

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 Jérémie 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.

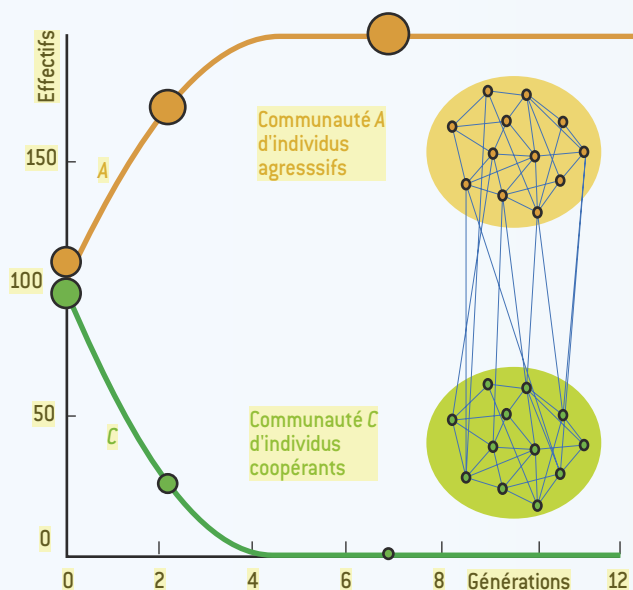
Ce système de rétribution du *dilemme du prisonnier* justifie l'utilisation des adjectifs coopérant et agressif. Il n'incite pas à la coopération, et bien pire, avec ces règles, l'individu agressif gagne plus de points, quel que soit l'individu rencontré :

(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 aggressive l'emporte rapidement et détruit l'autre, la « culture aggressive » absorbe la « culture coopérante ». Le monde résultant fonctionne plutôt médiocrement puisque les interactions entre survivants sont toutes de type aggressive contre aggressive, 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 aggressive (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).

Graphe 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.