

Vivre serein dans un monde cruel

Dans un univers où certains groupes adoptent une attitude agressive systématique, une communauté coopératrice peut-elle survivre et s'imposer ?

L'intérêt collectif est souvent opposé à l'intérêt individuel. Ce type de situation est magnifiquement illustré par le *dilemme du prisonnier* dont les règles sont explicitées sur la figure 1 et qui semble condamner les participants à l'égoïsme agressif. À long terme toutefois, l'intérêt collectif peut l'emporter. En effet, si les mêmes situations se répètent (*dilemme itéré du prisonnier*), la rationalité peut consister à faire confiance à autrui, même si nous ne sommes pas certains qu'il ne profitera pas de notre main tendue : la perspective de futures rencontres fructueuses rend acceptable le risque de se faire temporairement exploiter. Les expérimentations, menées par Robert Axelrod et ses continuateurs, l'ont établi : même sans contrainte policière, même sans motivation morale, les individus choisissent majoritairement de s'entendre et de coopérer à long terme.

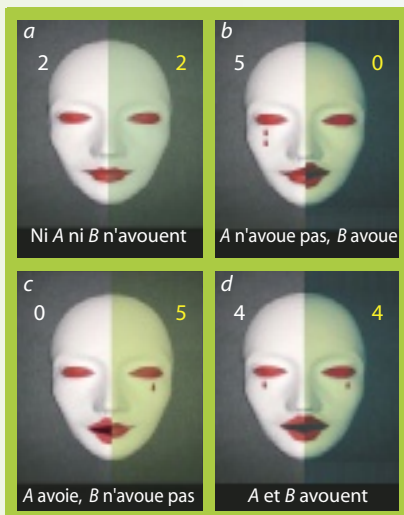
Qu'en est-il cependant des situations où la tactique de chacun est immuable, soit par volonté pacificatrice, soit par ignorance du statut du partenaire ? Nous verrons par des simulations informatiques que dans certaines confi-

gurations géométriques d'interaction entre communautés, l'intérêt collectif peut être préservé et que des attitudes de coopération peuvent dominer.

Miraculeuse coopération

Le *dilemme du prisonnier* nous fait mieux comprendre les mécanismes coopératifs en général, notamment de nombreux phénomènes observés par les psychologues, les sociologues, les spécialistes de stratégie politique et militaire, les économistes et les théoriciens de l'évolution. Le mécanisme qui amende ou élimine les individus agressifs est la réactivité des stratégies de type *donnant-donnant* qui coopèrent si vous coopérez, qui punissent votre agressivité si vous tentez de les exploiter. En revanche, si personne n'a le temps de nouer de relation suivie avec ses vis-à-vis et d'en tirer des leçons, le *donnant-donnant* et les stratégies réactives du même type n'ont aucun effet dissuasif. Ne devient-il pas alors évident que ne survivront que ceux qui saisissent toute occasion de bénéfice, aussi durs et intransigeants que soient leurs comportements ?

Nous observerons, en analysant les effets des « réseaux de communautés », qu'il existe d'autres mécanismes de mise



Deux malfaiteurs A (représenté par la moitié de visage de gauche) et B (représenté par la moitié de visage de droite) sont arrêtés et placés dans deux cellules différentes. Le juge leur propose un marché : « Si aucun de vous n'avoue (a), vous ferez deux ans de prison chacun ; si l'un avoue que vous prépariez une attaque de banque et que l'autre ne dit rien (b et c), celui qui avoue sera libéré, celui qui n'a rien dit fera 5 ans de prison. Si vous avouez tous les deux (d), vous ferez 4 ans de prison chacun. »

Nous utiliserons ces coefficients dans nos modèles. L'aveu est assimilé à l'attitude agressive (on trahit la confiance de son compère) et la coopération est assimilée au refus d'avouer (on reste solidaire).

Ce jeu est le prototype des relations où l'intérêt personnel s'oppose à l'intérêt collectif : chacun est tenté

1. Le dilemme du prisonnier

de trahir, mais pourtant l'intérêt collectif est que chacun se taise. Dans des expériences menées par Robert Axelrod, on propose plusieurs fois de suite à deux individus de jouer à ce jeu (*dilemme itéré du prisonnier*). Les joueurs ne connaissent que les choix passés de l'autre joueur et ils peuvent en tenir compte.

La stratégie de jeu *donnant-donnant* est : « Je coopère la première fois, puis les autres fois, je joue au coup n ce que l'autre joueur a joué au coup $n - 1$ ». C'est une très bonne méthode de jeu et lors d'un tournoi où de nombreuses stratégies sont confrontées elle obtiendra souvent le meilleur résultat total. La présence de ces stratégies réactives et coopérantes (*donnant-donnant* n'est agressive qu'en réaction à une agression) conduit presque toujours à l'élimination des stratégies agressives.

en place de la coopération, différents de ceux résultant des comportements réactifs. Ces réseaux modélisent des mondes biologiques, sociaux ou économiques habités par des entités n'ayant pas la possibilité de réagir ; et pourtant, des régimes stables de coopération y sont possibles, fondés sur d'autres mécanismes dont il faudra tenir compte pour analyser la mise en place et le maintien de systèmes biologiques, sociaux ou économiques coopératifs. Nos simulations ont été menées à l'aide d'un logiciel développé par Jérémy Briffaut au sein de l'équipe *Systèmes Multi-agents et Comportements* du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

Dans le modèle des réseaux de communautés, l'espace social est un graphe dont les nœuds sont occupés par des ensembles d'individus, les communautés. Chaque nœud est assimilé à un groupe (un village, un pays, une entreprise, une catégorie professionnelle, etc.), possédant une « culture » qui définit le comportement de ses membres.

Chaque individu interagit avec les individus de sa communauté (présents sur le même nœud) et avec tous les individus placés sur les nœuds reliés au sien. Lors de ces interactions, des points sont distribués selon des règles équivalentes à celles du *dilemme du prisonnier* : (1) Quand deux individus coopérants entrent en contact, ils tirent chacun 3 points de leur rencontre ; (2) Quand deux individus agressifs entrent en contact, ils obtiennent chacun 1 point ; (3) Quand un individu agressif rencontre un individu coopérant, l'agressif gagne 5 points et l'autre, qui se fait exploiter, ne gagne rien. Le coefficient 5 est parfois remplacé par un coefficient plus élevé qui favorise les individus agressifs.

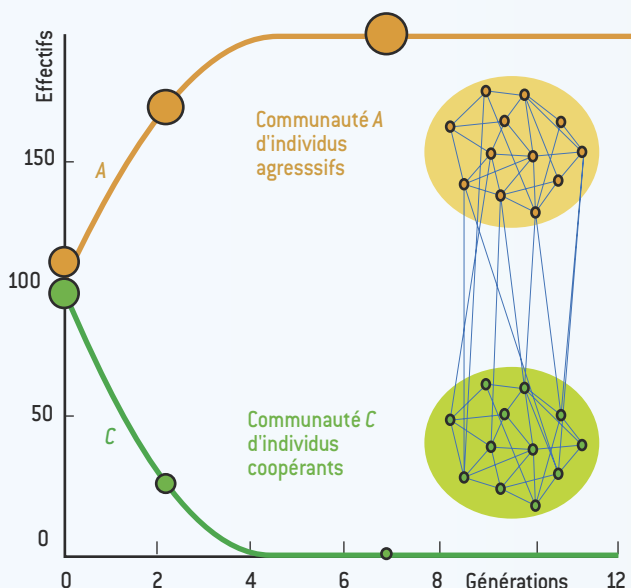
Ce système de rétribution du *dilemme du prisonnier* justifie l'utilisation des adjectifs coopérant et agressif. Il n'incite pas à la coopération, et bien pire, avec ces règles, l'individu agressif gagne plus de points, quel que soit l'individu rencontré :

(a) si l'individu rencontré est agressif, être agressif donne 1 point au lieu de 0 ; (b) si l'individu rencontré est coopérant, être agressif donne 5 points au lieu de 3.

Cependant le problème est plus délicat qu'il n'y paraît, car gagner individuellement à chaque rencontre en adoptant un comportement agressif coûte globalement à la communauté dont on fait partie : en effet, une communauté isolée d'individus coopérants gagne 3 points par individu à chaque rencontre, alors qu'une communauté isolée d'individus agressifs n'obtient qu'un point par individu et par rencontre. L'agressivité est rentable à la condition qu'elle ne se généralise pas et que subsistent toujours de bonnes poires. Dans notre modèle, cet antagonisme entre intérêt personnel et intérêt collectif existe dès que deux individus se rencontrent : chacun a intérêt à être agressif, pourtant si les deux individus coopèrent, ils gagnent collectivement $3 + 3 = 6$ points, ce qui est mieux que s'ils sont tous deux agressifs ($1 + 1 = 2$ points), et même mieux que si l'un se laisse exploiter par l'autre ($0 + 5 = 5$ points).

Les générations successives

Pour évaluer les conséquences des comportements, nous envisagerons une évolution dynamique des communautés : chaque individu totalise le nombre de points qu'il gagne lors de ses rencontres avec les membres de sa communauté et ceux des communautés liées. Ses points comptés, chaque individu se reproduit et a un nombre de descendants proportionnel à la moyenne des points qu'il a tirés de ses échanges (intra-communautaires et extra-communautaires). Si un individu coopérant en rencontre 10 autres et rencontre 20 individus agressifs, il gagne $(10 \times 3 + 20 \times 0) / 30 = 1$ point en moyenne. Cela correspond, par exemple, à un seul descendant.



2. Quand l'agressivité l'emporte

Deux communautés A et C sont liées. La communauté (ou le « nœud ») A est composée de 100 individus agressifs, la communauté (ou le « nœud ») C de 100 individus coopérants. Chaque individu rencontre tous les individus de sa communauté et tous les individus des nœuds voisins.

À chaque rencontre, des points sont distribués (attitudes coopérante contre coopérante donne 3 points à chacune, coopérante contre agressive donne 0 à coopérante et 5 à agressive, agressive contre agressive donne 1 point à chacune). Le nombre de descendants d'un individu à la génération suivante (après toutes les rencontres) est proportionnel à la moyenne de ses gains. Le nombre total d'individus (ici 200) est constant d'une génération à la suivante.

La simulation numérique montre une évolution inéluctable : la communauté agressive l'emporte détruisant l'autre (sur les graphes de cette figure et des figures suivantes, les cercles ont des surfaces proportionnelles aux effectifs des communautés représentées).

Les descendants de chaque individu sont placés sur le même nœud du graphe et constituent la seconde génération. Nous supposons, pour faire les calculs, que le nombre total d'individus sur l'ensemble des nœuds du graphe reste constant d'une génération à la suivante, mais cette hypothèse est sans importance, car ce qui importe est la proportion de coopérants et d'agressifs, proportion qui ne dépend pas du nombre total d'individus présents. Le détail des calculs et des règles d'arrondi est donné sur <http://www.lifl.fr/SMAC/>

Envisageons quelques variantes. (a) Contrairement aux règles de notre modèle, les individus pourraient savoir à qui ils ont affaire avant une rencontre et ajuster leurs réactions en conséquence. (b) Des mutations lors du passage d'un individu à ses descendants pourraient se produire aléatoirement. (c) Des erreurs dans la communication au moment des rencontres pourraient être prises en compte. (d) D'autres « caractères » moins tranchés que « coopérant » et « agressif » méritent aussi l'étude. (e) D'autres règles plus complexes pour le calcul du nombre de descendants seraient intéressantes à étudier. Etc. La compréhension du modèle simple est cependant un premier pas indispensable avant de mener des expérimentations fondées sur des versions plus complexes.

La première génération disparaît donc, remplacée par la deuxième. La deuxième génération engage alors à nouveau un cycle d'interactions – chaque individu rencontrant tous ceux du même nœud et tous ceux des nœuds voisins – ce qui détermine, après bilan comptable des interactions, les effectifs d'une troisième génération se substituant à la deuxième, etc.

Les questions sont : qui des agressives ou des coopérantes va l'emporter, de quelle façon et dans quelles circonstances ? Arrive-t-on toujours à une situation stable ? Quelles seront les propriétés de l'équilibre obtenu quand il y a en un ?

Le conflit à deux

Dans un premier exemple (voir la figure 2), deux communautés A et B sont liées (un graphe à deux nœuds A et B attachés), l'une composée d'individus agressifs, l'autre d'individus coopérants. Pensez à deux pays voisins isolés, le premier possédant une culture telle que ses membres sont agressifs et tirent toujours parti des interactions, alors que l'autre inculque à ses membres une vision confiante qui se traduit par une attitude de coopération systématique et indéfectible.

La simulation numérique dans un tel cas montre une évolution inéluctable : la communauté agressive l'emporte rapidement et détruit l'autre, la « culture agressive » absorbe la « culture coopérante ». Le monde résultant fonctionne plutôt médiocrement puisque les interactions entre survivants sont toutes de type agressive contre agressive, ce qui donne un revenu moyen de 1 point par interaction, alors qu'un équilibre coopératif donne un revenu moyen de 3 points par individu et par rencontre.

L'évolution de ce monde, en l'absence d'autorité régulatrice ou de motivations morales obligeant à faire passer l'intérêt collectif devant l'intérêt personnel, conduit au dépérissement général. L'avidité incontrôlée d'une partie des individus fait disparaître les tempéraments généreux, ce qui finit par nuire à tous et conduit à une société dure et inefficace, théâtre d'une lutte violente continue.

Un deuxième schéma va nous rassurer (voir la figure 3-1). Nous considérons un graphe où trois nœuds A, C1, C2 sont en ligne : A lié à C1, lui-même lié à C2. Le nœud A n'est habité que par des individus agressifs alors que C1 et C2 sont occupés par des individus coopérants. Les membres de C1 sont exploités par ceux de A, mais pas ceux de C2 qui n'ont aucun contact avec ceux de A et sont « protégés » par ceux de C1.

L'évolution se déroule en deux temps : d'abord le nœud A, profitant des individus de C1, prospère. Puis, lorsque les individus de C1 (exploités par ceux de A) ont perdu la moitié de leur effectif, ceux de A en pâtissent. La communauté C2 profite de la situation et au bout de 20 générations, seuls les individus de C2 persistent : les habitants de C2 continuent à tirer de bons revenus moyens de leurs interactions, qui leur permettent de prospérer, alors que des individus de A, isolés, s'entre-déchirent et disparaissent.

Examinons comment d'autres configurations de communautés déterminent le destin de leurs habitants. Pour une configuration en étoile où une communauté centrale est entourée d'une série de communautés n'ayant de lien qu'avec la communauté centrale (voir les figures 3-2 et 3-3), quand la communauté centrale est agressive (a), elle élimine les communautés coopérantes ; quand la communauté centrale est coopérante (b) et qu'au moins une autre communauté est coopérante sur une branche de l'étoile, alors celle-ci, protégée, s'impose et, à la stabilisation, est bien plus grosse que les autres (qui dans certains cas persistent à l'état d'embryons).

Grappe aléatoire

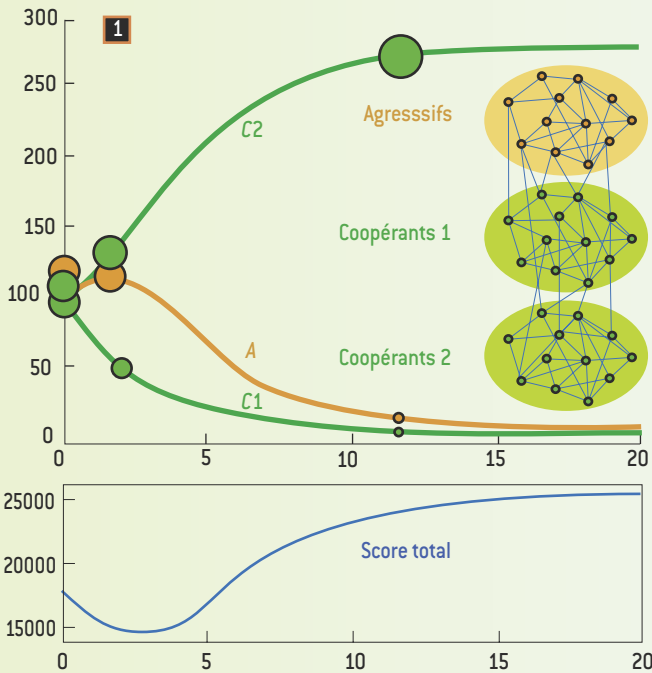
Le monde n'est cependant jamais structuré d'une manière aussi régulière ; aussi avons-nous étudié ce qui se passe lorsque l'on part d'un graphe aléatoire et qu'on place au hasard sur ses nœuds des communautés agressives ou coopérantes.

La figure 3-4 présente l'exemple d'un graphe aléatoire de dix nœuds et son évolution. Chaque nœud est occupé au départ soit par une communauté de 100 individus coopérants (en vert), soit par 100 individus agressifs (en orange). Au total, 1 000 individus sont répartis en 5 communautés coopérantes et 5 communautés agressives.

Les individus agressifs tirent peu de points de leurs interactions internes ; en revanche, ils obtiennent de nombreux points de leurs voisins coopérants qu'ils exploitent de manière éhontée. À la deuxième génération les effectifs des communautés coopérantes ont diminué. Au bout de sept générations, il ne reste plus aucun individu coopérant, certaines communautés agressives qui ont mieux profité de leurs voisins sont plus grosses et le resteront puisque tout est stabilisé. Encore une fois, le monde a évolué vers un système de guerre généralisée entre des individus qui tous se combattent sans merci.

La figure 3-5 montre que l'évolution précédente n'est pas inéluctable. Cette fois, ce sont les coopérants qui l'emportent. Comme dans le cas de l'alignement de trois communautés ou de certaines étoiles, l'existence d'une communauté coopérante isolée, et donc protégée, détermine la quasi-disparition de toutes les communautés agressives. Pour comprendre ces évolutions, d'autres expérimentations étaient nécessaires.

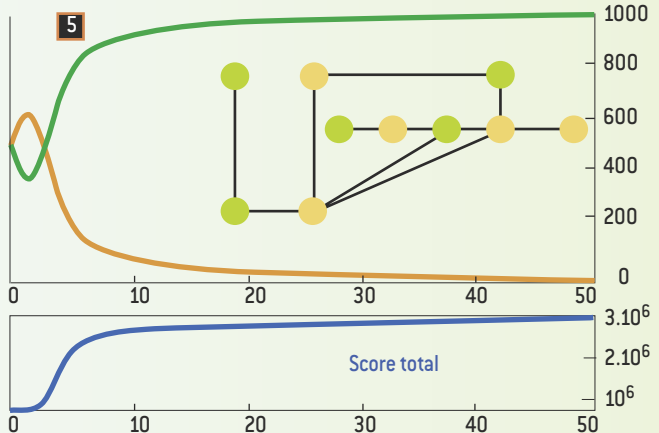
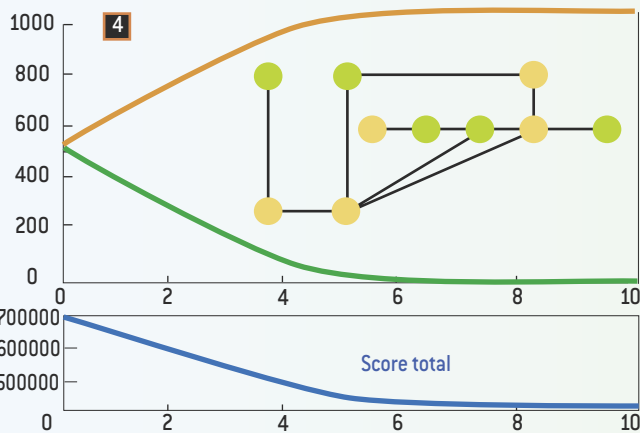
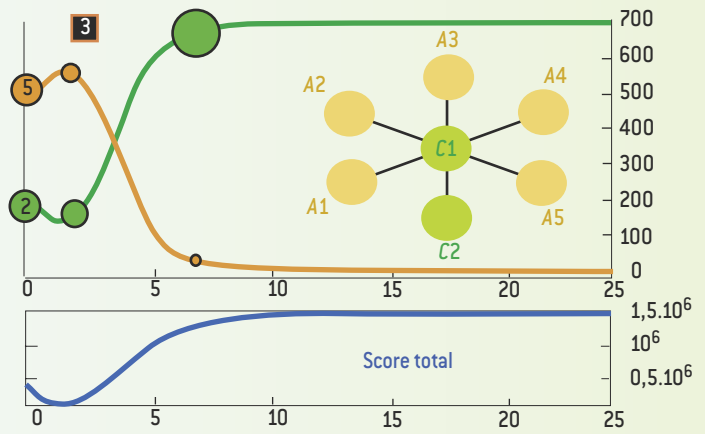
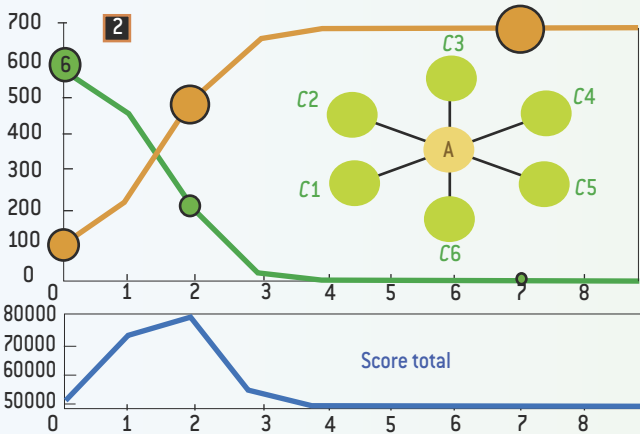
3. Les communautés coopératives font écran



On considère un graphe à trois nœuds A , $C1$ et $C2$. Le nœud A est habité par 100 individus agressifs, $C1$ et $C2$ sont occupés chacun par 100 individus coopérants. Les règles d'évolution sont les mêmes que sur la figure 2. Dans un premier temps, les individus de $C1$ sont exploités par ceux de A et leur effectif décroît, alors que le nombre de $C2$ augmente. Lorsque les $C1$ exploités sont moins nombreux, les gains de A en population diminuent et son effectif baisse. Le nœud $C2$ grâce aux bons rapports internes de ses membres poursuit sa progression finissant par s'imposer presque totalement puisque les A s'entre-déchirent et en paient les conséquences. À la fin, ne restent quelques individus sur A et $C1$, et le nœud $C2$ domine.

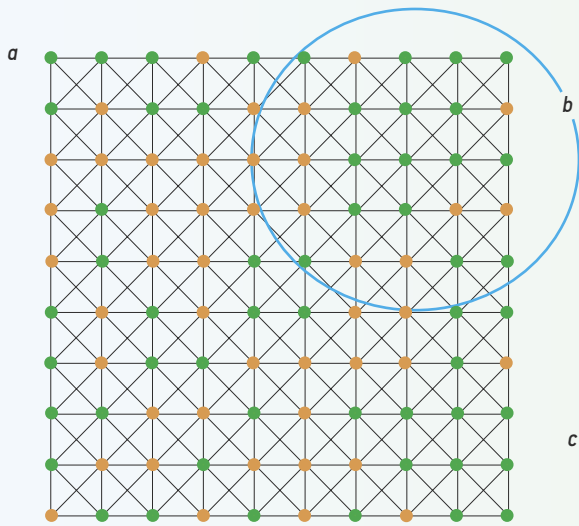
La courbe des scores montre que lors de la première phase, le total des gains (qu'on peut voir comme une mesure de l'efficacité globale du réseau des communautés) baisse, mais qu'ensuite il remonte pour arriver un peu en dessous de ce qu'obtiendrait une communauté de 300 individus coopérants placés sur $C2$.

Si les effectifs des communautés étaient mesurés par des nombres réels, le nœud $C2$ atteindrait asymptotiquement un effectif de 300, et les deux autres se videraient entièrement. Avec le système d'arrondi utilisé ici (pour que chaque communauté ait des effectifs entiers), l'évolution s'arrête quand on atteint 12 individus en A , 10 en B .

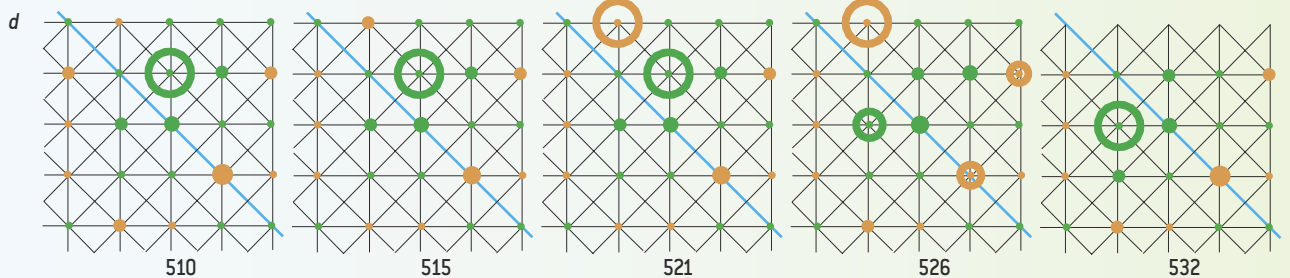
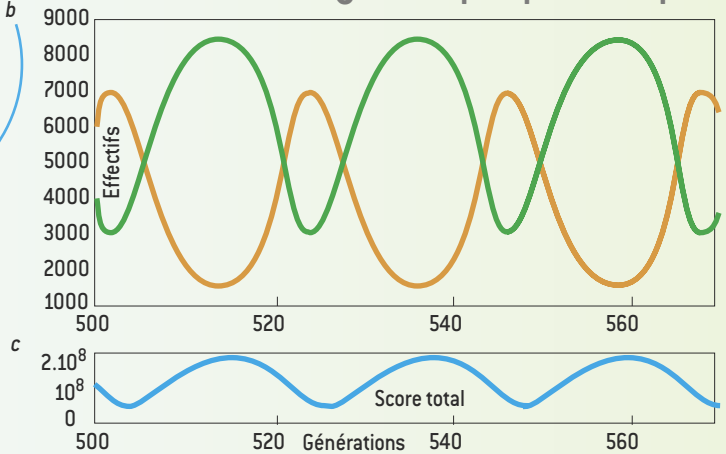


Occuper la position centrale est déterminant dans les réseaux en étoile. Quand une communauté agressive occupe le centre, elle détruit les autres (2). Quand une communauté coopérante est au centre et qu'au moins une autre se trouve sur une branche (3), celle-ci pros-

père et domine. Lors de la stabilisation de trois communautés, les coopérants prennent le dessus. On a représenté dix communautés, cinq agressives, cinq coopératives à des emplacements aléatoires. La nature de l'équilibre (4 et 5) dépend de la géométrie.



4. Une dynamique périodique

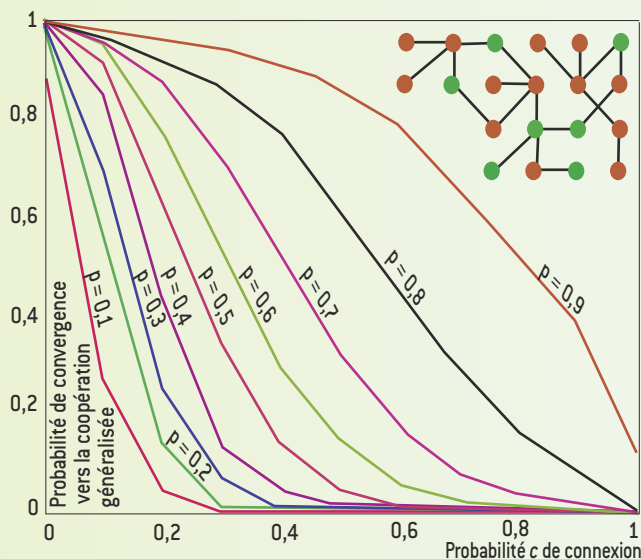


La convergence n'a pas systématiquement lieu vers un état général de coopération ou d'agressivité : dans certaines évolutions les deux types de communautés coexistent. Un autre type de situation se produit parfois : l'évolution vers un état à évolution périodique. Un exemple est décrit ici avec une grille 10×10 , initialisée comme indiqué en (a). Nous obtenons, après 510 générations, une situation périodique dont la période semble de 22 étapes. Le total des individus coopérants oscille sur 22 générations (b) comme celui, complémentaire, des individus agressifs. Une variation des gains totaux en résulte, elle aussi périodique sur 22 générations.

La partie du graphe où se produit l'oscillation (entourée sur le schéma a) est le théâtre d'un subtil phénomène de battement. Au bout de 22 étapes, la situation n'est pas reproduite exactement, mais symétriquement par rapport à une droite oblique (en bleu). Il faut donc, en réalité, 44 étapes pour revenir à la situation de départ. On remarque

que le sous-graphe des communautés non vides qui donne le cycle possède une structure particulière : chaque communauté coopérante est en contact avec plusieurs communautés coopérantes, mais n'est en contact qu'avec une seule communauté agressive. De plus, chaque communauté agressive n'a qu'un seul contact, bien sûr avec une communauté coopérante qu'elle exploite.

Pendant la première moitié de la période, le deuxième nœud de la première ligne grossit au détriment du gros nœud vert de la génération 510. Celui-ci disparaît presque, ce qui fait fondre le gros nœud rouge. Le groupe central des trois communautés vertes bénéficie alors d'une certaine tranquillité amenant l'expansion d'un nouveau gros nœud vert (symétrique du précédent). Tous les autres nœuds ont évolué symétriquement conduisant à une génération 532 parfaitement symétrique de la génération 510 par rapport à la droite bleue. Cette configuration ramènera, 22 étapes plus loin, au schéma de la génération 510.



5. Résultats des graphes aléatoires

Nous engendrons des graphes aléatoires de 20 nœuds. Pour cela nous plaçons sur chaque nœud une communauté coopérante ou agressive en tirant au hasard : on place une communauté coopérante avec une probabilité p ou une communauté agressive avec une probabilité complémentaire $1 - p$. Les liens entre nœuds du graphe sont aussi choisis au hasard : deux nœuds sont connectés avec une probabilité c : si c est petit, la connectivité du graphe est faible, si c est grand, le graphe comporte de nombreux liens. Nous mesurons alors la probabilité d'évoluer vers un état de coopération généralisée.

Pour une valeur de p (indiquée sur les courbes), plus la connectivité c est grande, plus faible est la probabilité que le graphe évolue vers un état de coopération généralisée. Lorsque p augmente, la probabilité d'évoluer vers un état de coopération généralisée augmente (d'où la succession de courbes de plus en plus hautes).

Nous avons mené une étude statistique de ce type de « monde » sur un graphe en grille de 100 nœuds : chaque nœud est relié à ses huit voisins (horizontaux, verticaux, en diagonal), les bords se rejoignant (grille en forme de tore). On place au hasard des communautés sur les nœuds en faisant varier la proportion p de nœuds occupés par des communautés coopérantes.

Si la proportion initiale p de communautés coopérantes est supérieure à 80 pour cent, alors, dans plus de 95 pour cent des cas, il ne restera au final pratiquement que des coopérants : le monde converge en quelques générations vers un univers de coopération généralisée. Au-dessous de 20 pour cent de communautés coopérantes initiales, l'évolution conduit presque certainement à un monde agressif. Dans un pour cent des essais (p entre 0,4 et 0,7), nous observons des équilibres mixtes où coexistent communautés coopérantes et agressives.

À l'exception de ces équilibres mixtes, la dynamique générale d'évolution est claire : (a) les zones où seuls des individus agressifs sont en contact dépérissent ou ne réussissent pas à croître ; (b) dans les zones où les deux types d'individus se rencontrent, les coopérants disparaissent au profit des agressifs ; (c) les zones où des coopérants ne rencontrent que des coopérants prospèrent. La première phase de l'évolution est une course entre agressifs des zones (b) et coopérants des zones (c) s'il y en a. Cependant, quel que soit l'avantage obtenu par les premiers, s'il y a des individus dans les zones (c), ils finissent par s'imposer et la population finale est composée essentiellement d'individus coopérants localisés dans les zones (c). Bien sûr, en l'absence de zones de type (c), le monde converge vers une guerre généralisée. Un critère permet ainsi de prévoir l'évolution avec un risque d'erreur limité : s'il existe un nœud coopérant protégé (c'est-à-dire en contact seulement avec des nœuds coopérants) alors le monde convergera vers un état de coopération généralisé ; sinon, le monde s'orientera vers un état désastreux d'agressivité tous azimuts.

Les cas d'évolution vers des configurations mixtes échappent à ce schéma. L'un d'eux, décrit sur la figure 4, révèle une complexité inattendue permettant la coexistence dans des conditions subtiles d'équilibre périodique des deux types de communautés dont les effectifs ne se stabilisent jamais.

Erdős-Renyi ou Petit monde ?

Sur une grille, chaque nœud est lié à huit voisins (connectivité 8) et il est probable que cette valeur de la connectivité joue un rôle important. Aussi avons-nous engendré systématiquement des graphes aléatoires dont un exemple et ses conclusions sont indiqués sur la figure 5. Récemment, de nombreux travaux ont montré que les graphes qu'on rencontre dans le monde réel ressemblent rarement aux graphes aléatoires de Erdős-Renyi. Les graphes du monde réel, graphes des liaisons ferroviaires, graphes décrivant les liens entre pages web, graphes des réseaux sociaux, sont en général beaucoup plus contrastés : le nombre de connexions d'un nœud aux autres varie fortement, conduisant en particulier à des nœuds, nommés « hub », qui centralisent un nombre de liens très supérieurs à la connectivité moyenne du graphe. Ces graphes réels, nommés *Petit monde*, ont certaines bon-

nes propriétés : faible distance moyenne entre nœuds, résistance aux pannes, etc. Il est naturel de s'interroger sur leurs capacités à susciter des équilibres coopératifs.

Les expériences donnent un résultat sans appel : pour un nombre donné de nœuds et de liens entre les nœuds et une même proportion initiale de communautés coopérantes, l'évolution sur un graphe de type *Petit monde* conduit plus fréquemment à une situation d'agressivité généralisée que sur un graphe de type Erdős-Renyi. La raison en est sans doute que la structure de *Petit monde* facilite la domination des communautés agressives et nuit à l'existence de nœuds coopérants protégés : des phénomènes sociaux (comme la diffusion rapide d'informations) sont facilités par l'existence des centres dominateurs, mais ils empêchent l'apparition et le maintien d'équilibres efficaces qui ne naissent et ne prospèrent que si certains nœuds se trouvent dans un certain isolement.

Les réseaux de communautés envisagés ici, du fait de leurs simplicités, ne permettent pas de modéliser la formation de groupes fermés et hostiles entre eux (espèces animales, sectes, pays ennemis, etc.) qui sont importants aussi bien dans le monde vivant que social.

Pour modéliser les dynamiques de ces groupes, une méthode consiste à définir deux sortes (ou plus) d'individus capables de se reconnaître : les A et les B. Les A coopèrent avec les A et agressent systématiquement les B. Les B coopèrent avec les B et agressent les A. Partant d'une configuration aléatoire de A et de B placée sur une grille, on assiste à la formation de groupes coopérants composés uniquement de A et de groupes coopérants composés uniquement de B. Ces groupes, bien sûr, se combattent farouchement à leurs frontières, créant des zones désertifiées.

Cette émergence de la coopération « par solidarité de groupes » (récemment étudiée par D. Hruschka et J. Henrich) s'ajoute à l'émergence de la coopération résultant des stratégies réactives du type *donnant-donnant*, et à l'émergence de la coopération du fait des phénomènes que le modèle des réseaux de communautés met en évidence.

Ainsi l'expérimentation informatique aide à découvrir et à comprendre les nombreuses mécaniques collectives dont les groupes d'individus des mondes vivants, sociaux et économiques sont le théâtre et dont l'élucidation détaillée ne peut se passer des simulations réalisées grâce aux calculs massifs que les ordinateurs d'aujourd'hui autorisent.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université de Lille. Rémi DORAT est doctorant au LIFL [CNRS].

R. DORAT et J.-P. DELAHAYE, *Émergence et maintien de comportements coopératifs dans un modèle de communautés en réseau*, Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille [LIFL], 2006, <http://www.lifl.fr/SMAC/>
J. BRIFFAUT, *Mémoire de DEA*, LIFL, 2004.

D. HRUSCHKA et J. HENRICH, *Friendship. Cliquiness and the emergence of cooperation*, in *Journal of Theoretical Biology*, 239, pp. 1-15, 2006.

R. AXELROD, *The evolution of cooperation*, Basic Book, New York, 1984.

M. NOWAK et R. MAY, *Evolutionary games and spacial chaos*, in *Nature*, 359, pp. 826-829, 29 octobre 1992.

S. BOWLES et H. GINTIS, *Optimal parochialism : The dynamics of trust and exclusion in Network*, 2000 : Santa-Fee Working Paper <http://www.santa-fee.edu/research/publications/wpabstract/200003017>