

Imiter à dix mille les jeux spatiaux

Parmi les divers principes susceptibles de modéliser les choix de comportements des individus, les interactions mimétiques sont souvent évoquées. D'une façon générale, étant donnée la finitude de l'expérience, l'imitation est un moyen privilégié pour des individus similaires, d'étendre leur expérience par celles des autres en imitant les stratégies qui leur semblent bonnes (Bourgine 1994). Dans cette section, nous étudions autour d'un exemple minimal, les phénomènes caractéristiques qui apparaissent au sein de populations d'agents mimétiques simples, dans une situation de dilemme du prisonnier. Ceci nous permet, d'une part, de nous familiariser avec une classe de modèles qui nous servira d'exemple prototypique tout au long de cet ouvrage ; d'autre part, d'aborder la question plus générale de l'influence du réseau social sur l'émergence de structures dans des situations de jeu.

I.2.A. Jeux évolutionnistes et chaos spatial

Si vous avez déjà assisté à un match de foot, ne serait-ce qu'à la télé, vous avez certainement été témoin du phénomène de hola après un but décisif : chacun lève les bras en imitant son voisin avec un petit décalage, ce qui engendre des vagues humaines dans le public. La hola est l'effet visible et macroscopique d'une diffusion de comportements d'origine imitative.

Que se passe-t-il si au lieu d'assister à un match de foot, des agents imitateurs jouent à un dilemme du prisonnier ? Axelrod posa brièvement la question dans son livre *The Evolution of Cooperation* (1984), que Nowak et May ont repris et développé dans un article intitulé *Evolutionary Games and Spatial Chaos* (1992*). Ils y mettent en évidence des phénomènes de diffusion de comportements coopérateurs dans des populations d'agents mimétiques sans mémoire. Nous allons prendre ce modèle comme exemple paradigmatique de modélisation de phénomènes mimétiques. Bien que de nombreux développements aient depuis été proposés, élargissant considérablement la portée de telles études, sa simplicité va nous permettre de saisir une méthodologie et d'appréhender le type de phénomènes que ce genre de modélisation permet d'approcher.

Prenons un échiquier dont les côtés comportent N cases, et faisons correspondre les bords deux à deux en les recollant. Nous obtenons ainsi une grille torique, sorte de grosse bouée quadrillée. Sur chaque case, plaçons un joueur qui interagit avec ses huit voisins dans le cadre d'un dilemme du prisonnier (cette structure est appelée voisinage de Von Neumann),

chaque agent jouant également contre lui-même⁴. Dotons ces joueurs de comportements très simples. Ceux-ci sont monolithiques : à chaque séance de jeu (appelée période), un joueur oppose à tous ses voisins le même comportement, qui, pour garder les notations déjà introduites, est noté *C* (coopération) ou *D* (défection). Après chaque période, un joueur se voit donc attribuer un gain qui est la somme des gains obtenus au cours des neuf interactions deux à deux (auto-interaction incluse). Entre deux périodes, les agents ont l'opportunité de changer de comportements suivant une règle d'imitation indexée sur les gains : à la fin de chaque période, chaque joueur compare ses propres gains aux gains qu'ont obtenus ses huit voisins, puis choisit d'adopter à la période suivante le comportement qui a connu le plus de succès en terme de gains. Cela signifie que si un joueur *A* a obtenu le gain le plus important localement, il ne changera rien à son comportement à la période suivante. Par contre, si l'un de ses voisins a un gain strictement supérieur à tous les autres, il va l'imiter.

Cette configuration de jeu correspond à la situation évoquée précédemment de *provisions de biens publics* avec une composante spatiale. Donnons un exemple :

- **Pompage des eaux souterraines** : si des agriculteurs se fournissent en eau en pompant les nappes phréatiques, l'extraction d'eau par l'un d'eux peut avoir, dans certaines configurations géologiques, un impact négatif sur les réserves de ses voisins. En cas de sécheresse, la nappe phréatique risque d'être épuisée par de trop forts tirages. L'intérêt collectif serait que chacun limite sa consommation d'eau afin d'éviter l'épuisement de la nappe. D'un autre côté, l'intérêt de chacun est d'utiliser l'eau en quantité optimale pour les récoltes ou le bétail, et éventuellement de faire des réserves pour le cas où l'eau viendrait à manquer. Ce comportement risque de provoquer inévitablement l'assèchement de la nappe. Dans ce cas encore, le comportement d'un agent a un impact sur l'environnement de tous ses voisins, sans discrimination.

Nous avons vu que la modélisation d'une situation de dilemme du prisonnier nécessite l'attribution des différentes valeurs de gains. La première chose qui va nous intéresser est la dépendance des comportements collectifs par rapport à ces gains (impact de la nature des sols ou des rendements sur les comportements collectifs). La matrice du dilemme du prisonnier est déterminée par la donnée de quatre valeurs *T*, *R*, *S* et *P*, mais on montre théoriquement que ce

⁴ Selon les auteurs, cette hypothèse pourrait illustrer le cas où les joueurs sont pensés comme des groupes organisés occupant le territoire. Dans l'article original, les auteurs précisent que les comportements qualitatifs sont les mêmes si l'on supprime cette hypothèse.

problème se décrit d'une manière tout aussi générale avec seulement deux paramètres. Ceci fait, pour simplifier autant que possible l'étude du problème, nous pouvons chercher une paramétrisation particulière de la matrice qui couvre l'ensemble des dynamiques collectives intéressantes. Ainsi Nowak et May ont proposé de prendre⁵ $R=1$, $S=P=0$ et de faire varier $T>1$. La matrice du jeu à deux joueurs prend alors la forme suivante:

Joueur B → ↓ Joueur A	B joue C	B joue D
A joue C	A et B gagnent 1	A gagne 0 et B gagne T
A joue D	A gagne T et B gagne 0	A et B gagnent 0

Comme chacun joue contre ses huit voisins plus lui-même, le gain d'un joueur A à la fin d'une période est donné par :

- s'il a joué C : $g_C = 1 + (\text{nombre de ses voisins qui ont coopéré})$
- S'il a joué D : $g_D = T + T \cdot (\text{nombre de voisins qui ont coopéré})$

Comme $T>1$, la défection rapporte toujours plus que la coopération. Cependant si tout le monde joue D, les gains individuels sont nuls. Ce jeu-là n'est pas exactement un dilemme du prisonnier étant donné que la condition $P>S$ est violée. Cependant, les auteurs indiquent que les comportements collectifs sont les mêmes si l'on choisit P non nul mais très petit devant 1 ($P \ll 1$).

Revenons à notre problème. Une fois posé le cadre de travail, l'idée est d'étudier la dépendance des comportements collectifs sur l'échiquier torique en fonction de T , lorsque les interactions sont répétées un grand nombre de fois. Pour cela, il faut choisir une certaine configuration initiale des joueurs (une répartition de C et de D sur l'échiquier) et regarder comment le jeu évolue. Il est important de comprendre que nous ne nous intéressons en aucun cas aux comportements des agents à titre individuel. Nous ne cherchons pas à savoir si un certain agent va jouer C ou D. Nous allons étudier l'évolution spatio-temporelle des structures formées par des groupes défecteurs et coopérateurs. Rappelons qu'ici les agents imitent d'une période sur l'autre le voisin qui a connu le plus de succès.

⁵ Dans l'article original, le paramètre T est noté b . Nous avons choisi de garder les notations précédentes pour plus de clarté.

Les résultats de Nowak et May sont les suivants. La dynamique globale du jeu dépend du paramètre T , et change de nature au cours de transitions discrètes pour différentes valeurs de ce paramètre. L'essentiel peut être résumé de la façon suivante :

- Si $T > 2$, la dynamique du jeu converge vers un état du système figé où généralement les défecteurs sont prédominants. Par ailleurs, s'il y a initialement autant de coopérateurs que de défecteurs répartis au hasard sur l'échiquier (conditions initiales aléatoires uniformes), l'état final sera généralement entièrement défecteurs.
- Si $T < 1.8$, la dynamique du jeu converge vers un état figé où généralement les coopérateurs sont dominants. Par ailleurs, si les conditions initiales sont prises aléatoires uniformes, l'état final sera caractérisé par une large majorité de coopérateurs (Figure 4).
- Pour $1.8 \leq T \leq 2$, la dynamique est particulièrement intéressante. On peut observer un régime chaotique présentant des évolutions spatio-temporelles de groupes défecteurs et coopérateurs. Dans cette région, aucun des deux comportements ne s'impose, et le paysage sur l'échiquier ne cesse de changer (Figure 5). Fait remarquable, le taux de coopération atteint un niveau proche de 30%, et reste stable sur le long terme (Figure 6), ce quelle que soit la condition initiale. De plus, si les conditions initiales sont symétriques, comme par exemple la présence d'un pavé de défecteurs sur un échiquier entièrement coopérateur, le système engendre des figures géométriques assez jolies et sans cesse changeantes, que les auteurs ont appelées kaléidoscopes évolutionnaires (Figure 7).



Figure 4 : Etat final caractéristique de l'échiquier lorsque $T < 1.8$. Chaque petit carré représente un agent. Les carrés noirs correspondent à des agents défecteurs, les carrés gris clair à des agents coopérateurs. La figure est statique. Les conditions initiales ici sont aléatoires uniformes. Des îlots défecteurs arrivent à se maintenir en profitant des coopérateurs avoisinants.



Figure 5 : Structures spatio-temporelles émergentes caractéristiques de la zone $1.8 \leq T \leq 2$. Les groupes de défecteurs (en noir), et de coopérateurs (en blanc), ne cessent de se déplacer en changeant de forme. Les conditions initiales ici sont aléatoires uniformes.

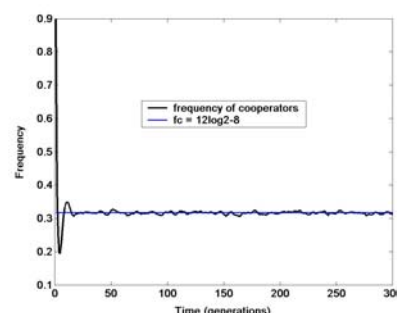


Figure 6 : Evolution du taux de coopération au cours du temps dans le régime chaotique. La courbe correspond à une simulation avec 40 000 agents. La droite horizontale est la proportion asymptotique de coopérateurs telle qu'elle est estimée par Nowak et May 1992 : $fc = 12\log 2 - 8$.

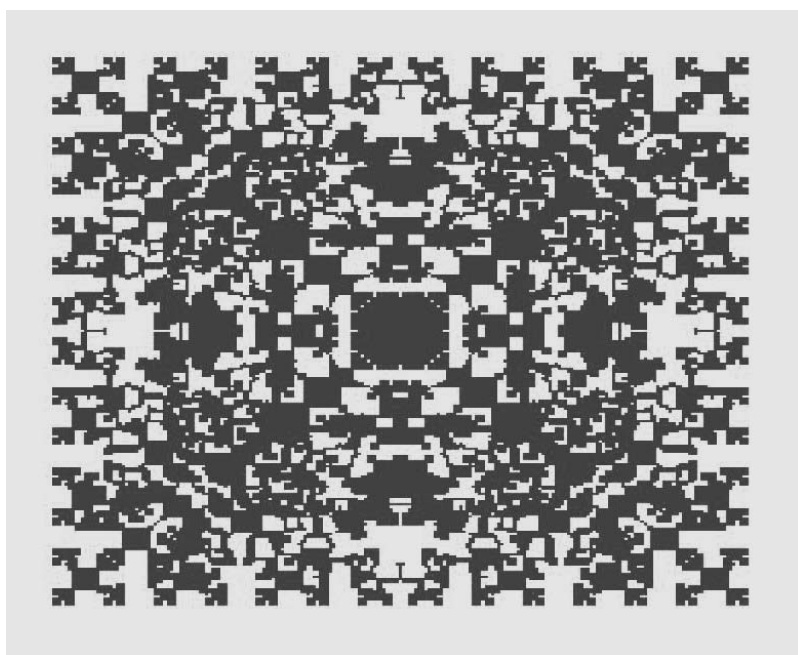


Figure 7 : Les quatre dragons. Exemple de structure spatiale caractéristique de la zone $1.8 \leq T \leq 2$ lorsque l'on met initialement un pavé de défecteurs au milieu d'un échiquier de coopérateurs (conditions initiales symétriques avec 90 000 agents). La figure ne cesse d'évoluer tout en conservant des symétries. Les zones noires correspondent à des agents défecteurs.

A propos de ces images

Ces images ont été obtenues à l'aide d'une plate-forme multi-agents que nous avons élaborée et qui nous servira à plusieurs reprises pour simuler des systèmes dynamiques. Les résultats de Nowak et May, tels qu'ils ont été présentés dans l'article de 1992, sont ici correctement reproduits. Nous rappelons enfin que la grille est ici torique, les bords des carrés se faisant face se correspondent.

AUX ORIGINES DU CHAOS

Suite à leur premier article dans *Nature*, Nowak et May ont donné dans un article de 1993, *The Spatial Dilemmas of Evolution*, quelques explications techniques sur l'émergence de structures observées dans leur modèle. Nous en donnons ici les principaux résultats, ce qui nous permettra de comprendre le comportement de leur modèle dans le régime chaotique.

La première chose à remarquer est que la dynamique est contrôlée par un unique paramètre T . Une fois celui-ci fixé, la somme totale des gains d'un agent ne peut prendre que des valeurs discrètes. Ceci implique que les changements de dynamique s'effectueront pour des valeurs discrètes de T . Pour comprendre comment celles-ci sont calculées, il faut regarder ce qui se passe à la frontière entre un groupe de coopérateurs et un groupe de défecteurs.

Considérons par exemple un groupe de défecteurs de taille 5×5 cerné de coopérateurs, et regardons les différentes valeurs de gains possibles (la frontière est en blanc sur la figure 8). Le gain des agents défecteurs situés au centre du cluster (en gris) est nul car ils n'interagissent qu'avec des défecteurs. Par contre, le long de la frontière, le gain des défecteurs varie en fonction du nombre de voisins coopérateurs. Nous voyons que les agents situés dans les coins sont les plus avantagés et gagnent $5 \times T$ alors que les agents défecteurs situés sur une arête ne gagnent que $3 \times T$. Du côté des coopérateurs, les agents situés dans les angles n'ont qu'un seul voisin défecteur, ils gagnent donc 8 (en prenant en compte l'auto-interaction), ceux à proximité d'un coin ont deux voisins défecteurs et gagnent donc 7, ceux situés sur une arête ont trois voisins défecteurs et gagnent donc 6. Tous les coopérateurs ont pour voisins des agents coopérateurs, qui sont à l'intérieur d'un cluster, et gagnent donc 9. Les coopérateurs situés sur la frontière vont donc changer de comportements si et seulement si le gain d'un de leurs voisins défecteurs est supérieur à 9. Ceci nous donne les règles de transition suivantes en fonction de la valeur de T pour les coopérateurs sur le pourtour du cluster :

$5T > 9$: les quatre coopérateurs de chaque coin deviennent défecteurs.

$3T > 9$: les coopérateurs situés au milieu de chaque arête deviennent défecteurs.

De façon similaire des inégalités déterminent le comportement des défecteurs :

$5T < 8$: les défecteurs situés aux quatre coins du cluster deviennent coopérateurs.

$5T < 7$: les défecteurs à proximité de chaque coin deviennent coopérateurs.

$3T < 6$: les défecteurs au milieu de chaque arête deviennent coopérateurs.

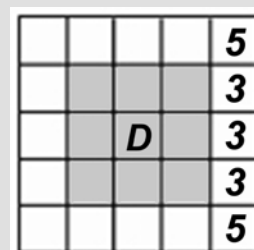


Figure 8 : cluster de défecteur 5×5 entouré de coopérateurs. Les coins ont 5 voisins coopérateurs alors que les arêtes n'en ont que 3.

Nous voyons donc par exemple que si $5T > 9$ et $3T < 6$, un cluster de défecteurs de taille 5×5 ou plus grandit dans les coins et se rétrécit au milieu de ses arêtes. Ces valeurs de paramètre correspondent exactement à la zone chaotique donnée par Nowak et May : $5/9 < T < 2$. Une analyse similaire des différentes configurations possibles pour $1 < T < 3$, donne les valeurs suivantes correspondant à des transitions de dynamique : $9/8, 8/7, 7/6, 6/5, 5/4, 9/7, 8/6, 7/5, 6/4, 8/5, 5/3, 7/4, 9/5, 2, 9/4, 7/3, 5/2, 8/3$. Cependant, comme nous l'avons évoqué, l'ensemble des dynamiques possibles peut se classer en trois catégories en fonction de la position de T par rapport à $9/5$ et 2. Il est intéressant de voir que la simple étude des conditions de croissance d'un cluster de défecteurs nous donne les principales contraintes sur la dynamique.

Plus remarquable encore, une modélisation relativement grossière de la croissance d'un tel cluster sur une grille infinie de coopérateurs permet aux auteurs d'obtenir une estimation assez précise du taux de coopération à l'équilibre. Leur démarche consiste à considérer la structure engendrée par un unique défecteur envahissant un réseau de coopérateurs. Supposons qu'au temps t^n , il existe un carré de défecteurs de taille $(2^{n+1}+1)^2$ et négligeons le fait qu'il y a en fait beaucoup de clusters de coopérateurs à l'intérieur de ce carré pour $t > 32$. Supposons maintenant que ce carré croisse en ses coins et se rétrécisse le long de ses arrêtes pour former quatre petits carrés aux coins et un grand carré au centre (cf figure 9). Supposons maintenant que ce mode de croissance simplifié se poursuive, c'est-à-dire que les petits carrés dans les coins continuent à croître, tandis que le grand carré du milieu se rétrécit. Ce faisant, nous négligeons le fait que les petits carrés ne croissent que dans leurs coins et se rétrécissent sur leurs bords. Sous ces hypothèses, le nombre de défecteurs à la génération $t+i$ avec $t=2^n$ et $0 \leq i \leq t$ est donné par :

$$N_D = (2t+2i+1)^2 - 8i(2t-2i-1)$$

la fraction de coopérateurs à l'intérieur du carré de taille $(2t+2i+1)^2$ au temps $t+i$ est donc : $x(t+i) = 8i(2t-2i-1)/(2t+2i+1)^2$. Lorsque t est grand nous pouvons faire l'approximation $x(t+i) = 4i(t-i)/(t+i)^2$. Ceci décrit les oscillations dont la période ne cesse de croître, $x(t+i)$ atteignant son minimum pour $t=2^n$, et son maximum pour $i=t/3$. La moyenne temporelle du taux de coopérateurs sur un cycle est donnée par :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{t} \sum_{i=0}^t \frac{4i(t-i)}{(t+i)^2} \approx 4 \int_0^1 \frac{s(1-s)}{(1+s)^2} ds = 12 \log 2 - 8 = 0.3178...$$

Ceci est relativement proche du taux moyen de coopération qu'obtiennent les auteurs par l'intermédiaire de simulations numériques, que nous avons évalué à 0.3152.

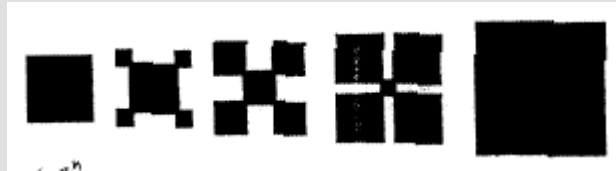


Figure 9 : Évolution simplifiée de la croissance d'un cluster de défecteurs (Nowak & May 1993)

Nous pouvons comprendre intuitivement d'après cette étude, l'origine du chaos spatial observé par Nowak et May. Du fait de la discrétisation de l'espace, il est possible de catégoriser localement les différentes formes possibles de frontière : coin, bords droits, diagonales, etc. En fonction des valeurs des paramètres de la matrice de jeu, ces différentes formes de frontière peuvent se classer en trois catégories : les bords élémentaires qui sont favorables à l'expansion de la coopération, ceux qui sont favorables à l'expansion de la défection et les bords de frontière stables. Les frontières d'un ensemble donné peuvent se voir comme le recollement d'éléments appartenant à l'une de ces trois catégories. Dans le régime chaotique, pratiquement toute forme est un recollement d'un ensemble de bords élémentaires qui est d'intersection non vide avec les deux premières catégories : sur une forme donnée, il y a toujours une zone où la coopération est en expansion, et une zone où elle perd du terrain. Ainsi, les frontières entre la zone de coopération et zone de défection sont perpétuellement mobiles. Le chaos a donc une origine intrinsèquement spatiale.

Il est possible d'étudier de la même manière l'évolution des clusters de coopérateurs ou de défecteurs de manière générale lorsque les paramètres de la matrice 2×2 qui définissent le jeu sont quelconques (Hauert 2001*). L'auteur a classifié les différentes dynamiques possibles en fonction d'une approximation fondée sur l'étude de l'évolution de clusters de petite taille. Les résultats de son étude analytique et computationnelle sont synthétisés par la figure 10. La paramétrisation de la matrice de jeu considérée par l'auteur est légèrement différente de celle de Nowak et May, ce qui ne change rien aux résultats. Plus précisément, l'auteur a fixé R et P respectivement à 1 et 0, et a fait varier T et S . Ainsi, la zone correspondant à un dilemme du prisonnier est déterminée par la condition $T > 1$ et $S < 0$. Nous pouvons voir sur la figure que la zone concernée par le dilemme du prisonnier exclut pratiquement totalement des dynamiques de type chaotique (sous-ensemble des zones grisées). Ceci est encore plus marqué si on enlève l'auto-interaction.

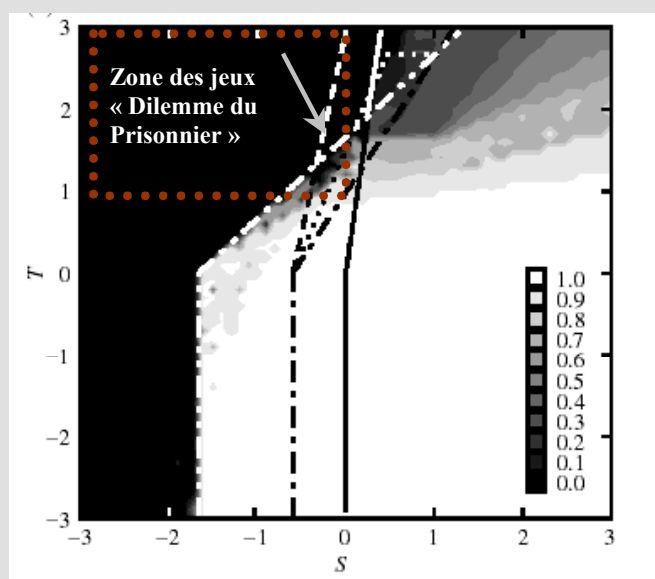


Figure 10 : Proportions moyennes de coopérateurs trouvées par simulations dans un jeu défini par $R=1$, $P=0$, T et S , avec une structure de voisinages de Von Neumann et auto-interaction (source : Hauert 2001*). Les conditions initiales consistent en 20 % de coopérateurs répartis aléatoirement sur une grille 49×49 . Le niveau de coopération à l'équilibre augmente de 0 % à 100 % lorsque l'on passe du noir au blanc. Les pointillés désignent les lignes de transition de dynamiques trouvées analytiquement par l'auteur, le carré délimité sur la figure par les pointillés en haut à gauche a été ajouté pour indiquer l'espace des paramètres définissant un dilemme du prisonnier. On peut constater que cette zone est entièrement noire à l'exception du coin inférieur droit. La coopération ne peut donc pas se maintenir dans une configuration de dilemme du prisonnier, excepté dans les situations où le dilemme est de très faible intensité. La flèche grise (ajoutée également) indique le point équivalent au paramètre standard $T=5$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$, qui se trouve dans une zone noire.

I.2.B Le chaos est-il robuste ?

Dans leur article *Evolutionary Games and Spatial Chaos* (1992*), Nowak et May proposent le modèle du dilemme du prisonnier spatial comme métaphore pour l'étude de l'évolution et du maintien des comportements coopératifs. Contrairement aux modèles proposés auparavant, les agents qu'ils considèrent sont extrêmement simples, n'ont pas de mémoire, ne forment pas d'anticipation, et néanmoins parviennent collectivement à maintenir un niveau appréciable de coopération dans une certaine zone de paramètres ($1.8 < T \leq 2$). De plus, fait remarquable, dans cette zone le taux moyen de coopération sur le long terme est indépendant des conditions initiales choisies, ce qui permet aux auteurs d'avancer l'hypothèse qu'il existerait une constante universelle définissant le taux moyen de coopération dans de tels réseaux. L'idée sous-jacente est que le caractère spatial des interactions dans ce jeu, qui est également prédominant dans la vie réelle, est un facteur qui pourrait être suffisamment fort pour expliquer l'émergence de régularités et de structures coopératives à grande échelle. Ainsi, la coopération et la structuration des groupes sociaux serait en partie expliquée par des phénomènes qui ne tiennent nullement d'une rationalité particulière, mais plutôt d'une structure d'interaction.

Pour voir si le modèle que nous venons d'étudier est une bonne illustration de cette idée, quelques vérifications sont nécessaires pour tester la robustesse des phénomènes observés vis-à-vis des conditions extérieures. Comprenons bien où se situe le débat. Une des caractéristiques de la coopération humaine est qu'elle apparaît sous un ensemble très vaste de conditions environnementales. Quelle que soit la manière dont sont modélisées les conditions environnementales (dans le cas du dilemme du prisonnier elles sont schématisées par les quatre valeurs P , R , S et T), il faut donc s'assurer que les phénomènes de coopération que l'on observe apparaissent également pour un grand nombre de conditions environnementales artificielles. A quoi servirait une explication de la coopération humaine qui ne marcherait que lorsque la température ambiante est comprise entre 20 et 22°C?

Dans leur article de *Nature*, Nowak et May annoncent avoir testé la robustesse des phénomènes de type chaos spatial pour différents types de voisinages (interactions avec seulement quatre voisins), pour des jeux sans auto-interaction, et pour de faibles valeurs de P . Mais nous avons vu que l'exemple standard du dilemme du prisonnier correspond aux valeurs

$T=5$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$ ce qui, traduit dans les termes des auteurs, correspond à $T=5/3=1.66$ et $P=1/3$. Qu'en est-il donc, si tout en gardant $P=1/3$, nous examinons la dépendance de la dynamique vis-à-vis du paramètre T ? L'étude que nous avons menée aboutit aux conclusions suivantes : le type de dynamique qui précisément fait l'intérêt du modèle de Nowak et May disparaît ! Pour une valeur bien déterminée de T , la dynamique passe brutalement d'une zone où la population finale est principalement constituée de coopérateurs, à une zone où la population finale est principalement constituée de défecteurs. De plus, la transition entre ces deux types de dynamique intervient pour une valeur très faible de T (autour de 1.1 lorsqu'il n'y a pas auto-interaction). Nous retombons donc sur des dynamiques qui d'une part, aboutissent à des équilibres quasiment homogènes, ce qui est plutôt déplaisant étant donné les observations empiriques, et d'autre part, ne favorisent la coopération que pour des zones de paramètres correspondant à des dilemmes sociaux de très faible intensité (cf. Figure 11).

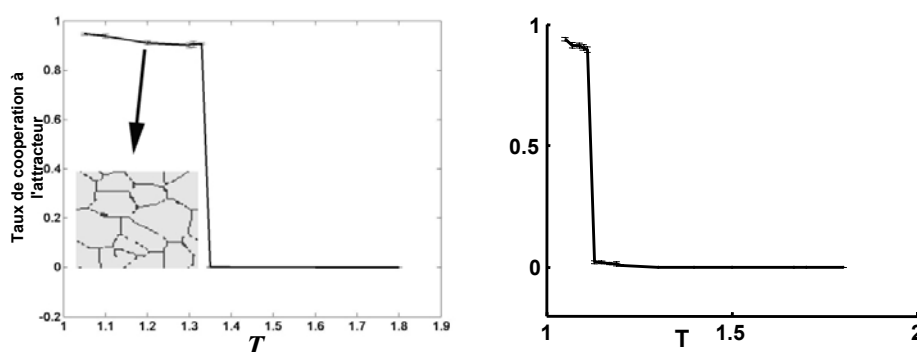


Figure 11 : Evolution du taux de coopération en fonction de T . Nous avons ici $P=1/3$, $R=1$ et $S=0$. Ceci étant, pour $T=5/3$, la matrice de jeu est proportionnelle à celle du dilemme du prisonnier standard ($T=5$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$) et définit donc le même jeu. À gauche, la dépendance du taux de coopération à l'équilibre en fonction de T lorsque l'on considère le jeu avec auto-interaction. Un changement de type de dynamique s'effectue autour de la valeur $T=1.33$. À droite, le même jeu, mais sans l'auto-interaction. La coopération a beaucoup moins de succès, la transition s'effectuant autour de $T=1.1$. Dans les deux cas, l'état final est soit globalement défecteur, soit globalement coopérateur. La dynamique chaotique n'existe plus.

Bien sûr, ce modèle est la première ébauche d'une longue série de modèles spatiaux, et le but des auteurs, tel qu'ils l'ont présenté par la suite (Nowak et al. 1994a*), n'était pas tant d'expliquer l'émergence ou la stabilisation de phénomènes coopératifs, que de montrer comment la spatialisation d'un jeu pouvait engendrer des dynamiques spatio-temporelles complexes, bien que les agents n'aient aucune mémoire. Depuis ces premiers travaux, l'étude de l'émergence et de la stabilité de la coopération dans les jeux spatiaux s'est incroyablement développée. Une synthèse des premiers travaux sur ce sujet pourra être trouvée dans Nowak et

al. 1994a* & b* et une synthèse de travaux plus récents se trouve dans Nowak et Sigmund 2000*. Sans prétendre être exhaustif, nous pouvons diviser, en première approche, l'ensemble de ces études en trois catégories :

La première contient les modèles qui ont conservé l'espace des stratégies de Nowak et May (deux stratégies et pas de mémoire) et ont regardé l'influence de la topologie du réseau (Nowak et al. 1994a*, Masuda & Aihara 2003*, Duràn & Mulet 2003*), de la forme d'imitation (Szilagyi 2003*) (i.e. des alternatives à la règle 'copie l'agent le plus riche'. Ces fonctions de transitions peuvent être vues selon les cas comme une méta-stratégie ou une fonction de sélection), l'influence de la matrice de jeu (Hauert 2001*), les temps de mise à jour (Huberman et Glance, 1993*)

Dans la deuxième catégorie d'extensions, les modèles reprennent certaines variations proposées dans la première mais considèrent un espace de stratégies plus étendu (Ebel & Bornholdt 2002*, Lindgren and Johansson 2002*, Lindgren 1995*, Ferrière & Michod 1999*).

Enfin, la dernière catégorie complexifie l'environnement des agents et les opportunités d'action et, en ce sens, change profondément les données du jeu. Les agents peuvent par exemple interagir de façon répétée (Nakamaru et al. 1997*), choisir leurs voisinages en créant ou détruisant des liens (Zimmermann 2001*), se déplacer (Epstein 1997*), se reproduire sélectivement (Koeslag 2003*) ou choisir entre jouer seul ou jouer collectivement (Michor & Nowak 2002*).

Les modèles appartenant à la première catégorie ont affiné la première ébauche tracée par Nowak et May. Ils ont montré que les comportements de type chaotique sont très dépendants des paramètres du modèle (mise à jour synchrone ou paramètres de la matrice de jeu). Par ailleurs, les conditions dans lesquelles la coopération peut se maintenir correspondent à des dilemmes sociaux de faible intensité, et à notre connaissance aucun modèle n'a fait état d'émergence de la coopération (invasion de coopérateurs dans une population entièrement composée de défecteurs).

Les modèles de la seconde catégorie, en ouvrant la possibilité d'envisager des stratégies autres que *C* ou *D*, ont du même coup introduit un degré de variations considérable. Grim 1994* a démontré sur ce point un théorème d'indécidabilité. Il s'est posé la question de savoir si, en se donnant un ensemble donné de stratégies possibles, et en gardant la structure d'interaction et d'évolution du modèle de Nowak et May 1992, il était possible de dire si une grille infinie constituée de l'une de ces stratégies pouvait être envahie par un cluster fini,

constitué de certaines des autres stratégies. Il a ainsi montré que cette question est indécidable, c'est-à-dire qu'il n'existe aucun programme qui étant donné une configuration initiale de la grille, peut dire s'il y aura invasion de l'une des nouvelles stratégies. Ceci étant, les résultats obtenus dans ce genre de modèles dépendent nécessairement du sous-ensemble de stratégies considéré, ce qui conditionne la nature des résultats possibles sur l'émergence de maintien de la coopération. Certains modèles de cette catégorie ont toutefois exhibé des structures coopératives stables, même avec des dilemmes sociaux forts, et pour certains, des cas d'émergence de la coopération (Lindgren and Johansson 2002).

Enfin, les modèles de la troisième catégorie n'ont la plupart du temps que la structure spatiale et le thème de la coopération en commun avec le modèle de Nowak et May. Ils confirment cependant l'importance de la prise en compte de l'espace dans l'émergence de structures dans une population d'agents.

Résumé du chapitre I.2

Une des caractéristiques principales de l'imitation est d'introduire une interdépendance forte entre les actions d'individus engagés dans une même activité, ce qui nécessite d'avoir défini au préalable une structure d'interaction entre agents. De ce point de vue, le modèle proposé par Nowak et May (1992*) est un exemple paradigmatique de modélisation des interactions spatialisées. Il montre comment une population d'agents mimétiques simples, agencés sur un réseau carré, peut être le siège de l'émergence de structures coopératives spatio-temporelles d'une complexité sans commune mesure avec celle des entités en interaction. De plus, fait particulièrement intéressant, ces structures exhibent sous certaines conditions des régularités statistiques qui semblent indépendantes du détail des caractéristiques individuelles, comme par exemple, un taux de coopération sur le long terme indépendant des comportements initiaux des acteurs. Nous retrouvons là, l'approche systèmes complexes déjà évoquée au I.1.

Le point important à retenir de cet exemple est l'importance de la prise en compte de la composante spatiale des interactions sur l'issue du jeu étudié.

I.3. La pratique de la modélisation en sciences humaines

Nous avons pu voir au I.1.C.b que l'étude expérimentale des processus de décision des individus en situation d'interaction sociale révèle une hétérogénéité très marquée, celle-ci suggérant la coexistence, dans une même population, de différents types de règles de prises de décision. Nous allons voir à présent quelles ont été, dans la littérature de la modélisation, les différentes approches envisagées pour formaliser de manière générale cette hétérogénéité, et quels types de modèles y sont associés. En particulier, nous chercherons à savoir dans quelle mesure cette hétérogénéité est endogène au système, au sens où elle est déterminée par la dynamique interne des systèmes étudiés.

I.3.A. Modéliser au quotidien

« Nicole, apportez-moi mes pantoufles, et me donnez mon bonnet de nuit »⁶

A-t-elle mal entendu ? Les pantoufles auraient-elles disparu ? Avant même d'avoir obtenu une explication, si Nicole n'apporte pas ses pantoufles à M. Jourdain, celui-ci va certainement rechercher les causes de ce manquement en établissant à partir de ses connaissances sur le monde, les raisons qui ont pu l'amener à n'apporter que le bonnet de nuit. Comme tout un chacun, si les conséquences des actions de M. Jourdain sont en désaccord avec ses attentes ou s'il s'apprête à prendre une décision, M. Jourdain utilisera un modèle du monde, constitué de tout un ensemble de faits et de relations causales, qui lui permettent au jour le jour de comprendre son environnement. Ce modèle, chacun se le construit en fonction de ses expériences, et l'affine en fonction de ses objectifs. Il nous permet de répondre d'une manière plus ou moins efficace à tout un ensemble de questions que nous nous posons sans avoir à en faire une vérification empirique.

Cependant, il est certaines questions qui mettent en jeu un nombre si grand d'éléments, qu'il nous est impossible de les penser ensemble afin de déterminer l'effet de leurs interactions. Il suffit pour s'en convaincre de reprendre l'exemple de la question posée dans la partie I.2, où nous nous sommes intéressés au comportement collectif de plusieurs milliers d'agents imitateurs. C'est pour répondre à ce genre de questions que se sont développées la modélisation mathématique et la modélisation informatique. La première permet de

⁶ M. Jourdain dans *le bourgeois gentilhomme*, Molière.

considérer des descriptions générales d'objets de manière récursive et de dériver les relations qu'elles entretiennent sans avoir à sans cesse dérouler l'ensemble des descriptions dont elles dépendent, la deuxième utilise les immenses capacités représentationnelles de relations logiques des ordinateurs pour reproduire *in sillico* ces interactions.

L'activité de modélisations mathématique et informatique peut avoir plusieurs objectifs qui se situent à des niveaux très différents de la connaissance. Celui qui nous vient le plus facilement à l'esprit est celui de la prédiction d'événements. À l'instar de la météo qui prédit le temps qu'il fera demain, nous pouvons nous attendre, par exemple, à ce qu'un modèle de la fourmilière nous prédise l'effet d'un changement climatique sur sa structure globale, ou qu'un modèle économique nous prédise l'effet de l'application de telle ou telle mesure fiscale sur le taux de chômage en France. Dans ce cas précis, un des usages important de la modélisation est l'exploration d'un nombre important de possibilités dont les tests empiriques seraient très coûteux voire irréalisables (il n'est pas envisageable avant de fixer une taxe, de se donner plusieurs années pour effectuer des essais grandeur nature « juste pour voir»). Cet objectif est sans doute le plus ambitieux que peut se fixer un modélisateur. Il a l'avantage de fournir un critère simple de validation du modèle : la précision de la prédiction. Il y a cependant deux autres objectifs non moins utiles, qui constituent souvent la première étape vers une modélisation de type prédictif.

Le deuxième objectif possible est la modélisation-fonctionnelle. Étant donné une fonction observée dans un système réel, est-il possible de la reproduire avec les outils de la modélisation que sont les mathématiques et le calcul logique ou informatique ? Très proche du premier, il diffère en ce que la plupart du temps il n'est pas recherché une analogie exacte entre les relations qu'entretiennent les différentes parties fonctionnelles du système réel et celles de l'artefact mais une correspondance entre performances globales. Ainsi, pour reprendre l'exemple par lequel nous avons commencé, une modélisation du comportement des fourmis peut avoir pour but de concevoir un système d'agents artificiels capables d'effectuer efficacement des recherches d'informations sur Internet. Dans ce cas, seules les capacités exploratoires de la fourmilière chercheront être reproduites sans nécessairement avoir un aspect prédictif sur le comportement des fourmis. L'objet ainsi modélisé n'a pas nécessairement l'organisation structurelle de l'objet de départ. Pour prendre un exemple plus familier, les premiers hommes volants ont d'abord essayé sans succès de reproduire un oiseau, puis l'oiseau s'est épuré pour devenir un avion, dont la structure est totalement différente d'un

oiseau. Le critère d'évaluation de tels modèles est alors légèrement différent et dépend des capacités du modèle à reproduire la fonction visée.

Enfin, le troisième objectif de la modélisation pourrait être appelé la modélisation-métaphore. Dans ce cas-là, ce qui est visé est la compréhension de comportements qualitatifs des systèmes réels et la découverte de nouveaux types de relations causales. Par exemple, la modélisation de la fourmilière nous apprend qu'il n'est pas nécessaire que la fourmi ait une compréhension de l'activité de sa communauté pour que cette dernière atteigne le degré d'organisation que nous lui connaissons. Sans obligatoirement avoir trouvé les mécanismes véritables de l'organisation d'une fourmilière, le type de modélisation que nous avons évoquée dans notre première section ouvre tout un ensemble d'explications nouvelles vers lesquelles il est désormais possible de diriger la recherche. Ainsi, le modèle de la fourmilière pourra être utilisé comme métaphore pour réfléchir sur des systèmes réels et par-là même, avoir un poids non négligeable dans les heuristiques utilisées pour orienter la recherche. Dans ce cas-là, la pertinence du modèle peut être évaluée à travers l'intérêt des relations causales ou structurelles qu'il met en évidence et sa capacité à reconstruire des faits stylisés.

I.3.A.a. Hasard, nécessité et volonté⁷

La modélisation-fonctionnelle est prise en charge par l'intelligence artificielle. La modélisation des systèmes sociaux relève quant à elle, bien souvent de la modélisation-prédiction ou de la modélisation-métaphore. Cependant, la complexité du social est telle qu'en général, le point d'équilibre se trouve moins du côté de la modélisation-prédiction que de celui de la modélisation-métaphore. En particulier, les modèles que nous allons développer par la suite se situeront clairement du côté de cette dernière. Quoi qu'il en soit, la grande difficulté réside dans le fait que les entités qui composent les systèmes sociaux ont une propriété très obscure pour la modélisation, mais néanmoins déterminante dans leurs interactions avec leur environnement : la volonté.

Il est peu probable qu'un modèle mathématique ou qu'un automate pourra un jour exprimer pleinement ce qu'est la volonté. Cela n'implique pas cependant qu'il soit impossible de représenter de manière stylisée la manière dont celle-ci se porte sur différents objets. Les ressources cognitives dont disposent les êtres humains pour atteindre leurs objectifs sont

⁷ Titre inspiré de J. Lesourne (2004) qui identifie ces trois éléments comme les clefs de voûte de l'économie cognitive.

depuis longtemps étudiées par les psychologues, et plus généralement les sciences cognitives, et leur modélisation est déjà bien développée. La connaissance de la manière dont les individus élaborent les objectifs qui vont les guider dans leurs choix est donc le chaînon manquant pour reconstituer les processus de décision.

Ceci soulève un point très sensible qui est de savoir comment attribuer à des agents artificiels des objectifs, tout en gardant à l'esprit que nous cherchons à rester au plus près des systèmes sociaux humains. Certaines situations suggèrent une réponse relativement simple à cette question. Par exemple, lorsque bison futé cherche à prédire le trafic routier au moment des départs en vacances, les buts des agents sont globalement bien définis. Mais de telles situations sont loin d'être représentatives du cas général. Par exemple, dans le modèle de Nowak et May que nous avons étudié, les agents imitent leurs plus riches voisins en terme de gains accumulés au cours du jeu. Mais quand bien même cette variable 'gain' serait la représentation d'une variable effectivement importante dans les processus de décision de certains agents, bien d'autres buts peuvent être attribués qui correspondront à des règles d'imitation différentes. Les agents peuvent chercher à faire comme tout le monde (Axelrod 1997* ; Bala & Goyal 2001* ; Galam 1998*, Janssen & Jager 1999*) ou, au contraire, à se démarquer du reste de leurs voisins (Kaniovski et al. 2000*), à rechercher le prestige (Henrich & Gil-White 2001*), etc. De fait dans la littérature, plusieurs règles d'imitation, similaires à celles que nous avons mentionnées, ont été étudiées, ceci posant la question du choix de la règle d'imitation. A moins d'étudier des systèmes où les agents sont soumis à de fortes contraintes de la part de leur environnement, il est donc légitime de se poser la question de l'origine des buts des agents lorsque ceux-ci peuvent prendre plusieurs valeurs. Pensé au niveau collectif, cela revient à se demander s'il est possible de trouver une distribution sur les différentes règles de comportement, qui soit une propriété du modèle étudié.

I.3.A.b. Modéliser la modélisation

Existe-t-il une démarche générale pour modéliser les buts des agents ? Si l'on vous demande au supermarché pourquoi vous avez choisi tel produit plutôt que tel autre, vous avancerez peut-être que vous privilégiez les produits biologiques. Si alors il vous est demandé ce que vous apporte le fait d'être 'biologique' pour un produit, vous répondrez peut-être que vous pensez que c'est meilleur pour votre santé ou que c'est un mode de consommation plus respectueux de l'environnement. Ainsi, il est très courant d'expliquer une action ou une opinion en fonction de règles de vie plus générales qui s'emboîtent à la manière de poupées russes. Dans une telle organisation hiérarchique, une règle de niveau intermédiaire, comme celle de privilégier l'achat de produits biologiques, dépend d'une règle de plus haut niveau que l'on appelle sa méta-règle. Si l'on vous pousse à la manière des enfants à exprimer vos métarègles à coups de 'pourquoi', cela se finira certainement par un 'parce que'.

Comme nous allons le voir, il est très courant en modélisation de considérer des agents dont les processus de décision sont organisés sous la forme d'une hiérarchie de règles. Le problème se pose toujours lorsqu'on arrive au niveau du 'parce que'. Le plus souvent, et c'est le cas traditionnellement en économie, le dernier niveau correspond à des règles qui sont considérées par le modélisateur comme « plus objectives » ou plus basiques, soit parce qu'elles correspondent au bon sens du modélisateur, comme par exemple la maximisation des richesses, la recherche d'égalité, la recherche de justice, etc. ; soit parce qu'elles correspondent à des contraintes environnementales identifiées, comme par exemple des contraintes économiques ou un processus de sélection naturelle. Il n'est pas difficile de comprendre que le comportement global d'un modèle dépendra étroitement de ce que le modélisateur aura choisi de mettre au dernier niveau. Ce point est si important qu'il vaut la peine de s'y arrêter avec quelques exemples. Nous pouvons les classer en deux catégories selon que la règle de dernier niveau est intra-individuelle, comme la recherche de richesses ou d'équité ; ou inter-individuelle, comme un principe de sélection naturelle. Il faut cependant remarquer que la distinction du point de vue formel entre ces deux options n'est pas nécessairement si tranchée qu'elle en a l'air, une même structure pouvant satisfaire deux interprétations.

I.3.B Le problème de la régression infinie

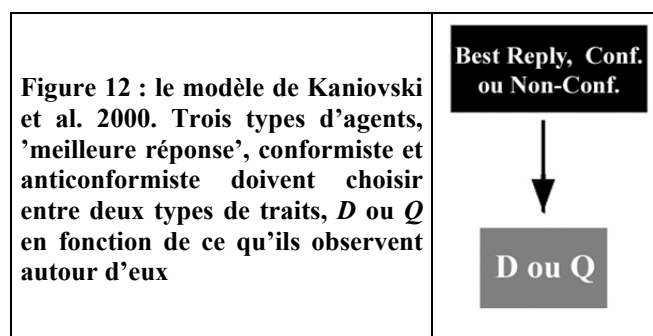
Nous allons parler ici des modèles qui considèrent des populations qui ne se renouvellent pas, mais dont les agents changent leur comportement au cours de leur vie, à travers un système de règles qui les caractérise. Nous avons déjà vu un exemple très simple de tels modèles lorsque nous avons étudié dans la partie précédente le modèle de Nowak et May 1992. Les agents pouvaient être représentés par une structure à deux niveaux (cf. Tableau 2 : Récapitulatif des différents types de modèles) : un niveau comportemental (les agents jouent C ou D) et un niveau concerné par la révision du comportement (constitué d'une règle d'imitation du voisin le plus performant). Ce type de structure connaît deux types de sophistications. La première est la complexification de l'ensemble des règles utilisées à un niveau donné. La deuxième est l'introduction de niveaux supplémentaires. Donnons un exemple pour chacune d'elles.*

I.3.B.a. Les populations hétérogènes

Des modèles sont dits à population hétérogène lorsque la structure des agents envisagée est telle qu'il y a plusieurs choix possibles pour la règle de dernier niveau. Un bon exemple de tels modèles est celui de Kaniovski et al. (2000*) : *Adaptive Dynamics in Games Played by Heterogeneous Populations*. Les auteurs introduisent leur problématique par l'exemple suivant. Une certaine branche socioprofessionnelle est constituée de deux populations distinctes : les employeurs et les secrétaires. Deux technologies de clavier sont en compétition au sein de chacune de ces populations : DVORAK et QWERTY. Chaque employeur n'achète qu'un type de clavier et chaque secrétaire ne se forme que sur l'un ou l'autre de ces claviers. L'avantage d'une secrétaire à se spécialiser dans l'un ou l'autre de type de clavier dépend donc de la probabilité qu'un futur employeur lui fournisse un tel clavier, et donc de la fréquence des claviers au sein des différentes entreprises ; de même l'avantage pour un employeur à acheter tel ou tel type de clavier dépend de la facilité qu'il aura à trouver une secrétaire qualifiée, et donc du niveau moyen de spécialisation des secrétaires pour l'un ou l'autre des types de claviers. Sachant que le clavier DVORAK est légèrement plus performant et plus facile à utiliser que le clavier QWERTY, la structure de ce jeu est donc un jeu de coordination, dont nous pouvons fixer les gains de la manière suivante :

Employeurs → ↓ Secrétaires	DVORAK	QWERTY
DVORAK	(5,5)	(0,0)
QWERTY	(0,0)	(4,4)

Les auteurs considèrent le protocole d'interaction suivant : à chaque période, un nouvel arrivant de chaque catégorie doit faire un choix entre les deux technologies en fonction de ce qu'il observe sur deux échantillons aléatoires de taille fixée pris dans chacune des populations. Ceci a pour effet de modifier les proportions des différentes technologies dans la population. En ce qui concerne la règle de décision, les auteurs considèrent trois possibilités qui correspondent à trois types d'agents. La première est la *meilleure réponse* (*best reply*) : l'agent choisit la technologie qui, étant données les fréquences observées dans l'échantillon de l'autre population, correspond au plus haut gain qu'il puisse espérer obtenir s'il avait à jouer contre un agent tiré au hasard dans cet échantillon. Ainsi, si d est le nombre de claviers DVORAK et q le nombre de clavier QWERTY dans l'échantillon de l'autre population, l'agent choisira un clavier DVORAK si $5.d \geq 4.q$. La deuxième règle considérée est le *conformisme* : l'agent choisit la technologie utilisée par la majorité des agents dans l'échantillon de sa propre population. La troisième règle est l'*anticonformisme* : l'agent choisit la technologie utilisée par la minorité des agents dans l'échantillon de sa propre population. Dans ce jeu-là, un agent peut se décrire comme un couple (b,r) où b correspond à la stratégie adoptée (DVORAK ou QWERTY) et r correspond à sa stratégie d'apprentissage (*meilleure réponse*, *conformisme* ou *non-conformisme*). Il y a donc trois possibilités distinctes pour la règle adaptative de plus haut niveau (figure 1).



Une fois ces types déterminés, les auteurs étudient la dynamique d'adoption de technologie dans les deux populations *une fois fixées* les différentes proportions des différents types d'agents et pour différents types de jeu (le jeu de coordination présenté ici n'est qu'un exemple, l'étude est faite dans le cadre plus large des matrices 2×2). Dans le cas d'un jeu déterministe 2×2 où tous les agents utilisent une stratégie de type de *meilleure réponse*, le jeu répété converge vers un des équilibres de Nash du jeu. Le principal résultat de cette étude est que, en dehors des jeux de coordination, les processus hétérogènes peuvent présenter des cycles limites, ceux-ci pouvant exister même lorsque la proportion d'agents qui ne suivent pas une stratégie de type meilleure réponse est arbitrairement petite. *Le caractère hétérogène des populations change donc radicalement la dynamique.*

La prise en compte de populations hétérogènes élargit donc considérablement l'espace des comportements possibles des systèmes étudiés ce qui, sans autre contrainte supplémentaire, pose un problème de sous-détermination des dynamiques possibles.

I.3.B.b Des agents à niveaux de contrôle multiples

Une technique souvent utilisée pour sophisticationner le modèle de l'agent est de lui attribuer des méta-niveaux supplémentaires. Nous allons voir maintenant un exemple typique de tels modèles, développé dans l'article d'André Orléan (1998) : *The evolution of imitation*. L'auteur y considère des agents qui peuvent indexer leur processus de décision soit sur une information privée, modélisée par un signal de l'environnement qu'ils sont seuls à percevoir, soit sur l'observation du comportement des autres agents. L'objectif de cet article est alors d'étudier l'effet de l'arbitrage entre ces deux types de processus décisionnel sur les comportements collectifs.

L'idée sous-jacente étant de modéliser les marchés financiers, le modèle est présenté de la manière suivante : N agents évoluent dans un monde qui peut être dans deux états $\{H\}$ et $\{L\}$. Les agents y ont à effectuer au cours de périodes successives, des actions labellisées également H et L (par exemple, acheter ou vendre les titres d'une certaine compagnie), chacune étant la plus appropriée lorsque l'état du monde porte son nom (lorsque les actions de la compagnie sont en hausse ou en baisse). Les agents ne connaissent cependant pas l'état du monde et doivent indexer leur décision sur deux sources d'information disponibles. La première est un signal σ qu'ils sont seuls à percevoir (information privée) et qui leur indique avec une plus ou moins grande fiabilité l'état du monde (σ révèle l'état réel avec une probabilité p et fournit une information erronée avec une probabilité $(1-p)$). La deuxième source d'information est l'observation des actions des autres agents aux périodes précédentes. De ces deux façons de s'informer découlent deux manières différentes de prendre une décision. La première (stratégie I , agents informés) consiste à se fier à son information privée σ , et à choisir H ou L , au risque de se tromper avec une probabilité $(1-p)$ si celle-ci s'avère erronée. La deuxième consiste à suivre le comportement adopté par la majorité des agents (stratégie M , agents conformistes). À chaque période, un agent est tiré au hasard dans la population pour prendre une décision, et son gain dépend de sa capacité à choisir l'action la plus appropriée étant donné l'état du monde courant.

Dans une première partie de son article, l'auteur étudie la dynamique du jeu lorsque la proportion m d'agents conformistes est fixée. Pour comprendre les résultats obtenus, il faut faire la remarque suivante : si nous considérons la population des agents ayant recours à la stratégie I , dans la mesure où cette population est assez importante, la loi des grands nombres nous indique que la proportion des agents ayant choisi la bonne action sera très proche de p .

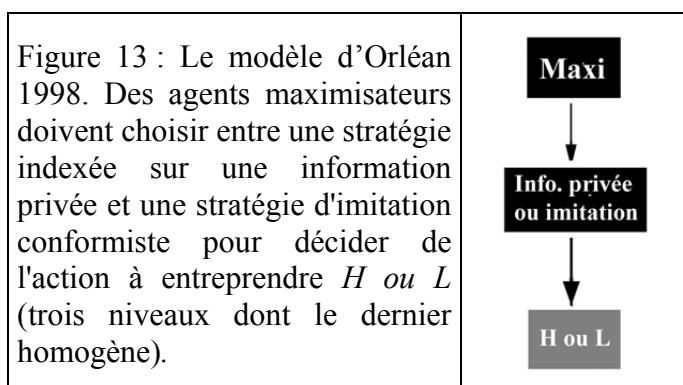
Ainsi, si l'on sait que $p > 0.5$, bien qu'individuellement les agents utilisant la stratégie I se trompent régulièrement avec une probabilité $(1-p)$, l'état du monde est indiqué avec quasi-certitude par le comportement adopté par la majorité d'agents I . Dans ce cas-là, choisir d'être conformiste dans une population d'agents suivant leur information privée est une stratégie bien plus performante que de se fier à son signal privé.

Le problème est que les agents ne distinguent pas ceux qui sont conformistes de ceux qui suivent leur information privée et ne peuvent évaluer le comportement moyen que par rapport à la population totale. Ainsi, lorsque la proportion d'agents conformistes dans la population n'est pas trop importante, le comportement de la majorité de la population reflète bien le comportement de la majorité des agents se fiant à leur information privée, mais ceci devient faux lorsque la proportion d'agents conformistes devient significative. Une étude plus poussée de ce modèle démontre qu'il existe un seuil critique m^* , tel que si la proportion des agents conformistes dans la population est inférieure à m^* , il est plus avantageux d'être conformiste que de suivre son information privée, la situation étant inversée si la proportion d'agents conformistes dépasse ce seuil. Ceci met en évidence l'ambivalence de l'imitation que l'auteur résume par cette phrase : « être imitateur quand les autres ne le sont pas et se fier à son information privée lorsque les autres sont imitateurs ».

Nous avons donc jusqu'à maintenant un modèle où les agents sont modélisés par deux niveaux : un niveau comportemental consistant en une action H ou L , et un niveau stratégique consistant en un comportement conformiste ou informé. Nous nous retrouvons donc avec une structure similaire au modèle que nous venons de voir de Kaniovski et al., avec une pluralité de règles au plus haut niveau des processus décisionnels des agents, la dynamique du système étant fortement dépendante de la distribution des différents types d'agents dans la population. L'objectif de cet article étant d'étudier les comportements d'imitation sur les marchés financiers, ce résultat quoique intéressant, est insatisfaisant car la dynamique est sous-déterminée. En effet, quand bien même il y aurait une telle dichotomie de stratégies entre agents informés et agents conformistes, tant que l'on ne connaît pas la proportion d'agents imitateurs m , il n'est pas possible de produire un résultat qualitatif sur l'évolution du système.

Pour pallier cet inconvénient, André Orléan propose, dans une deuxième partie de son article, de sophistiquer la structure des agents en ajoutant un niveau supplémentaire. En effet, si l'on fait l'hypothèse que le but principal des agents sur un marché financier est de maximiser leurs gains, et que par ailleurs ceux-ci peuvent observer les performances des deux types de prise de décision (informée ou conformiste), alors il est raisonnable de penser que les agents vont changer de stratégie sur la base des performances observées. Pour formaliser cette

idée, il suffit d'ajouter un troisième niveau à la structure de l'agent (figure 2), constitué d'une règle unique indexée sur les performances observées, qui va déterminer si l'agent se comporte de manière informée ou conformiste. Cette règle de plus haut niveau est alors en position méta par rapport au niveau stratégique de niveau 1 (informé ou conformiste). Cette règle étant unique, nous retombons sur un modèle où il n'y a qu'un seul type d'agent (agent maximisateur), avec cependant des stratégies plus complexes puisque décomposables en deux niveaux. Les règles de niveau intermédiaire (informé ou conformiste) s'interprètent alors du point de vue de l'agent, comme deux moyens distincts d'arriver à un but qui est la maximisation des richesses. Cette sophistication donne des résultats très intéressants puisque l'on peut observer en simulant ce système que, loin d'atteindre un équilibre, la proportion de stratégies conformistes dans la population, de même que les proportions des différentes actions entreprises par les agents, oscillent de manière cyclique mais non périodique au gré des changements d'état du monde. Ceci permet d'établir une analogie avec les larges mouvements d'opinions sur les marchés financiers.



I.3.B.c Déterminisme ou hétérogénéité

L'exposé de ces deux modèles proto-typiques nous permet d'entrevoir les deux forces motrices de la modélisation de l'agent. Elles forment un couple infernal puisque l'une ne peut disparaître que si l'autre est présente. Il suffit pour cela de mettre ces deux modèles en vis-à-vis. Au regard des résultats avancés par le modèle de Kaniovski et al., qui indique qu'une légère hétérogénéité dans les types d'agents peut changer radicalement la dynamique, nous pouvons nous poser la question de savoir ce qu'il en serait si, dans le modèle d'André Orléan la règle de dernier niveau n'était pas restreinte à une seule règle de maximisation indexée sur les gains, mais pouvait prendre d'autres formes, telles que le *conformisme* ou

l'anticonformisme. Dans un monde où les marchés sont défaillants et n'arrivent pas à se conformer aux modèles, le modélisateur pourrait être chatouillé par l'idée d'introduire une petite dose d'irrationalité. Un rapide raisonnement nous montre cependant que ce genre de questions, loin d'être une coquetterie, nous fait plonger directement dans les limbes de la régression infinie. En effet, comment déterminera-t-on les proportions entre les multiples règles de dernier niveau ? Faudra-t-il introduire un quatrième niveau constitué d'une règle unique qui déterminera leur évolution ? Comment alors choisirons-nous cette règle ?

Nous nous lançons là dans l'ascension d'une échelle infinie, où chaque échelon appelle à gravir l'échelon supérieur, soit par souci d'hétérogénéité, soit au contraire, parce que l'hétérogénéité est embarrassante. Comment échapper à cela ? Comme nous allons le voir, certains ont proposé d'échapper à cette régression en prenant comme dernier niveau le niveau génétique. La règle de dernier niveau est la sélection naturelle ! Nous examinerons les problèmes associés à cette approche.

Une précision est à ce stade importante. D'une manière générale, quel que soit le modèle considéré, l'ensemble des règles de dernier niveau, aussi vaste soit-il, sera toujours une donnée du modèle. Il sera conditionné par l'expressivité du formalisme, et en ce sens, *nous ne pouvons pas espérer endogénéiser les règles* de quelque niveau que ce soit.

En revanche, nous pouvons aspirer à formaliser un dernier niveau hétérogène avec une *distribution endogène* sur les différents choix possibles de règles.: la dynamique du système sélectionne elle-même l'ensemble des règles pertinentes aux différents niveaux. Cette direction de recherche est à notre sens la seule qui puisse stopper cette régression infinie.

I.3.C. Le génome pour fondation

Un autre domaine de recherche s'intéresse, depuis quelques décennies, au problème de la modélisation des systèmes sociaux : l'anthropologie évolutionniste. L'approche est cependant totalement différente puisqu'il s'agit là d'essayer d'une part, de comprendre les comportements et les structures sociales actuelles en tant qu'ils sont le produit d'une évolution de l'espèce humaine sur plusieurs milliers d'années, d'autre part, de comprendre l'évolution elle-même et d'en proposer des scénarii possibles. Contrairement à l'approche économique, qui part d'un axiome de rationalité, l'anthropologie évolutionniste part de principes fondés sur l'évolution darwinienne. L'élément de départ est donc le génome et la manière dont la sélection naturelle le modifie. Les capacités cognitives des agents, leur rationalité, s'inscrivent alors dans les modèles comme le produit de cette évolution génétique

Intéressons-nous donc au génome qui, de manière ultime, détermine les contraintes de notre être biologique. Une très bonne synthèse des différents courants cherchant à mettre en évidence les liens entre évolution biologique et évolution des comportements humains pourra être trouvée dans *The Adaptive Nature of Culture* (Alvard 2003*). Nous en traçons ici les grandes lignes. Avant d'entamer cette discussion, il faut souligner un changement de terminologie par rapport aux précédents chapitres, dû à un changement de communauté scientifique, constituée ici principalement de biologistes, d'anthropologues et d'éthologues. Ainsi, dans ce qui suit, nous appellerons traits culturels les éléments sur lesquels portent les choix des individus (manières de s'habiller, habitudes alimentaires, choix d'une technologie, etc., comportements de manière générale). Les règles et modes d'acquisition d'un comportement par la médiation de congénères seront appelés règles ou modes de transmission culturelle (comme par exemple le conformisme ou l'imitation indexée sur les gains). Le terme culture a, quant à lui, été plusieurs fois défini (voir l'encart 3). Nous ne le définirons pas pour le moment, attendant d'avoir exposé notre approche des dynamiques sociales pour en donner une définition plus précise.

QUELQUES DEFINITIONS DU MOT CULTURE

Nous reproduisons ici une liste de définitions du mot « culture » recueillies dans la littérature par Rendell et Withehead (2001*) à laquelle nous avons joint quelques ajouts.

- Aoki (1991) *«the transfer of information between individuals by imitative or social learning»*
- Axelrod "Therefore, the term culture will be used to indicate the set of individual attributes that are subject to social influence."
- Bonner (1980) p163 *«I have defined culture as the transfer of information by behavioural means»*
- Boesch (1996) *«the key to culture is not so much the precise transmission mechanisms, as we saw that many of them could be at work, but a permanence-guaranteeing mechanism»*
- Boesch et al. (1994) *«a behaviour is considered cultural only if differences in its distribution between populations are independent of any environmental or genetic factors»*
- Boyd and Richerson *«Culture is information capable of affecting individuals' phenotypes which they (1985) p33 acquire from other conspecifics by teaching or imitation»*
- Boyd and Richerson *«we define cultural variation as differences among individuals that exist because (1996) they have acquired different behaviour as a result of some form of social learning»*
- Feldman and Laland *«culture is treated as shared ideational phenomena (ideas, beliefs, values, (1996) knowledge)»*
- Galef (1992) *«defined as an animal tradition that rests either on tuition of one animal by another or on imitation by one animal of acts performed by another»*
- Heyes (1993) *«a subset of traditions in which the focal behaviour has been formed through the accumulation of modifications through time»*
- Kummer (1971) p13 *«cultures are behavioural variants induced by social modification, creating individuals who will in turn modify the behaviour of others»*
- Adam Kuper, in Auger 2000, p187; *“Culture is taken to mean "the specific tradition of a local community”*
- Mundinger (1980) *«culture is a set of [behavioural] populations that are replicated generation after generation by learning»*
- Nishida (1987) *«Cultural behaviour is thus defined here as behaviour that is (a) transmitted socially rather than genetically, (b) shared by many members within a group, (c) persistent over generations and (d) not simply the result of adaptation to different local conditions.»*
- DeRussell and Russell *«The culture of a society may be defined as behaviour common to a substantial (1990) proportion of its members, socially transmitted within and between generations»*
- Slater (1986) *«cultural transmission is the phenomenon whereby features of behaviour pass by learning from one individual to another»*
- Tomasello (1994) *«The concept of culture was specifically formulated to describe group differences in human behavior, and, thus, behavioral traditions of humans provide the proto-typical case of cultural transmission»*

I.3.C.a L'approche de la sociobiologie

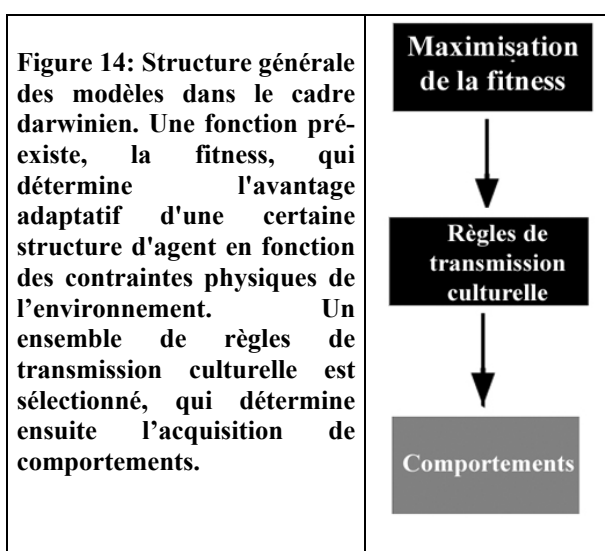
Le premier courant à avoir pris en compte des aspects génétiques dans une approche formelle des comportements sociaux fut la sociobiologie (Wilson 1975). Forts de leur succès dans l'explication de certains comportements sociaux animaux, les sociobiologistes ont entrepris de développer une théorie des comportements humains qui serait compatible avec le paradigme darwinien et les connaissances actuelles sur l'évolution phylogénétique. Le principe fondamental de la sociobiologie humaine est que les comportements sociaux tendent à maximiser une certaine fonction, appelée *fitness*, qui représente l'avantage reproductif d'un individu et qui est déterminée par les contraintes physiques de l'environnement. Nous savons en effet qu'en ce qui concerne les comportements animaux, si deux espèces sont en compétition pour la même niche écologique, et que l'une de ces espèces a un avantage évolutif, alors celle-ci deviendra à terme prédominante. La sociobiologie humaine est le prolongement naturel de cette idée si l'on considère que les comportements sociaux participent à la valeur adaptative des groupes d'individus en concurrence pour l'exploitation des mêmes ressources naturelles. L'argument des sociobiologistes a été appelé « l'argument de l'origine naturelle » : si les comportements acquis culturellement tendaient à réduire la valeur adaptative d'un individu (sa *fitness*), alors les capacités à apprendre des comportements culturellement auraient été éliminées par la sélection naturelle. Donc, tout comportement doit tendre à augmenter la *fitness*, qu'il soit acquis culturellement ou non. La majorité des sociobiologistes pensent donc en général qu'il suffit d'étudier les comportements au regard de leur participation à la *fitness* d'un individu, les processus de transmission culturelle étant secondaires.

Lorsque l'on modélise l'évolution d'agents dans le cadre de la sociobiologie, la structure d'agent est du même type que dans les exemples précédents, à ceci près qu'il y a une règle fixe de dernier niveau qui représente la maximisation par rapport à la *fitness* (

Figure 14). Le sens de celle-ci n'est cependant pas de représenter un processus interne à l'individu, mais un processus d'évolution agissant sur la population dans son ensemble au moment de la reproduction. La dynamique qu'elle engendre s'appelle *dynamique des répliqueurs*.

Elle a été introduite à l'origine pour modéliser, d'un point de vue formel, la manière dont le patrimoine génétique d'une génération se trouve répliqué à la génération suivante (Hofbauer & Sigmund 1988). Elle s'exprime sous une forme mathématique assez précise, compatible avec les caractéristiques de la reproduction sexuée. La dynamique engendrée par

cette règle de maximisation de fitness et la dynamique engendrée par les processus de transmission culturelle qu'elle contrôle sont pensées comme agissant sur des échelles de temps bien différentes. La première nécessite plusieurs générations pour engendrer des effets à l'échelle de la population, la seconde correspond à des transformations sociales dans des intervalles de temps de l'ordre de grandeur de la durée de la vie de l'individu. Nous y reviendrons, cette différence est le principal argument contre l'attribution d'une causalité forte des caractères génétiques sur les structures sociales. Il est également important de noter que les sociobiologistes considèrent qu'un comportement donné ne peut être présent à long terme dans une population que s'il est bien adapté. Ainsi, ils font l'hypothèse que l'ensemble des règles de transmission culturelle, qui déterminent les processus de décision, n'est qu'un intermédiaire relativement neutre entre un principe de sélection naturelle et la manifestation des comportements. L'étude détaillée des modes de transmission culturelle et des processus de décision qui leur sont associés est secondaire pour la majorité des sociobiologistes.



I.3.C.b La co-évolution gènes-culture

Le programme de recherche en sociobiologie a été vivement critiqué de l'intérieur même de la biologie, certains chercheurs avançant de nombreuses raisons théoriques pour que le comportement d'une espèce quelconque, espèce humaine incluse, soit mal adapté, et donc que les observations divergent des prédictions fondées sur un principe adaptatif (Gould et Lewontin, 1979). Entre autres, il peut y avoir des accidents de l'évolution, le changement dans l'un des caractères d'un individu peut affecter les autres caractères, et la population peut très

bien ne pas avoir atteint l'équilibre évolutif tel qu'il serait défini par la fonction fitness. Une revue récente de l'état de ces réflexions pourra être trouvée dans Pigliucci et Kaplan 2000*.

Mais le point le plus fondamental est que les structures de l'évolution culturelle et de l'évolution biologique sont extrêmement différentes. Premièrement, selon Gould, la topologie de ces deux processus est complètement différente. L'évolution biologique procède par divergences successives de lignées évolutives, alors que dans le cas de l'évolution culturelle, il est très fréquent que des formes culturelles issues de branches évolutives bien distinctes s'hybrident pour donner de nouvelles formes culturelles (pensez par exemple aux influences croisées de la culture occidentale et de la culture orientale que l'on observe aujourd'hui). Par ailleurs, pour reprendre les termes de Gould, « *l'évolution culturelle est lamarkienne, les découvertes utiles d'une génération sont transmises directement à la suivante par l'écriture, l'enseignement, etc.* [c'est-à-dire les différentes formes d'apprentissage social⁸]⁹ ». Cela a pour conséquences d'une part, que l'évolution culturelle est beaucoup plus rapide que l'évolution génétique puisqu'une innovation utile peut se propager en un court laps de temps au sein d'une population ; d'autre part, que si ce qui est utile en terme de fitness est difficilement discernable à l'échelle de temps de l'individu, il y a de fortes chances pour que des traits culturels non adaptatifs deviennent néanmoins, à la suite d'erreurs, prédominants (nous avons vu dans le modèle d'André Orléan un phénomène tout à fait similaire lorsque nous avons parlé de l'ambivalence de l'imitation).

Cela a amené un certain nombre d'anthropologues, dont les chefs de file sont Boyd et Richerson, à chercher à modéliser plus finement les interactions réciproques entre gènes et culture. Plus précisément, leur conviction est que la compréhension fine des processus de transmission culturelle est essentielle pour comprendre l'évolution des comportements humains. Cette assertion peut paraître bien évidente si l'on ne prend pas en compte les échelles de temps considérées. Rappelons simplement qu'il s'agit ici d'étudier l'évolution qualitative des comportements humains sur des dizaines de milliers d'années, et de comprendre quels types de transitions ont été importants au cours de l'évolution. Sur de telles échelles de temps, il est commun en biologie de considérer que seule l'évolution génétique

⁸ Nous reviendrons très précisément sur les différentes formes envisagées de transmission culturelle dans la partie II.

⁹ " Human evolution is Lamarckian - the useful discoveries of one generation are passed directly to offspring by writing, teaching, and so forth", *An urchin in the storm*, S. J. Gould, London Penguin (1987 :70)

compte, et l'apparition de la culture dans la branche des hominidés peut sembler être un détail. Ce que défendent Boyd et Richerson, c'est que ce détail est d'une importance capitale puisqu'il peut changer le cours de l'évolution génétique elle-même. Leur théorie, que l'on nomme théorie de la transmission duale (*dual inheritance theory*, Boyd et Richerson 1985), part du principe que la culture est un système de transmission composé de plusieurs forces évolutives qui forment un tout. Certaines composantes de ce système peuvent favoriser dans certains cas, des traits culturels qui sont mal adaptés du point de vue génétique, cependant, pris dans son ensemble, le système de transmission culturelle est adaptatif. Ceci définit un programme de recherche qui distingue deux étapes dans l'étude des systèmes sociaux. La première est la détermination de la manière dont la sélection naturelle a pu donner forme à un certain système de transmission culturelle. La seconde consiste à regarder, une fois ce système fixé, comment les forces de l'évolution culturelle influencent un trait comportemental donné dans différents cadres écologiques et sociaux. Le type de modèle que l'on peut être amené à considérer dans un tel paradigme se représente exactement de la même façon que celui présenté sur la

Figure 14, à ceci près qu'une attention particulière est portée à l'ensemble des phénomènes culturels et à leurs rétroactions possibles sur le niveau de contrôle supérieur, *i.e.* les processus d'évolution génétique modélisés par la dynamique des réplicateurs.

L'étude des dynamiques aux différents niveaux met en jeu des ordres de grandeur temporelle très différents. Nous avons alors une *dynamique lente/rapide*, la sélection naturelle déterminant la forme des processus de transmission culturelle (dynamique lente, sur plusieurs milliers d'années), puis avec une constante de temps beaucoup plus petite (sur quelques décennies), qui permet de considérer que la forme des processus de transmission culturelle est fixée, les processus de transmission culturelle déterminent l'évolution des comportements (voir l'encart 4 pour un exemple). Pour fixer les esprits, mentionnons que ce type de dynamique lent/rapide est très courant dans la nature. En climatologie par exemple, les saisons déterminent des grandes tendances de façon cyclique, ce qui n'interdit pas que d'un jour sur l'autre, les températures puissent varier fortement, allant jusqu'à emprunter les valeurs d'une autre saison.

Exemple Paradigmatique**4****UN MODELE DE CO-EVOLUTION GENES-CULTURE**

Un modèle très représentatif de la théorie des jeux évolutionnistes dans sa version culturelle est le modèle d'Henrich et Boyd (1998*), *The Evolution of Conformist Transmission and the Emergence of Between-Group Differences*. Comme son titre l'indique, c'est un modèle de l'évolution de l'apprentissage social. Dans leurs études, les modalités de l'apprentissage social qui vont déterminer *in fine* la stratégie à suivre pour s'adapter au mieux à l'environnement sont régulées génétiquement, le génome évoluant en fonction du degré d'adaptation du phénotype correspondant. Nous donnons ici une description succincte de leur modèle, adapté de Rogers 1988*.

Soient des agents ayant dans leur répertoire comportemental deux actions : $B1$ et $B2$. Une population de tels agents est divisée en un ensemble de sous-populations de grandes tailles, chacune pouvant être confrontée à deux types distincts d'environnements : $E1$ et $E2$. Dans $E1$, le comportement $B1$ est favorisé en terme de fitness (les individus ayant adopté $B1$ ont le plus de chance de survivre ou de se reproduire), dans $E2$, c'est le contraire. Dans un cadre darwinien, la sélection naturelle favorisera donc le mécanisme d'apprentissage qui donne aux individus le plus de chances d'apprendre le comportement favorisé dans l'environnement dans lequel ils évoluent. Leur modèle est divisé en quatre étapes : transmission culturelle (qui inclut le conformisme), apprentissage individuel, migration et sélection naturelle.

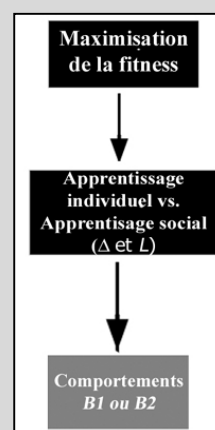
L'activité des agents à chaque période consiste à choisir un comportement, l'environnement pouvant changer entre deux périodes avec une certaine probabilité $(1-\varepsilon) > 0$. Conformément au paradigme évolutionniste, les agents dans ce jeu sont entièrement déterminés par leur génome. A charge alors au processus darwinien de sélectionner les agents (ou les gènes) qui sont les meilleurs dans leur aptitude à sélectionner les bons comportements (au sens de la fitness qu'ils procurent). L'intérêt de ce modèle est cependant qu'il considère un déterminisme génétique au niveau des règles d'apprentissage, et non au niveau des règles de comportement, laissant une certaine variabilité inter-individuelle au sein même d'une population homogène du point de vue génétique. Ainsi à chaque période, chaque individu reçoit de l'environnement un signal qui lui dit avec une fiabilité ρ quel est le meilleur comportement. L'individu peut alors choisir avec une probabilité L de se fier à ce signal ou de s'engager avec une probabilité $(1-L)$ dans un processus d'apprentissage social. Dans ce cas, toute une gamme de comportements est possible : sans tendance au conformisme ($\Delta=0$), les agents adoptent de façon aléatoire un des comportements de la génération précédente (transmission non biaisée). Lorsque $\Delta > 0$, les agents adoptent avec une probabilité Δ le comportement majoritaire et copient aléatoirement dans la population avec une probabilité $1-\Delta$. Les agents sont donc d'autant plus conformistes dans leurs pratiques d'apprentissage social que Δ est grand.

Entre deux périodes, chaque agent a une probabilité m de migrer dans une autre sous-population caractérisée par une histoire différente en ce qui concerne les variations environnementales et les types de comportement qui s'y sont développés.

Le déterminisme génétique intervient dans la détermination des paramètres L et Δ qui sont codés génétiquement et fixes au cours de la vie des individus. Des variations génétiques entre générations dues à des mutations modifient alors à la fois l'importance que les individus accordent à l'apprentissage social ($0 < L < 1$) et le degré de conformisme ($0 < \Delta < 1$) dans cette forme d'apprentissage. Enfin, les agents acquièrent leur comportement ($B1$ ou $B2$) par imitation des agents de la génération précédente en donnant une importance au conformisme proportionnelle à Δ . Ceci se représente donc comme un modèle à trois niveaux : un niveau comportemental, un niveau d'apprentissage et un niveau génétique (figure ci-dessous).

Les auteurs ont effectué une série de simulations en faisant varier m , ε et ρ à partir de populations initiales constituées à 99,99% d'agents s'appuyant sur un apprentissage individuel ($L=0$, $\Delta=0$), et avec 0,01% d'agents définis par des valeurs de L et Δ aléatoirement réparties entre 0 et 1. Etant donné que nous nous intéressons uniquement à la forme des modèles, nous ne présenterons ici que les grandes lignes de leurs conclusions.

La dynamique que laisse entrevoir leur étude computationnelle est la suivante. L'importance accordée à l'apprentissage social dépend fortement du bruit dans l'environnement et de la fréquence des fluctuations environnementales. Une évolution vers des valeurs élevées de L requiert une information environnementale de faible qualité ($\rho \sim 0,5$), et une certaine stabilité environnementale ($\varepsilon \sim 1$). En revanche l'importance accordée au conformisme atteindra une valeur élevée dans une large gamme de paramètres du moment que le taux de migration n'est pas trop important. Les principales conclusions des auteurs sont les suivantes :



1- Notre modèle indique que le conformisme est favorisé par la sélection sous un grand nombre de conditions. Le conformisme peut évoluer malgré un environnement fluctuant ; il évolue lorsque la qualité de l'information fournie par l'environnement est faible et lorsqu'elle est relativement précise.

2- En supposant que notre modèle capture les conditions qui ont déterminé l'évolution de l'apprentissage social chez les humains, nous avons montré que la sélection naturelle favorisait un recours croissant à l'apprentissage social. De plus, il n'y a pas de cas où un fort recours à l'apprentissage social ait évolué sans une évolution parallèle de la tendance au conformisme. En conséquence, le fait que les humains aient des aptitudes à imiter implique que le conformisme a de fortes chances d'être une composante importante dans l'apprentissage social humain.

3- Dans notre modèle, la présence du conformisme a pour effet d'augmenter la part d'apprentissage social accordée par l'évolution. L'apprentissage social devient plus important lorsque le conformisme est rendu possible.[Tda]¹⁰

¹⁰ 1. Our model indicates that conformist transmission is favored by selection under a wide range of conditions. Conformist transmission evolves in fluctuating environments; it evolves when the accuracy of environmental information is poor and when it is fairly accurate.

2. Assuming that our model captures the conditions that shaped the evolution of social learning in humans, we have shown that natural selection favors increasing the reliance on social learning. And, there is no case in which a strong reliance on social learning evolves but conformist transmission does not. Thus, the fact that humans can imitate implies that conformism also is likely to be an important component of human social learning.

3. In our model, the presence of a conformist effect increases the evolutionary equilibrium amount of social learning. Social learning becomes more prevalent when conformist genotypes are possible. (Henrich & Boyd 1998)

I.3.C.c La culture est-elle adaptée ?

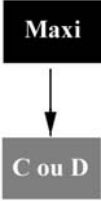
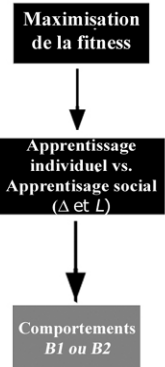
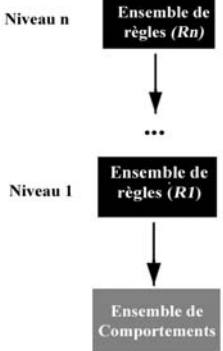
Le domaine de recherche initié par Boyd et Richerson est actuellement en plein développement et est labellisé *anthropologie évolutionniste*. Cependant, aussi intéressante que puisse être la question de la relation entre l'évolution génétique et la forme des processus de transmission culturelle tels que nous les connaissons, la question se pose de savoir dans quelle mesure ceci nous sera utile pour comprendre les formes culturelles telles qu'elles apparaissent aujourd'hui. En fait, un des objectifs Boyd et Richerson en considérant dans un même cadre formel évolution culturelle et évolution génétique, est de donner un sens clair à ce qui se trouve au plus haut niveau de contrôle dans la représentation formelle d'un agent. Le fait de placer la dynamique des répliqueurs comme ultime principe d'évolution semble à première vue apporter une solution au problème de la régression infinie que nous avons rencontré dans la section précédente. En effet, nul ne peut contester que l'évolution génétique soit l'ultime moteur de l'évolution des êtres vivants. De plus, l'importance de la culture dans l'organisation unique des sociétés humaines provient sans aucun doute d'une adaptation (cf. encart « l'émergence de la culture »). Ce n'est pas pour autant que les produits de cette adaptation obéissent à un principe de maximisation de fitness. Si un jour à la suite d'une guerre nucléaire, l'espèce humaine est éradiquée de la surface de la Terre, on aura beau dire que la culture était une grande chose, elle se sera révélée en fin de compte pas si adaptée que cela. Sans même aller si loin, nous pouvons recenser un grand nombre de pratiques d'origine culturelle qui vont de manière évidente à l'encontre d'un principe de maximisation de fitness : tabagisme, malbouffe, etc.

En fait, comme l'ont fait remarquer de nombreux auteurs appartenant à différents domaines de recherche (Alvard 2003*, Donald 2000*, Frank 2003*, Gintis 2003*, Hales 1998*), il n'est pas raisonnable de penser que les formes culturelles actuelles répondent à des critères de maximisation de fitness, au sens génétique du terme, tant l'évolution culturelle a été rapide et diversifiée sur une période de temps pendant laquelle le génome n'a pas évolué. L'hétérogénéité des formes culturelles au sein des différents groupes sociaux n'est pas compatible avec un déterminisme génétique même en prenant en compte la plasticité phénotypique. Une dynamique des répliqueurs, en tant qu'elle correspond à des contraintes physiques corrélées avec le succès reproductif, semble donc devoir être écartée comme principe ultime d'évolution des systèmes sociaux, position synthétisée par la citation suivante de l'économiste Herberts Gintis (2003*) :

When payoffs represent individual reproductive fitness, the replicator equation is a natural first cut at modeling evolutionary dynamics. The basic behavioral repertoire of Homo Sapiens (sociality, language, brain size, emotional predispositions) has doubtless evolved in this manner. But when payoffs are less directly related to reproductive success as is usually the case in human cultural evolution, the replicator dynamics is rarely a plausible model of behavioral change. This is especially the case in analysing cultural change in the biological shortrun - say 5000 years or less¹¹.

De plus, Boyd et Richerson semblent identifier *capacités à la transmission culturelle* et *formes de transmission culturelle* (conformisme, etc.). Or cet amalgame ne va pas de soi et mérite d'être questionné. Avec l'évolution rapide des moyens de communication entre individus et de la communication de masse, il serait assez naturel de penser que les formes de transmission culturelle elles-mêmes ont changé. Toujours est-il que, s'il est rassurant pour l'entendement de penser que notre culture jouit d'une certaine forme d'autonomie par rapport à nos gènes, cela nous prive d'une réponse confortable au problème de la modélisation des processus ultimes de régulation des formes culturelles ou des processus de décision. Quelle est la forme d'autonomie dont dispose la culture ? De quelle forme d'autonomie disposent les individus dans leurs processus de décision ? Ces questions restent plus que jamais ouvertes.

Tableau 2 : Récapitulatif des différents types de modèles abordés

				
a. : Le modèle de Nowak et May 1992.)	b. : le modèle de Kaniovski et al. 2000.	c. : Le modèle d'Orléan 1998.	d : Le modèle de Henrich et Boyd 1998.	e : La pratique de la modélisation en sciences humaines considère généralement des agents structurés sous la forme d'une hiérarchie de règles.

¹¹ « Lorsque les gains représentent l'avantage reproductif d'un individu, la dynamique des répliqueurs est une première approximation naturelle pour modéliser les dynamiques évolutionnaires. Les comportements de base de l'Homo sapiens (socialité, langage, taille du cerveau, prédispositions émotionnelles) ont sans doute évolué de cette manière. Mais lorsque les gains sont moins directement liés au succès reproductif, comme cela est habituellement le cas dans l'évolution culturelle, la dynamique des répliqueurs est rarement un modèle plausible des changements de comportements. Cela est particulièrement le cas lorsque l'on analyse des changements culturels dans un court terme biologique-disons depuis 5000 ans ou moins. » [TdA].

L'ÉMERGENCE DE LA CULTURE

La détermination de l'enchaînement exact des espèces d'hominidés menant jusqu'à l'homme actuel (*Homo sapiens sapiens*) est encore un problème d'actualité en paléanthropologie, chaque nouvelle découverte donnant lieu à de nouveaux scénarii. L'hypothèse dominante envisage plusieurs lignées d'hominidés, dont l'une aurait engendré *Homo sapiens sapiens*, les autres s'étant éteintes à différentes périodes de l'histoire. La première espèce de type humaine fut vraisemblablement *Homo erectus*, qui vécut de -1,5 à -0,3 millions d'années. L'*Homo sapiens* archaïque, notre ancêtre immédiat, est apparu vers -200 000 ans. Les estimations du coefficient d'encéphalisation, indice de l'évolution des capacités cognitives, suggère qu'il y a eu deux changements majeurs dans l'évolution des capacités cognitives des hominidés, il y a environ deux millions d'années et environ 200 000 ans.

Concernant l'émergence de la culture telle que nous la concevons, nous ne pouvons faire que des spéculations. Les études archéologiques semblent montrer que les processus de transmission culturelle étaient absents chez les premiers hominidés. Même après l'apparition d'*Homo erectus*, il semblerait que la transmission culturelle n'ait pas été une composante importante de l'organisation sociale. En effet, bien que l'utilisation d'outils ait été transmise au cours des générations, la technologie utilisée n'a pas varié pendant près d'un million d'années. Étant donné qu'il y a de fortes chances pour qu'il y ait eu localement quelques améliorations, le fait qu'elles n'aient pas été retenues au niveau de la population semble indiquer que pendant cette période, les processus de transmission sociale était plus proches de l'émulation (apprentissage facilité par des traces dans l'environnement, cf. II) que de ceux qui caractérisent la culture humaine.

En revanche, un nombre croissant de scientifiques s'accordent à penser que l'organisation sociale proprement humaine n'est apparue que vers 100 000 à 40 000 ans avant notre ère. C'est en effet à partir de cette période que les données archéologiques témoignent d'une grande diversification des productions culturelles, du début de la fabrication de lames et autres outils en pierre, et de la fabrication d'outils en os. C'est également autour de cette période que sont datées les premières traces de pratiques rituelles et artistiques, d'utilisation de parures, et que la mobilité géographique s'accroît de manière significative. Une des hypothèses avancées est que l'entrée dans la dernière période glaciaire, en augmentant la variabilité de l'environnement et donc la pression de sélection, a créé des conditions favorables pour l'émergence de nouvelles adaptations (cf figure).

Ainsi, les développements considérables de l'activité culturelle au paléolithique supérieur semblent témoigner d'une transition évolutive fondamentale dans la lignée humaine qui accompagne l'apparition de l'homme moderne. Cette transition, comme la plupart des transitions qui l'ont précédée, est discrète à l'échelle de l'évolution (elle s'effectue sur quelques milliers d'années) et il n'y a aucune raison de penser que nous sommes individuellement plus intelligents, en terme de capacités cognitives brutes, que nous l'avons été 50 000 ans avant notre ère, même si collectivement, cela ne fait aucun doute. Si les formes culturelles se sont diversifiées et complexifiées depuis cette époque par apprentissage cumulatif, les principes cognitifs à l'origine de ces formes culturelles ne semblent pas avoir fondamentalement changé.

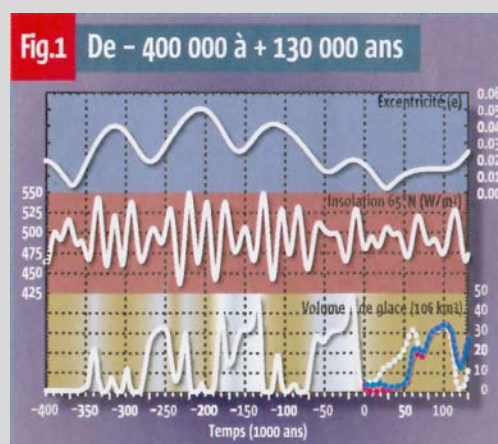


Figure 15 : Estimation de l'évolution du volume des glaces depuis 400 000 ans. La période autour de -50 000 est marquée par l'entrée dans la dernière période glaciaire. (Berger & Loutre, *La recherche*, 368 :42-46)

Références : Alvard 2003*, Crubézy & Graga 2003, Donald 1991&1997*, Picq 2003

Résumé du chapitre I.3

La pratique de la modélisation en sciences humaines considère généralement des agents structurés sous la forme d'une hiérarchie de règles, chacune se plaçant en position méta par rapport aux règles de niveau inférieur (Tableau 2 : Récapitulatif des différents types de modèles). Celles-ci peuvent s'interpréter selon les niveaux comme des règles de comportement, des règles de décision, des règles de transmission culturelle ou des règles d'évolution portant sur la population dans son ensemble. La tâche du modélisateur est alors de trouver une structure qui représente de façon stylisée un fait stylisé. Si le choix de l'ensemble des règles possibles au bas de la hiérarchie (comportements) est généralement sans ambiguïté, car ils sont relativement facilement observables, les difficultés s'accroissent à mesure que l'on grimpe dans la hiérarchie. En particulier, la détermination du contenu du dernier niveau est relativement problématique pour le modélisateur. C'est en effet le plus important car il détermine la dynamique globale du système. Selon les domaines de recherche, plusieurs interprétations sont données pour les métarègles du dernier niveau, ce qui aboutit à plusieurs stratégies de modélisation.

La première option, généralement considérée en microéconomie, consiste à dire que les règles de dernier niveau, comme par exemple la maximisation des richesses, la recherche d'équité, etc., représentent des principes normatifs arbitraires (dans le cadre de modèles normatifs) ou des principes objectifs qui correspondent au sens commun (dans le cadre de modèles descriptifs). Ceux-ci sont donc de fait, exogènes.

La seconde option, considérée par une branche de l'économie évolutionniste, les sociobiologistes et plus généralement les théoriciens de l'évolution culturelle, consiste à dire que ces règles de dernier niveau, qui sont l'ultime moteur de l'évolution, correspondent à des principes de sélection naturelle et de maximisation de fitness, qui agissent au niveau de la population d'agents.

Ces deux approches, qui se placent dans des perspectives temporelles très différentes, rencontrent chacune des difficultés conceptuelles spécifiques. D'un côté, les modèles qui considèrent que les règles de dernier niveau sont intra-individuelles, sont tiraillés entre une hétérogénéité exogène et l'arbitraire d'une règle unique. De l'autre côté, c'est le principe même de la détermination génétique qui semble non compatible avec l'histoire de l'évolution des cultures humaines.

Si l'ensemble des règles possibles concernant ce dernier niveau sera toujours délimité *in fine* par le modélisateur, nous pouvons aspirer à formaliser un dernier niveau hétérogène avec une distribution endogène sur les différents choix possibles de règles. Ceci revient à trouver un principe qui rende endogène *la distribution* des règles de dernier niveau.