



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.

CCCCT 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.