonique, grâce à un codage en base 12. Il y a beaucoup à faire.

Jean-Philippe FONTANILLE est compositeur et professeur de guitare à Paris.

6, si 6, si 4, sol m

3, fa m

5, la m

2, mi

0, do m

6, si m 5 b 5, la

0, do m

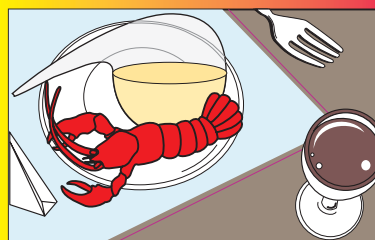
2, mi m

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 septembre 1996.

FRANCE

info

Le monde agité de la coopération

JEAN-PAUL DELAHAYE • PHILIPPE MATHIEU

Des mouvements oscillatoires inattendus aident à comprendre pourquoi nous ne sommes pas tous débonnaires.

La simulation des comportements sociaux sur ordinateur montre que, là où tout ne semblait qu'«ordre, calme et volupté», le diable a introduit un maléfice qui ferait douter de ses choix le plus saint des hommes.

Nos recherches systématiques utilisent des ordinateurs puissants qui ont calculé pendant des journées entières ; elles ont montré que les comportements sociaux présentent des aspects oscillatoires inattendus. Ces expériences jettent un doute sur les conclusions généralement admises concernant l'intérêt de la coopération entre entités jouant au «dilemme des prisonniers».

Ce jeu, dont nous indiquerons les règles plus loin, est un modèle naturel pour étudier les mécanismes de coopération entre organismes indépendants ; ceux-ci doivent choisir entre une attitude d'association ou une attitude d'opposition. Aussi les conclusions morales que l'on déduisait des résultats anciens doivent prendre en compte des dynamiques nouvelles que nous avons rencontrées.

S'ASSOCIER OU SE COMBATTRE ?

Deux suspects emprisonnés sont questionnés par la police. Ils s'interrogent : doivent-ils être solidaires l'un de l'autre en n'avouant rien aux policiers ou doivent-ils trahir leur compère pour bénéficier d'une remise de peine ? C'est le dilemme des prisonniers. Pour en illustrer la généralité, examinons le cas économique du travail spécialisé.

Vous êtes meilleur sabotier que votre voisin, lequel est meilleur cultivateur que vous ; votre intérêt commun est de vous spécialiser et de créer une association. Vous resterez dans votre atelier et lui dans son champ, et vous échangerez des sabots contre du blé. Globalement, vous gagnerez chacun, en coopérant ainsi, plus que si vous refusiez de com-

mercer l'un avec l'autre. Pourquoi ? Parce que, si vous ne coopérez pas, vous seriez obligé de passer une partie de votre temps à faire des sabots et une autre partie à cultiver votre blé, tâche où vous êtes inefficace. Vous pourriez être tenté d'aller voler le blé de votre voisin ! Est-ce une bonne politique ? Vous en tirez un bénéfice immédiat, mais vous risquez alors de vous fâchez définitivement avec lui. Toute coopération future est alors interdite, et vous perdez le bénéfice des échanges. Il en va de même si votre voisin vole vos sabots.

Ce type de situations apparaît dans un grand nombre de contextes : en économie, en biologie, en sciences politiques, en psychologie, en sociologie, en stratégie militaire, en informatique, etc. Dans ces situations, chaque joueur a le choix entre la coopération – c – et la trahison – t – (le vol des biens du voisin amenant la dispute) ; l'intérêt commun est la coopération, alors que l'intérêt individuel est la trahison (le voleur gagne plus). Les gains des entités dans un tel jeu sont fonction de leurs choix. Indiquons les paramètres, classiques mais adaptables, du dilemme du prisonnier.

Si les deux entités coopèrent – ce que l'on note $[c, c]$ –, toutes deux gagnent journalièrement trois points, et la «production quotidienne» globale est de six points.

Si l'une trahit et l'autre coopère – $[t, c]$ –, celle qui trahit et exploite son adversaire gagne cinq points, et l'autre, qui se fait bernier, ne gagne rien. La production quotidienne est cinq points au lieu de six : un voleur fait baisser la production générale !

Si les deux entités trahissent simultanément (défiance mutuelle, conflit, etc.) – $[t, t]$ –, cela leur coûte du temps et de l'énergie et, de plus, elles perdent le bénéfice des échanges de compétence. On convient qu'alors elles ne gagnent chacune qu'un point chaque jour.

Dans une telle situation de dilemme des prisonniers, ce qu'a fait votre adversaire les jours précédents influera sur votre décision de coopérer ou de trahir. Nous n'envisagerons ici pas d'autres valeurs de points gagnés, mais les conclusions obtenues ne dépendent pas du choix, pourvu qu'on respecte les principes généraux du jeu.

Il y a une vingtaine d'années, en utilisant des simulations informatiques, Robert Axelrod, de l'Université du Michigan, a mis en évidence une stratégie simple appelée DONNANT-DONNANT (ou TIT FOR TAT), souvent efficace : «Le premier jour je coopère et, les jours suivants, je joue comme mon adversaire a joué la veille.»

Cette stratégie associe un certain nombre de bonnes propriétés qui expliquent son succès :

- Elle est gentille : elle ne prend jamais l'initiative de la trahison.

- Elle est réactive : contrairement à la stratégie LUNATIQUE qui décide de coopérer ou de trahir au hasard en tirant à pile ou face à chaque coup, la stratégie DONNANT-DONNANT détermine le comportement d'un joueur en fonction de ce que fait son partenaire.

- Elle est permissive, ce que n'est pas la stratégie RANCUNIÈRE. Cette stratégie règle son jeu sur le principe «je coopère jusqu'à ce que mon adversaire trahisse et, si cela arrive, alors je trahis toujours».

- Elle est simple, ce qui est avantageux en première analyse.

L'existence de stratégies plus complexes réussissant mieux que DONNANT-DONNANT dans des contextes nombreux et variés a été prouvée : c'était l'une des conclusions d'un article précédent (voir *L'altruisme perfectionné*, *Pour la Science*, mai 1993). Les stratégies proposées par les lecteurs de la revue nous ont permis de la vérifier.

Ainsi la stratégie GRADUELLE, moins simple et plus efficace que DONNANT-DONNANT, est : «Je coopère, mais, lorsque mon adversaire me trahit, je réplique par une série de N trahisons successives, où N est le nombre de trahisons passées de mon adversaire, suivie de deux étapes de coopération ayant pour objet de renouer une phase de coopération.»

TOURNOIS ET SIMULATIONS ÉCOLOGIQUES

On compare les stratégies à l'aide de deux types de compétitions : les tournois (a) et les simulations écologiques (b).

Dans les tournois, chacune des stratégies étudiées joue contre chaque autre (par exemple, lors d'une confrontation



1. Le dilemme des prisonniers modélise les interactions sociales lorsque existe une tentation de tricherie ou de vol. Pour que la coopération ait lieu, ce qui est l'attitude globalement la plus payante, il faut que chacun résiste à la tentation de tricher. Dans cet exemple, les deux acteurs sont un sabotier et un cultivateur. La coopération est symbolisée par c et la trahison par t . Si sabotier et cultivateur coopèrent (situation $[c, c]$), chacun fait ce qu'il sait bien

faire et procède à des échanges avec son voisin. Le profit général est de 6 F répartis équitablement entre les deux travailleurs. Si l'un des deux protagonistes vole le bien de son voisin (situation $[t, c]$), le voleur gagne 5 F et le volé ne gagne rien. Le voleur obtient un bon revenu, mais son action coupable fait baisser le rendement général. Dans la troisième situation $[t, t]$ de non-coopération et de surveillance mutuelle, le sabotier et le cultivateur gagnent chacun 1 F seulement.

de 100 coups) ; on compte les points gagnés par chaque stratégie lors de ses diverses confrontations, et on les additionne. La stratégie qui totalise, lors de la confrontation, le plus grand nombre de points gagne le tournoi.

Le tableau du tournoi permet de calculer des simulations écologiques qui sont beaucoup plus intéressantes. La sélection entre stratégies n'autorise que la victoire des stratégies robustes, contrairement aux tournois où gagnent parfois des stratégies spécialement adaptées à un environnement déterminé, mais incapables de se maintenir quand l'environnement change.

Dans les simulations écologiques, on prend un certain nombre de copies des stratégies que l'on veut faire concourir, par exemple 100 exemplaires de DONNANT-DONNANT, 100 exemplaires de GRADUELLE, 100 exemplaires de LUNATIQUE. On confronte alors chacune des 300 stratégies aux 299 autres. Le total des points gagnés par chaque stratégie détermine l'effectif de sa descendance : celle-ci est proportionnelle au nombre de points qu'elle a obtenus. On calcule les effectifs nouveaux en supposant que l'effectif total reste inchangé (300), et l'on obtient ainsi la deuxième génération. La troisième génération est calculée de la même façon à partir de la deuxième, etc.

Une stratégie peut être mal classée lors d'un tournoi et, pourtant, gagner la simulation écologique. On constate le

plus souvent que les stratégies méchantes (qui prennent l'initiative de trahir) se font éliminer rapidement. Cela favorise les stratégies qui souffraient d'être trop coopératives et se faisaient exploiter par les méchantes ; leurs effectifs remontent donc, ce qui entraîne dans la grande majorité des cas l'apparition d'un mélange de stratégies gentilles. Un moment arrive où chaque stratégie restante coopère tout le temps avec toutes les autres. Dès cet instant, les effectifs ne changent plus : les gains sont équitablement répartis, et les descendance restent proportionnelles aux effectifs, maintenant fixés.

Dans ce modèle de comportement social, le voleur obtient un profit substantiel aux dépens du volé, et aucune religion, police ou armée n'est là pour favoriser les comportements coopératifs ; pourtant, la mécanique mathématique du jeu conduit à un univers apaisé et idyllique où seuls les gentils perdurent et où voleurs et exploiters disparaissent.

Ce type de conclusions correspond à une philosophie optimiste du monde ; elle sert d'ailleurs parfois d'arguments aux théories politiques anarchistes et aux théories économiques libérales les plus extrémistes qui y voient la preuve que ni la religion ni l'État ne sont nécessaires au bon fonctionnement des sociétés.

Malheureusement, ce que nous voyons sur terre n'est pas le monde de coopération généralisée prévu par la

théorie. Où est la faille ? Le modèle utilisé est-il trop simple ? Peut-être, mais aucune complication du modèle n'a donné de conclusions bien claires. Aussi vaut-il mieux le conserver, au moins dans un premier temps, et examiner d'autres facteurs.

LE MONDE N'EST PAS COMPOSÉ DE GENTILS

Un modèle est sérieusement envisagé par les spécialistes de la théorie de l'évolution : il fait intervenir des mutations. Dans la simulation écologique, aucune stratégie nouvelle n'apparaît jamais : il n'y a pas de mutations, et c'est d'ailleurs pourquoi elle est appelée ainsi et non pas simulation évolutionniste. Dans un monde où soudainement apparaissent par mutation des stratégies méchantes exploitant une société de coopération généralisée, ces mutants méchants déstabilisent le bel équilibre. Des simulations utilisant la technique des algorithmes génétiques (les morceaux de programmes constituant les stratégies subissent aléatoirement des mutations et des croisements) confirment cette hypothèse. C'est une première explication de la non-convergence constatée du monde réel vers la coopération généralisée.

Une autre explication s'appuie sur la trop grande simplicité des simulations informatiques réalisées jusqu'à présent. Il a été établi (par exemple, avec

LES STRATÉGIES

DONNANT-DONNANT commence par coopérer, puis joue au coup n ce que l'adversaire a joué au coup $n-1$.

LUNATIQUE coopère ou trahit en choisissant au hasard à l'aide d'une pièce de monnaie.

GRADUELLE commence par coopérer, mais, lorsque son adversaire trahit, elle réplique par une série de N trahisons successives (N étant le nombre total de trahisons subies), suivie de deux coups de coopération.

BINAIRE coopère, puis trahit périodiquement.

PÉRIODIQUE-MÉCHANTE trahit, trahit et coopère périodiquement.

MAJORITÉ agit comme son adversaire a joué en majorité dans le passé. Elle coopère le premier coup, ou s'il y a égalité.

PÉRIODIQUE-GENTILLE coopère, coopère, et trahit périodiquement.

CCCC coopère, coopère, coopère, coopère, et trahit.

SONDEUR trahit, coopère, coopère aux trois premiers coups ; ensuite, si son adversaire a coopéré aux coups 2 et 3, il trahit toujours, sinon il joue **DONNANT-DONNANT**.

EXEMPLE DE COMBAT

NUMÉRO DU COUP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LUNATIQUE	c	t	t	c	t	c	t	t	c	c
DONNANT-DONNANT	c	c	t	t	c	t	c	t	t	c
POINTS GAGNÉS										
LUNATIQUE	3	5	1	0	5	0	5	1	0	3
DONNANT-DONNANT	3	0	1	5	0	5	0	1	5	3

Au total, 23 points pour **LUNATIQUE**, et 23 points pour **DONNANT-DONNANT**.

2. Les différentes stratégies utilisées et un exemple de combat entre deux stratégies.

la stratégie **GRADUELLE** et ses variantes) que des stratégies complexes pouvaient obtenir de bons résultats en compétition écologique. Nous devons donc nous interroger sur les expériences réalisées jusqu'ici : la coopération constatée dans les écosystèmes simples ne faisant intervenir que des stratégies simples est-

elle vraiment générale ? Il faut réaliser de nouvelles expérimentations à plus grande échelle, où agissent des familles de plusieurs milliers de stratégies complexes. Ces expérimentations sont difficiles. Comment pouvons-nous être assurés que nous n'oublions pas d'idées pertinentes ? Comment pouvons-nous mesurer la

représentativité des écosystèmes construits ? Ces expérimentations ont déjà été entreprises, et leurs résultats devront certainement être pris en compte dans l'analyse finale.

Le dernier facteur pouvant expliquer l'inadéquation entre le monde observé et les expérimentations qui convergent vers un monde de coopération généralisée est lié à la dynamique des simulations écologiques. Cette dynamique n'est pas toujours une simple convergence, et c'est ce phénomène découvert fortuitement que nous allons détailler.

DES DYNAMIQUES INATTENDUES

Quelle ne fut pas notre surprise lorsqu'après de longs calculs réalisés au printemps dernier nous avons aperçu sur notre écran d'ordinateur une courbe hésitante, différente de toutes celles que nos expérimentations engendraient habituellement. Ce premier cas d'oscillation complexe dans une simulation écologique du dilemme des prisonniers faisait intervenir cinq types de stratégies. Nous avons entrepris de rechercher systématiquement si de tels cas pouvaient se produire. Nous avons recherché les situations présentant ces oscillations et utilisant le moins de stratégies possibles.

Avec deux types de stratégies, aucune dynamique complexe ne se présente jamais, ce que des arguments mathématiques confirment. Avec trois, en revanche, tout semble possible, et... tout se produit. Il est fréquent, en mathématiques, que des modes de fonctionnement complexes apparaissent pour trois corps, dans la dynamique des planètes par exemple...

Après avoir analysé des milliers d'évolutions et sélectionné (par programme) les plus remarquables, nous proposons de classer les phénomènes observés en cinq groupes.

Le premier, qui correspond à la grande majorité des cas et que l'on croyait pour cela général, est la convergence monotone : les effectifs des populations après une évolution monotone se stabilisent complètement (voir les figures 4 et 5).

Le deuxième cas est celui des mouvements oscillatoires atténués : les effectifs des populations oscillent avec une amplitude décroissante, ce qui conduit comme dans le premier cas à une stabilisation, mais après de nombreux revirements (voir la figure 6).

Le troisième cas est celui des mouvements périodiques : les effectifs des stratégies après une phase éventuelle d'hésitation évoluent cycliquement, reproduisant régulièrement après plusieurs

LES SIMULATIONS ÉCOLOGIQUES

À la génération n , il y a trois types de stratégies :

les 'A' d'effectif $a(n)$, les 'B' d'effectif $b(n)$, les 'C' d'effectif $c(n)$.

On connaît la matrice des gains correspondant aux combats à deux que peuvent faire les stratégies A, B et C entre elles :

$p(A,B)$ = gain en points pour A, lorsque A joue contre B, etc.

On suppose que l'effectif total est fixe :

$$e = a(n) + b(n) + c(n) = a(n+1) + b(n+1) + c(n+1) = \dots$$

Calculs des points gagnés à la génération n par un A, ou un B, ou un C :

$$g(A,n) = (a(n)-1).p(A,A) + b(n).p(A,B) + c(n).p(A,C)$$

$$g(B,n) = a(n).p(B,A) + (b(n)-1).p(B,B) + c(n).p(B,C)$$

$$g(C,n) = a(n).p(C,A) + b(n).p(C,B) + (c(n)-1).p(C,C)$$

Total des points gagnés par toutes les stratégies en présence :

$$t(n) = a(n).g(A,n) + b(n).g(B,n) + c(n).g(C,n)$$

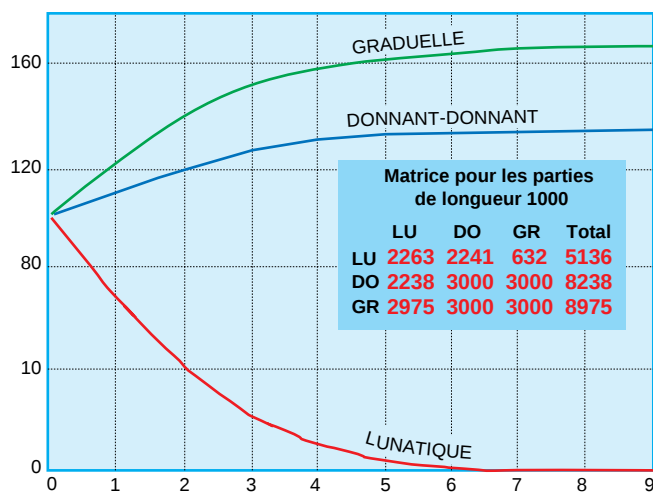
Effectif des naissances constituant la population à la génération $n+1$

$$a(n+1) = e.a(n).g(A,n) / t(n) \quad (\text{arrondi à l'entier inférieur})$$

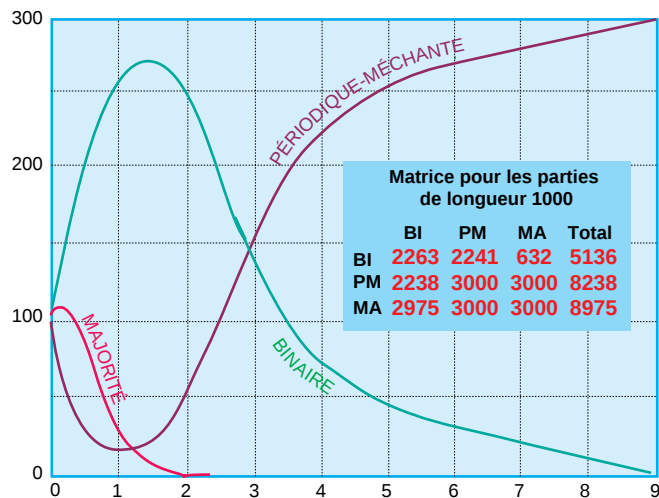
$$b(n+1) = e.b(n).g(B,n) / t(n) \quad (\text{arrondi à l'entier inférieur})$$

$$c(n+1) = e.c(n).g(C,n) / t(n) \quad (\text{arrondi à l'entier inférieur})$$

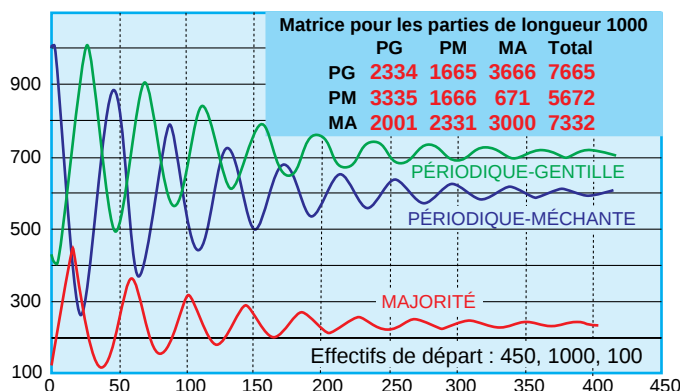
3. L'évolution des simulations écologiques : l'effectif de la génération $n+1$ d'une stratégie est proportionnel aux nombres de points que les exemplaires de cette stratégie gagnent lors des rencontres entre stratégies à la génération n . Avec les équations reproduites ici, vous pouvez recalculer les dynamiques des figures 2 à 7. Vous pouvez aussi tester vos propres stratégies et rechercher d'autres dynamiques complexes.



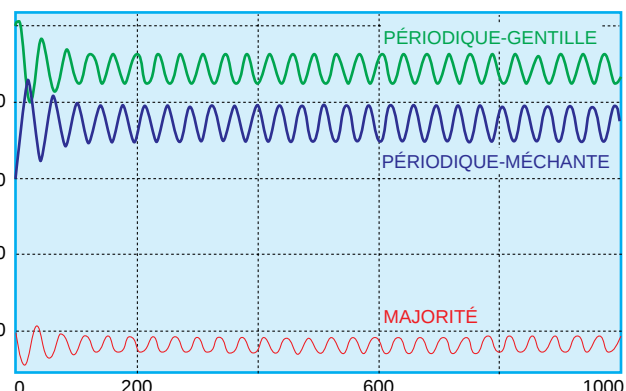
4. «Le crime ne paie pas.» Évolution des populations de stratégies pendant 10 générations à partir d'un effectif de 100 stratégies de chaque sorte. La stratégie LUNATIQUE, la seule à prendre l'initiative de la trahison, se fait éliminer. Cette évolution avec élimination des méchantes et stabilisation dans un état de coopération généralisé est fréquent. Remarquons que GRADUELLE bat DONNANT-DONNANT. Ce n'est pas un hasard, car il a été établi récemment que GRADUELLE était meilleure que DONNANT-DONNANT dans de nombreux contextes.



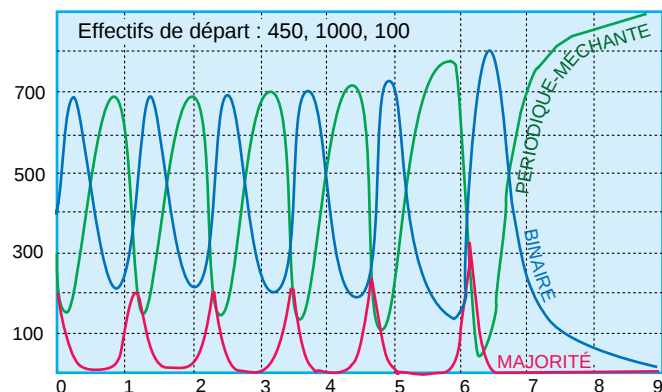
5. «Le crime... paie.» PÉRIODIQUE-MÉCHANTE commence mal, ce qui profite d'abord aux autres, puis uniquement à BINAIRE. La stratégie MAJORITÉ se fait alors éliminer, bien qu'elle soit gentille, tandis que les deux autres sont méchantes. Il se produit ensuite un retour de PÉRIODIQUE, qui reste seule à partir de la génération 90. La stratégie ayant le plus faible résultat en tournois (d'où sa baisse initiale) gagne la simulation écologique : elle a utilisé l'autre stratégie méchante pour éliminer la gentille, puis s'est débarrassé d'elle.



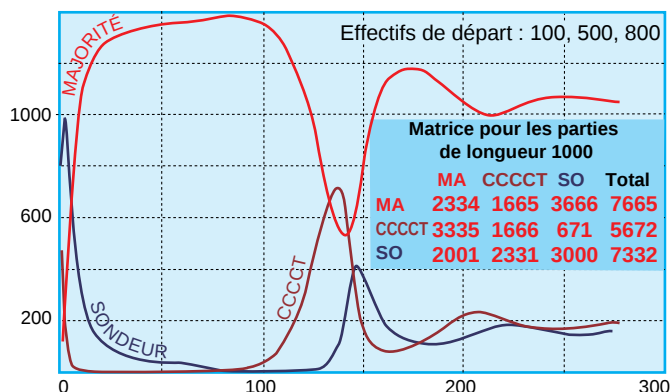
6. «Tout vient à point à qui sait attendre.» Les trois populations oscillent violemment dans les 100 premières générations, puis trouvent un équilibre qui est atteint à partir de la génération 420.



7. «L'éternel recommencement» : cette fois, l'oscillation ne se stabilise jamais : les effectifs des populations de stratégies retrouvent périodiquement les mêmes valeurs toutes les 37 générations.



8. «Tant va la cruche à l'eau...» L'oscillation augmente jusqu'à la rupture, qui se fait au bénéfice de PÉRIODIQUE-MÉCHANTE qui reste seule après avoir entraîné ses adversaires dans une ronde folle où elles ont péri. Les oscillations violentes permettent la survie de stratégies non coopératives qui tirent profit du désordre général.



9. «De la discussion naît la lumière.» Le cas du mouvement hésitant, Après une instabilité forte pendant 250 générations où chacune des trois stratégies frôle la catastrophe, un point d'équilibre est atteint. La sensibilité aux conditions initiales de ce type de dynamique permet de parler de situation chaotique.

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la Découverte
à
l'enregistrement**

**des Inattendus
de la Science**

**Samedi
14 septembre
à 15h**

**les limites
inattendues**

avec
Jean-Marc Lévy-Leblond
physicien

**Invitations
à demander**
au **36 68 10 99** (2,23F/mn)



générations la même combinaison, sans qu'il y ait jamais de stabilisation (voir la figure 7).

Un tel phénomène a été récemment découvert par B. Sinervo et C. Lively dans le monde vivant et concerne des populations de lézards (voir *Lézards intrinsèques*, *Pour la Science*, juin 1996, p. 33). Il n'est pas certain que la découverte de ces chercheurs corresponde à une situation modélisable par le dilemme des prisonniers, mais on remarque que ces oscillations apparaissent quand interviennent trois populations dans le monde réel et quand on fait interagir trois stratégies dans le monde virtuel du dilemme des prisonniers.

Le quatrième cas, celui des oscillations croissantes avec rupture (voir la figure 8), est analogue au précédent, sauf que maintenant l'oscillation va s'amplifiant, ce qui conduit à une «rupture», comme pour un pont qui finit par casser à la suite de mouvements de balancement de plus en plus importants.

Le cinquième type de dynamique regroupe les cas inclassables : les mouvements semblent désordonnés (voir la figure 9). Dans nos expériences, ces mouvements désordonnés ne se poursuivent pas très longtemps, aussi hésitons-nous à parler de chaos.

LE CHAOS S'INTRODUIRAIT-IL ?

L'analogie avec d'autres phénomènes observés en météorologie, en chimie et en physique est tentante. Pour savoir si le «chaos» était présent, nous avons étudié la sensibilité aux conditions initiales : une petite variation dans les compositions initiales des populations se traduisait-elle par une variation importante dans le phénomène observé ?

La réponse est oui. Ces petites modifications des compositions initiales entraînent parfois la disparition de l'oscillation, ou le changement du gagnant d'une oscillation avec rupture. Presque toujours, la forme des courbes change brusquement.

Dans les cas périodiques, avec oscillations décroissantes ou rupture, des stratégies méchantes interviennent toujours. Parfois même, lors de la rupture dans le cas d'une oscillation d'amplitude croissante, le gagnant est une stratégie méchante : tout se passe donc comme si le désordre donnait de meilleures chances aux voleurs et était finalement défavorable aux stratégies coopératives. La conclusion quant à la réglementation sociale nécessaire s'impose.

L'instabilité liée aux conditions initiales ajoutée au fait que le gagnant final, quand il y en a un, n'est pas nécessai-

rement gentil, ni nécessairement celui qui gagne le tournoi simple, rend imprévisible le déroulement de ces dynamiques à partir des seules équations et des résultats des confrontations deux à deux.

D'autres types d'instabilités confirment que nous sommes bien dans un cas chaotique : sensibilité aux variations des paramètres de gains, sensibilité à la longueur des confrontations, sensibilité aux méthodes d'arrondi numérique utilisées dans les calculs.

Il est fort possible qu'avec des stratégies complexes ce qui nous était apparu exceptionnel (rappelons que nous n'avons trouvé ces cas oscillants qu'après de longues recherches numériques) ne deviennent la règle. Cela signifierait que, contrairement à l'interprétation le plus souvent acceptée des simulations réalisées sur le dilemme des prisonniers, la coopération n'est pas l'état attracteur le plus fréquent. Ainsi, le monde des rapports sociaux serait, par nature, instable à cause des dynamiques oscillatoires ou chaotiques conduisant inéluctablement à des ruptures profitant aux stratégies agressives.

Cette vision, que les simulations informatiques seules ne pourront pas prouver de manière définitive, nous fascine et nous inquiète, mais, avouons-le, nous amuse plus encore.

Sur le site *Internet* suivant, on trouvera des programmes et des articles sur le dilemme des prisonniers, ainsi que des détails sur les expérimentations réalisées ici : <http://www.lifl.fr/~mathieu/ipd>

J.-P. DELAHAYE, *Logique, informatique et paradoxes*, Bibliothèque Pour La Science, Paris, 1995.

R. AXELROD, *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, Inc. Publishers, New York, 1984. Traduction française : *Donnant-donnant*, éditions Odile Jacob, Paris, 1992.

B. BEAUFILS, **J.-P. DELAHAYE** et **P. MATHIEU**, *Our Meeting with Gradual : A Good Strategy for the Iterated Prisoner's Dilemma*, in *Intern. Conf. on Artificial Life V (ALIFE. V)*, pp. 159-165, 16-18 mai 1996, Nara (Japon).

J.-P. DELAHAYE et **P. MATHIEU**, *Complex Strategies in the Iterated Prisoner's Dilemma*, *Interdisciplinary Intern. Conf. about Complex-System Theory and the Social Sciences*, University of Hull, Canada. Actes édités par A. Albert, I.O.S. Press, Amsterdam, 1995, pp. 283-292.

K. LINDGREN et **M. G. NORDAHL**, *Cooperation and Community Structure in Artificial Ecosystems*, in *Artificial Life, an Overview*, sous la direction de C. Langton, MIT Press, 1995, pp. 15-37.
