

Point de vue métamimétique sur quelques problèmes classiques de modélisation

Nous allons dans ce chapitre aborder quelques thèmes de modélisation à propos desquels nous pensons que le formalisme métamimétique peut proposer une approche originale. Ceci est envisagé à des fins exploratoires et n'a aucune prétention théorique. En particulier, nous sortirons souvent des conditions d'application du théorème sur la convergence vers les SSS (Young 1993) et de ce point de vue, les modèles que nous allons évoquer posent de nombreuses questions théoriques.*

Le premier thème abordé sera le problème de l'endogénéisation des paramètres. Nous avons à plusieurs reprises proposé d'ajouter un certain nombre de paramètres aux modèles que nous étudions afin de les rendre plus réalistes. Cette démarche est classique en modélisation, où l'on commence généralement par un modèle très simple que l'on ajuste ensuite. Le principal problème est alors que le nombre de choix qui doivent être faits a priori par le modélisateur augmentent en proportion du nombre de paramètres dont il faut fixer la valeur. Pour contourner ce problème, il est courant de faire dépendre ces paramètres de processus internes au système, comme par exemple, des processus d'apprentissage ou des processus d'évolution de type génétique. Nous allons montrer que les systèmes métamimétiques proposent une troisième solution qui permettra notamment de rendre endogènes les différentes constantes de temps que nous avons pu introduire comme paramètre.

Le deuxième thème que nous voudrions aborder est celui de la relation entre évolution culturelle et évolution biologique. Nous avons évoqué dans la partie I le fait que les gains dans la modélisation des systèmes sociaux sont la plupart du temps faiblement reliés à un avantage écologique. Jusqu'à maintenant, il faut reconnaître que nous avons pris la position extrême de ne pas assigner de signification particulière à ces gains. Notamment, ceux-ci n'avaient aucun impact sur la possibilité de réalisation des tâches que les agents pouvaient se fixer. Après cette échappée dans un monde sans contrainte, nous allons montrer qu'il est possible de revenir sur une formalisation plus classique en considérant une dynamique hybride entre dynamique des répliqueurs et dynamique métamimétique.

Enfin, le dernier thème dont nous allons discuter est celui de la formation endogène des réseaux sociaux, revenant ainsi sur la question qui était à l'origine de cette thèse : peut-on formaliser la création de liens dans un réseau d'agents sans imposer un critère unique sur la

viabilité de ces liens ? Le passage par les réseaux carrés n'aura été qu'un détour vers cette question plus générale.

III.3.A. Un principe d'endogénéisation des distributions des paramètres propres : l'exemple des constantes de temps

Nous avons jusqu'à maintenant présenté le formalisme métamimétique comme un moyen de rendre endogène une distribution de règles d'imitation. Cependant, nous avons introduit au cours de notre exposé, des variables que nous avons fixées arbitrairement, comme par exemple, les fréquences de mise à jour des règles (*III.2.B.b*) ou le taux d'actualisation sur les gains (*III.C.c.ii*). Ces variables peuvent bien entendu être rendues endogènes par des mécanismes autres que mimétiques. Nous allons montrer ici que le formalisme mimétique est autonome dans le sens où il n'y a pas de variable propre⁷³ aux agents qui ne puisse être rendue endogène si nécessaire. La démonstration est très simple et tient en deux lignes : si cette variable fait partie de la description d'un trait modifiable elle peut être mise à jour de la même manière que ce trait modifiable, par exemple par imitation.

Pour illustrer ce principe, nous allons concrètement le mettre en oeuvre dans l'endogénéisation des temps de mise à jour des agents. Il est assez logique d'associer ces temps de mise à jour à la règle elle-même. La mise à jour a généralement un coût car elle demande une collecte d'informations auprès des voisins, qui aboutit parfois à une expérience contraire aux attentes de l'agent. Ainsi, si vous demandez à quelqu'un de vous dire comment il fait pour toujours avoir le meilleur pain à sa table, celui-ci pourra vous dire qu'il essaie tous les mois une nouvelle boulangerie et choisit la meilleure parmi celles connues ou au contraire, qu'il va toujours à la même boulangerie et qu'avec le temps, il est devenu un habitué de la maison auquel on donne toujours le pain le plus frais. Si vous voulez vous inspirer de ses conseils, vous utiliserez plus ou moins les mêmes constantes de temps.

Rappelons brièvement la description des agents que nous avons considérés. Ceux-ci ont deux traits modifiables : leur comportement et leur métarègle. Si en se comparant avec

⁷³ Lorsque nous parlons de variable propre à un agent, nous désignons une variable dont la valeur est déterminée par l'agent. Par exemple, le bruit que nous avons introduit au *III.2.C* qui indique la probabilité qu'un agent a d'agir au hasard, peut se décomposer en deux variables distinctes : celle qui modéliserait le compromis exploration/exploitation propre à l'agent, et celle qui modéliserait des perturbations indépendantes de la volonté de l'agent (contraintes physiques, physiologiques, etc.). La première serait une variable propre à l'agent, la seconde non. Les variables propres aux agents sont donc les variables qui décrivent leurs traits modifiables.

leurs voisins, ils constatent que l'un d'eux a plus de succès qu'eux selon leurs critères, ceux-ci attribuent cette différence avec une probabilité α à leur métarègle et avec une probabilité θ à leur comportement. Jusqu'à présent, nous avons fixé $\alpha=1$ et $\theta=1$ ce qui correspondait à une mise à jour parallèle synchrone des agents. La manière la plus naturelle de ne pas avoir à fixer ces deux paramètres est de considérer qu'ils font partie de la description de la règle : l'agent copie également les valeurs α et θ avec une précision donnée. La Figure 64 montre l'évolution des temps de mise à jour dans un dilemme du prisonnier tel que celui considéré au III.2.B.b.i. Les agents sont initialisés avec des fréquences de mise à jour égales à 0.5, puis celles-ci évoluent en fonction des erreurs de copie (cf. algorithme en annexes). Nous voyons ainsi apparaître des structures au niveau des temps de mise à jour, certaines sous populations se remettant en cause plus souvent que d'autres. Nous avons alors une mise à jour parallèle asynchrone hétérogène des agents. Comme on peut le constater, cela n'a pas d'impact sur la dynamique métamimétique, qui a exactement les mêmes caractéristiques que dans le cas d'une mise à jour parallèle synchrone.

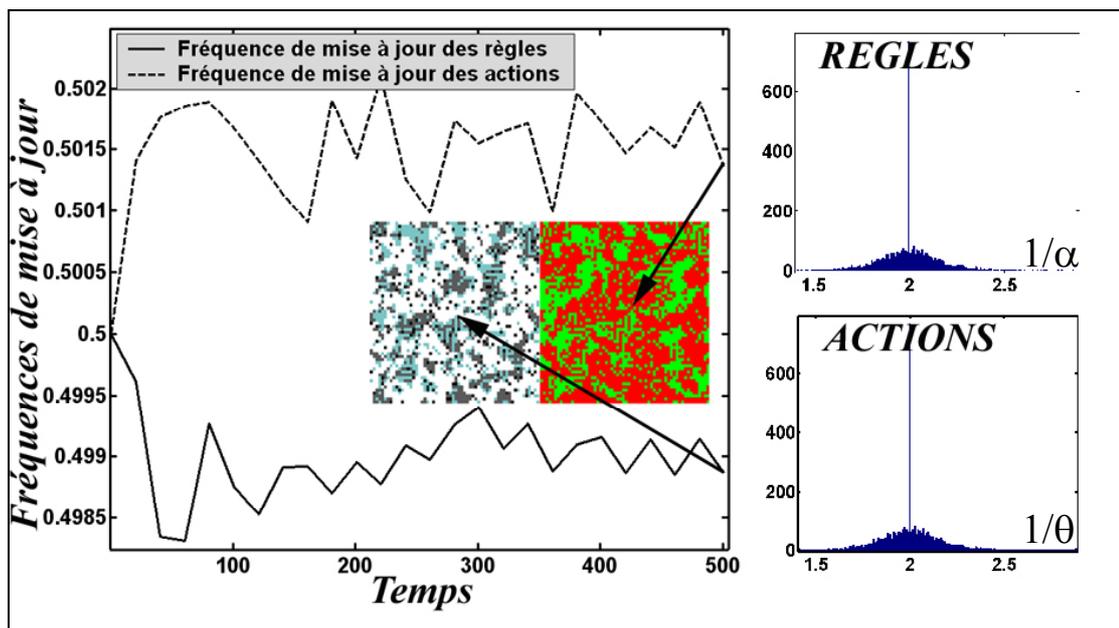


Figure 64 : Evolution des temps de mise à jour moyens dans une population d'agents métamimétiques jouant à un dilemme du prisonnier. Les conditions sont les mêmes qu'en III.2.B.b.i ($T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$). Les agents sont initialisés avec un temps moyen de mise à jour égal à deux sur les règles et sur les actions ($\alpha=0,5$; $\theta=0,5$), puis évoluent en commettant des erreurs relatives de copie sur α et θ . Celles-ci sont modélisées par une variable aléatoire gaussienne de moyenne zéro et de déviation standard égale à 5 % du temps de mise à jour utilisé par le modèle (cf. algorithme en annexes). Les deux figures au centre représentent les distributions spatiales des règles et des actions après 500 périodes. Elles ont les mêmes caractéristiques que celles que nous avons pu voir au III.2.B.b.i. À droite, sont représentés les histogrammes des temps moyens de mise à jour ($1/\alpha$ et $1/\theta$) dans la population après 500 périodes.

Cet exemple est, avant tout, une illustration du principe d'endogénéisation de la distribution d'un trait modifiable (dans ce cas un trait continu), le résultat d'indépendance de la dynamique métamimétique vis-à-vis de cette endogénéisation mériterait bien entendu une étude plus poussée. Nous avons vérifié par des études computationnelles que les principaux résultats proposés jusqu'alors sont inchangés lorsque les temps sont endogènes, ce qui nous permet d'affirmer qu'il n'y a pas d'artefact dû à la mise à jour parallèle synchrone (certaines études sont présentées en annexes web). Ce principe très simple d'endogénéisation s'applique à toute variable numérique, comme par exemple le taux d'actualisation β introduit au III.C.c.ii. Il permet également de rendre endogène des distributions de traits plus complexes comme par exemple un mécanisme d'inférence. Ainsi, nous aurions pu considérer des agents qui ne mettent en cause leurs règles d'imitation que s'ils ont le même comportement que le meilleur agent dans leur voisinage (*cf.* encart 11, règle 2). Nous aurions eu alors dix règles d'imitation au lieu de cinq, dont les proportions auraient été régulées par les mêmes mécanismes. Nous pouvons conjecturer qu'étant donné que ce deuxième mécanisme favorise la stabilité des règles, puisqu'elles sont moins souvent remises en cause, ce deuxième mécanisme d'inférence deviendra prédominant dans la population.

Pour conclure, nous soulignerons la particularité du formalisme métamimétique : *l'ajout d'une dimension dans l'espace des traits modifiables ne s'accompagne pas nécessairement de l'ajout d'un paramètre.* Si par exemple, après avoir étudié le dilemme du prisonnier métamimétique avec des agents sans mémoire, le modélisateur s'aperçoit que la mémoire est importante pour rendre compte des faits stylisés qui l'intéressent, celui-ci peut décider d'introduire plusieurs manières de prendre en compte la mémoire (taux d'actualisation, moyenne sur les n dernières périodes, etc.), ce qui se traduira par un enrichissement de l'espace des règles et des comportements. Mais ceci s'accompagnera d'un enrichissement de l'espace de paramètres uniquement si les conditions initiales déterminant les nouveaux traits modifiables influent sur la dynamique du système. De manière générale, nous pouvons dire que l'espace des paramètres pertinent est l'espace des paramètres du modèle quotienté par les bassins d'attraction de la dynamique métamimétique si la dynamique est non bruitée. En ce sens, le modélisateur manipule des classes de modèles, plus que des formes particulières. Si la dynamique est bruitée, les paramètres seront déterminés de manière dynamique par le système.

III.3.B Modéliser la co-évolution gènes-culture

Nous nous sommes libérés jusqu'à présent de toute pression de sélection pour aborder le problème de la détermination des motivations individuelles. Cette position était justifiée par deux arguments. D'une part, la comparaison entre les échelles de temps de l'évolution culturelle et de l'évolution biologique : à l'échelle de l'évolution culturelle, toutes les caractéristiques génétiques des individus peuvent être considérées comme constantes, le génome n'ayant alors pas grand-chose à faire avec les caractéristiques de l'évolution culturelle ; pour étudier les systèmes sociaux actuels, il n'est donc pas nécessaire de faire intervenir une composante génétique qui viendrait favoriser certains types plutôt que d'autres. D'autre part, les comportements sociaux dans leur grande majorité, ne relèvent pas d'un problème de maintien d'un niveau de viabilité, mais sont des choix purement culturels.

Cependant, la question de contraintes externes sur la faisabilité ou la viabilité de certaines actions est tout à fait légitime dans certaines situations (en cas d'épidémie d'une maladie mortelle, chacun est libre de se prémunir ou pas, mais ceux qui ne le font pas ne resteront pas très longtemps des modèles potentiels pour d'autres individus). Si nous regardons à l'échelle de temps de l'évolution biologique, la question se pose également de la co-évolution des gènes et de la culture. D'autre part, si l'on devait admettre une définition de la coopération se traduisant par un coût en termes de fitness pour l'individu, il faudrait également montrer en quoi une société métamimétique arrive à maintenir un taux de coopération élevé.

Il est donc indispensable, pour que les systèmes métamimétiques soient une option envisageable dans le cadre du paradigme darwinien, de tester la résistance des phénomènes que nous avons observés à la présence d'une pression de sélection. Ceci est bien entendu un programme de recherche à part entière, nous ne présenterons ici que les tout premiers pas dans cette direction en gardant comme exemple de base le dilemme du prisonnier métamimétique que nous avons étudié.

La grande majorité des études sur l'émergence de coopération se place effectivement dans un cadre darwinien, dont la dynamique sous-jacente est la dynamique des réplicateurs (Hofbauer et Sigmund 1988). Nous en avons déjà vu un exemple dans la partie I (cf. encart n°4) avec le modèle de Henrich et Richerson (1998*). Rappelons que ce genre de jeu consiste à définir un ensemble de stratégies, une stratégie étant associée à un agent pour toute sa vie, puis à renouveler la population au cours du jeu, en indexant la proportion des différents types

de stratégies dans la nouvelle génération sur le gain moyen et les proportions de ces types de stratégies dans la population courante. Ceci ne veut pas dire que les agents ont le même comportement pendant toute leur vie, leur comportement pouvant évoluer en fonction de leur stratégie. Ainsi, on distingue le génotype, qui est la stratégie et le comportement que les agents ont à la naissance, du phénotype, qui est la stratégie et le comportement que les agents sont amenés à adopter au cours de leur vie.

III.3.B.a Dynamique métamimétique et dynamique des répliqueurs

Dans le cas des jeux spatiaux, une des manières de traduire la dynamique des répliqueurs est de décider qu'à chaque pas de temps, un agent a une probabilité de $1/T$ de mourir, puis de considérer que lorsqu'un agent meurt, il est remplacé par un nouvel agent dont la stratégie est héritée de l'un de ses voisins avec une probabilité proportionnelle à sa fitness. Celle-ci peut par exemple être définie comme la somme des gains d'un agent sur toute sa vie. Une variante de ce type de sélection, sans recouvrement générationnel, est étudiée par exemple dans Nowak et al (1993*, 1994a) (voir également Nowak et Sigmund 2000* pour une revue des différents modèles). En particulier, ils y montrent que cette règle est beaucoup moins favorable à la coopération et à l'émergence de structures que la règle *maxi* (dans le cas particulier bien entendu de la matrice qu'ils ont considérée, étant donné que la matrice du dilemme du prisonnier exclut généralement de telles structures).

Pour étendre le dilemme du prisonnier métamimétique dans un cadre darwinien, il nous faut définir un ensemble de génotypes et un ensemble de comportements possibles à partir de ces génotypes. Nous garderons ici la structure simple d'agent sans mémoire à deux niveaux que nous avons considérée jusqu'à maintenant (borne cognitive égale à 1). L'extension naturelle est de considérer que chaque agent est caractérisé par deux gènes qui déterminent la métarègle et le comportement de l'agent à la naissance, cette métarègle et ce comportement étant par la suite libres d'évoluer sous la dynamique métamimétique. Nous désignerons donc un agent par quatre variables : son comportement et sa métarègle à la naissance, son comportement et sa métarègle courants. Nous aurons ainsi pour un agent i , $i=(D, Maxi, C, Conformiste)$. Nous garderons les quatre métarègles précédentes, ce qui nous donnera quatre allèles différents, auxquels nous ajouterons un allèle que nous appellerons «*transmission culturelle*». Un agent naissant avec cet allèle héritera alors de la règle et du comportement courant de son géniteur (c'est-à-dire ceux que celui-ci a acquis au cours de ses

interactions sociales) et non de la règle et du comportement que son géniteur avait à la naissance. Dans ce modèle, les processus de sélection agissent sur des conditions initiales de trajectoires.

En ce qui concerne les comportements, nous garderons les deux stratégies sans mémoire *C* et *D*. Le génotype sera alors un trait non modifiable de l'agent et nous considérerons également qu'il ne fait pas partie des traits perçus. Pour une période donnée, nous parlerons du niveau génétique lorsqu'il s'agira de l'ensemble des règles et des comportements que les agents ont hérités de leurs parents, et du niveau culturel lorsqu'il s'agira des métarègles ou des comportements utilisés par les agents à la période considérée.

Le problème ainsi posé, les questions intéressantes sont les suivantes :

- Quelle différence y a-t-il entre des populations d'agents métamimétiques et des populations d'agents classiques ?
- Comment varient la proportion des règles et le taux de coopération dans la population en fonction de la force de la pression de sélection, c'est-à-dire du temps moyen de vie T ?
- Comment co-évoluent les dynamiques culturelles (métamimétique) et génétique ?

Les buts n'étant pas ici de faire une étude exhaustive mais simplement de donner un aperçu de l'apport potentiel de ce type de modèle à la question de l'émergence de coopération, nous avons pris pour conditions initiales celles qui sont les moins favorables à l'émergence de la coopération c'est-à-dire une population d'agents *maxi* défecteurs au niveau du génotype. Cela signifie que les agents vont tous commencer par jouer *D* et vont revoir leurs comportements suivant la règle *maxi*. Le bruit sur les actions est fixé à 1 % et le bruit sur les règles à 5 %. Le taux de mutation dans le génome est égal à 10^{-3} : avec une probabilité égale à 10^{-3} , un agent hérite d'un génotype choisi parmi les 10 génotypes possibles. Les paramètres de la matrice du prisonnier sont : $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$. Enfin, les constantes de temps de mise à jour sont égales à 1 pour les règles et pour les actions.

III.3.B.b La sélection naturelle favorise la coopération

Commençons par mentionner qu'une population constituée uniquement d'agents *maxi* resterait avec un taux de coopération nul, au niveau de bruit près. En cela, il n'y a pas grande différence avec ce que nous avons déjà vu au I.2. Par ailleurs, nous avons fait des études sur des populations non réflexives comportant les quatre types d'agent (*maxi*, *mini*, *conformiste* et *anticonformiste*), c'est-à-dire des populations où les agents ne changent pas leur métarègle au cours de leur vie, mais peuvent changer leur comportement en fonction de leur métarègle, de la même manière que pour les jeux évolutionnistes standards. Ces études montrent également que la coopération n'émerge pas et que les populations *mini* et anticonformistes disparaissent. Le même résultat est obtenu lorsque le taux de coopération initial est non nul (dans ce cas, le taux de coopération tend vers zéro en même temps que disparaissent les populations *mini* et anticonformiste). L'hétérogénéité au niveau des règles ne suffit donc pas à faire émerger la coopération dans le cadre de ce modèle.

Concernant le dilemme du prisonnier métamimétique, nous pouvons dans un premier temps regarder la dépendance de la composition du niveau culturel en fonction de la force de sélection. Nous ne nous intéressons pas pour le moment à ce qui se passe dans le génome, celui-ci évoluant sur des échelles de temps relativement grandes, remarquons simplement que sa composition ne peut pas être plus défavorable à la coopération que dans la configuration initiale choisie ici. Les résultats de notre étude sont montrés sur la Figure 65.

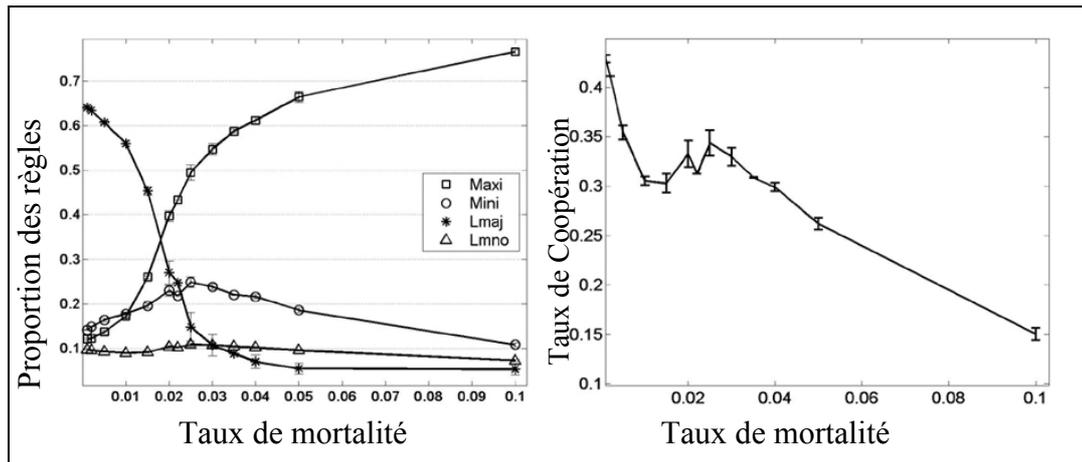


Figure 65 : État d'une population d'agents jouant à un dilemme du prisonnier métamimétique sous des contraintes de sélection après 3000 périodes (les proportions montrées ici se sont stabilisées au bout de 300 périodes). À gauche, la proportion des règles dans la population. À droite, le taux de coopération dans la population. La population initiale est composée d'agents *maxi* défecteurs. Nous pouvons distinguer en première approximation trois types de dynamiques. Lorsque la pression de sélection est faible (temps de vie moyens supérieurs ou égaux à 100 pas de temps), la dynamique métamimétique n'est pas perturbée par la dynamique des répliqueurs, et un équilibre globalement conformiste s'impose (qui est l'équilibre métamimétique correspondant étant donné le niveau de bruit sur les règles et sur les actions) le taux de coopération se situe alors entre 45 et 30 % ; lorsque la pression de sélection est à un niveau moyen (temps de vie moyens entre 100 et 20 pas de temps), la population est majoritairement *maxi* avec une proportion significative d'agents *mini* (~20 %), le taux de coopération se situe alors autour de 30 % ; enfin lorsque la pression de sélection est forte (temps de vie moyens entre 10 et 20 pas de temps), les comportements *maxi* sont très largement majoritaires (plus de 60 %) et le taux de coopération baisse drastiquement.

Chaque point a été obtenu comme une moyenne sur trois simulations de 3600 agents chacune⁷⁴. Les barres d'erreur représentent la déviation standard. Elles sont pratiquement toujours inférieures à la taille des marqueurs. Le bruit sur les actions est de 1 % et le bruit sur les règles de 5 %. Le taux de mutation est égal à 10^{-3} . Les paramètres de la matrice du prisonnier sont : $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$.

Nous pouvons distinguer en première approximation trois types de dynamique :

- Lorsque la pression de sélection est faible (temps de vie moyens supérieurs ou égaux à 100 pas de temps), la dynamique métamimétique n'est pas perturbée par la dynamique des répliqueurs, et un équilibre globalement conformiste s'impose (qui est l'équilibre métamimétique correspondant étant donné le niveau de bruit sur les règles et sur les actions), le taux de coopération se situe alors entre 45 et 30 %.
- Lorsque la pression de sélection est à un niveau moyen (temps de vie moyens entre 100 et 20 pas de temps), la population est majoritairement *maxi* avec une proportion significative d'agents *mini* (~20 %), le taux de coopération se situe alors autour de 30 %. On remarquera que la présence des agents *mini* est

⁷⁴ Ce n'est évidemment pas une étude statistique rigoureuse étant donné le nombre réduit d'échantillons, cependant cela donne une très bonne idée de ce qui se passe étant donné que les trajectoires des dynamiques métamimétiques sont très peu variables pour des conditions initiales et environnementales données.

favorisée, dans cette zone, par la présence des agents *maxi*. Ainsi, la proportion d'agents *mini* et le taux de coopération croît localement sous l'influence de la dynamique métamimétique, alors même que la pression de sélection augmente.

- Lorsque la pression de sélection est forte (temps de vie moyens entre 10 et 20 pas de temps), les comportements *maxi* sont très largement majoritaires (plus de 60 %) et le taux de coopération baisse drastiquement.

Dans tous les cas, nous assistons à une émergence de la coopération à un niveau supérieur à 15 %, et la population reste largement hétérogène dès que le temps de vie moyen dépasse la vingtaine de périodes. Ces premiers résultats suggèrent donc que les dynamiques métamimétiques deviennent très rapidement autonomes par rapport à la dynamique des répliqueurs dès que la pression de sélection s'affaiblit. Par ailleurs, la zone de paramètres la plus à même de refléter les temps de vie des *homo sapiens* correspond à une sélection faible, qui est précisément la zone où la dynamique métamimétique est prédominante et où le taux de coopération est le plus élevé. Enfin, le fait que le taux de coopération soit si élevé, alors que des sociétés d'agents non réflexifs ne voient pas émerger la coopération, suggère que les populations métamimétiques ont effectivement un avantage évolutif par rapport à des populations qui ne le seraient pas.

Si l'influence du génome sur les métadynamiques du niveau culturel est quasiment nulle dès que les agents ont un temps de vie moyen suffisamment long (ici 100 périodes), nous pouvons regarder l'influence sur le long terme du niveau culturel sur le niveau génétique, ce qui nécessite bien entendu des études computationnelles sur des fenêtres temporelles plus étendues. La Figure 66 présente l'une de celles que nous avons menées. Les mêmes paramètres sont les mêmes que précédemment mis à part que :

- Le niveau de bruit sur les actions et sur les règles est de 0,5 %,
- l'espérance de vie est de 1000 périodes,
- la distribution initiale sur les règles dans le génome est aléatoire uniforme⁷⁵.

Les conditions initiales sont donc définies par une population homogène d'agents *maxi* et défecteurs au niveau culturel et génétique. Les différents graphiques sur la Figure 66

⁷⁵ Il serait intéressant de commencer avec, par exemple, seulement des agents *maxi*, mais cela demanderait des moyens de calculs énormes (ou un programme plus efficace) car les échelles de temps seraient alors largement supérieures à celles que nous avons ici.

couvrent 1 115 000 périodes soit 1115 générations (rappelons que nous avons ici un recouvrement entre les différentes générations). Pour avoir un ordre de grandeur, si nous devions rapporter très grossièrement ces échelles de temps à l'échelle de l'évolution humaine, en estimant le temps de vie moyen à 30 ans sur les derniers milliers d'années, nous avons ici une évolution sur plus de 33 000 ans (ceci dit, outre le fait que le modèle présenté ici n'a pas prétention à être réaliste, l'évolution génétique observée ici ne peut pas être comparée avec une évolution génétique réelle étant donné que le taux de mutation est ici bien supérieur au taux de mutation réel. Cet ordre de grandeur est donc largement sous-estimé).

Étant donné le niveau de bruit au niveau culturel, la distribution limite au niveau des métarègles est massivement conformiste. Nous pouvons voir qu'effectivement, cette distribution n'évolue pas pendant toute la durée de la simulation, mis à part le fait que les proportions de *maxi* et *mini* s'inversent en raison de la hausse du taux de coopération au niveau culturel. Ceci confirme donc les observations précédentes : *dans le cas d'une sélection faible, la sélection naturelle n'a aucune influence sur les métadynamiques de la cognition sociale, même à très long terme.*

En revanche, la situation au niveau des comportements est bien différente. Après une émergence de la coopération d'origine métamimétique dont le niveau atteint 40 % dans les 200 premières périodes (processus de différenciation que nous avons déjà étudié au III.3.C.c.iv), nous pouvons voir une lente progression de la coopération qui s'effectue sur environ 70 000 périodes pour atteindre le niveau de 60 %. Pour comprendre cela il faut regarder la co-évolution entre le niveau génétique et le niveau culturel.

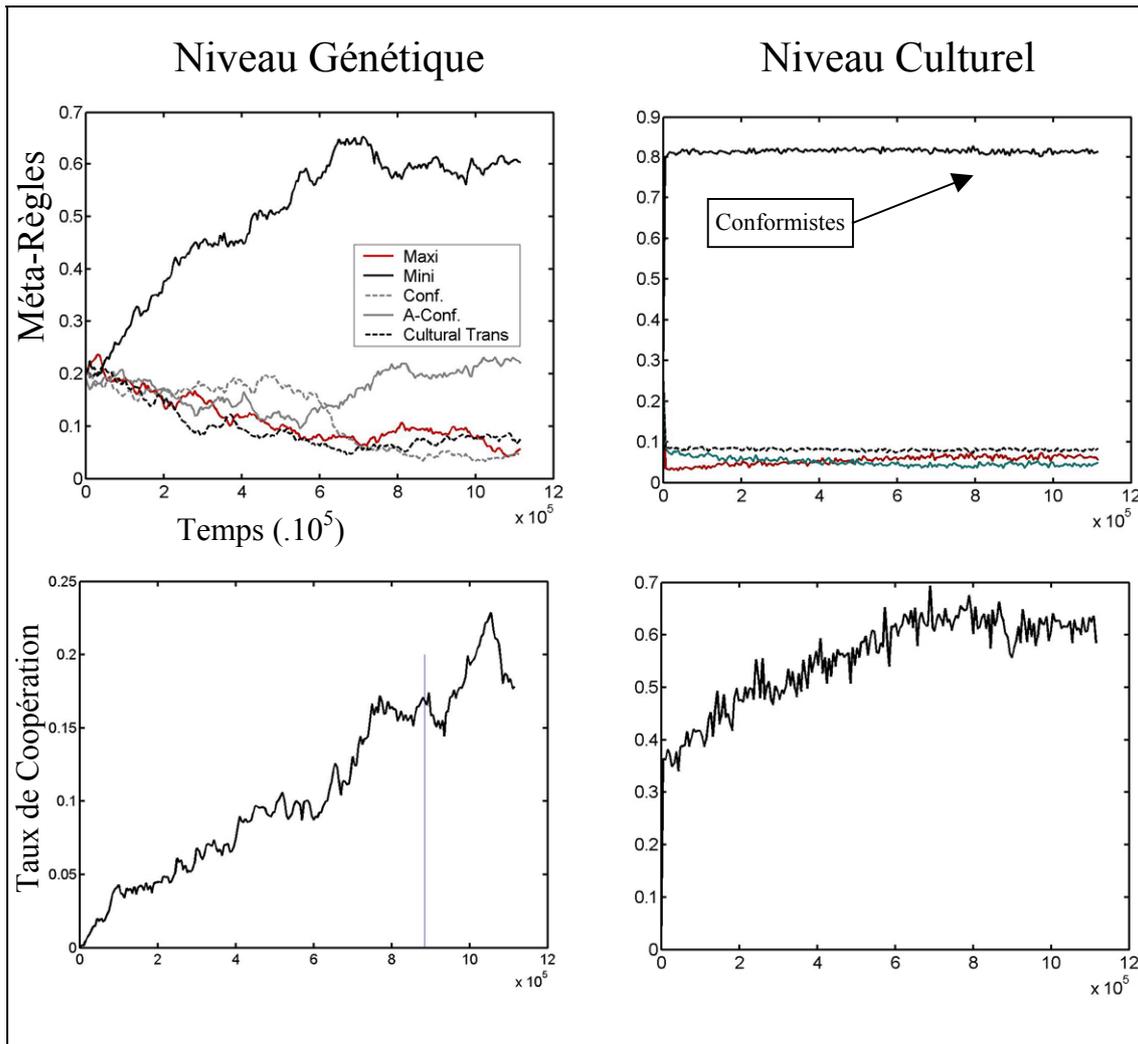


Figure 66 : Synthèse de l'évolution sur plus d'un million de périodes d'un dilemme du prisonnier métamimétique ($10\ 000$ agents) soumis à une pression de sélection. À gauche : évolution du génome, à droite l'évolution du niveau culturel. On remarquera en haut que le génome évolue fortement (à gauche) alors qu'à droite l'équilibre métamimétique sur les métarègles est extrêmement stable. Alors que le taux de coopération dans le génome croît lentement, sans couplage apparent avec les autres niveaux, on peut observer une co-évolution très nette entre les comportements au niveau culturel et la composition des métarègles dans le génome. Paramètres : composition initiale de la population : (D-maxi,D-maxi) uniforme, taux de mortalité uniforme de 10^{-3} , taux de mutation 10^{-3} , niveau de bruit sur les règles et les actions : 5.10^{-2} . $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$.

Au niveau génétique, l'évolution est très marquée entre le début et la fin de la simulation, d'autre part, contre toute attente, la règle *mini* est celle qui a le plus de succès, puisqu'elle atteint un niveau de 60 % dans la population après environ 70 000 périodes avant de se stabiliser, alors que la règle *maxi* est proche de l'extinction. Quant à l'évolution des comportements dans le génome, elle est certes significative, mais extrêmement lente puisqu'on observe une progression des comportements coopérateurs de seulement 15 % sur toute la période considérée. Ceci constitue néanmoins un phénomène d'émergence de la

coopération au sens darwinien le plus strict étant donné que le niveau de coopération initial était nul.

Pour expliquer ce phénomène contre-intuitif, nous devons faire le lien entre évolution au niveau culturel et évolution au niveau génétique. L'équilibre au niveau culturel est globalement conformiste. Or les conformistes n'ont pas de préférences en faveur de l'un des deux traits *C* ou *D*. Le comportement de la majeure partie de la population sera donc dû à une dérive aléatoire, biaisée par l'influence des agents *maxi*, *mini* et *anticonformistes*, mais également par l'influence des caractères génétiques qui s'expriment à la naissance des agents. La première influence explique le taux de 40 %. La seconde est plus subtile puisque les caractères qui s'expriment dans le génome sont eux-mêmes influencés par ce qui se passe au niveau culturel. Du fait de ces influences croisées, nous allons pouvoir observer au niveau culturel, des structures émergentes analogues à celles que nous avons déjà rencontrées, qui se déplacent avec le temps. Ces structures vont se déplacer sur des échelles de temps relativement petites par rapport à l'évolution génétique. Les influences du déplacement de ces structures émergentes qui ont pour origine la dynamique métamimétique elle-même, seront moyennées spatialement sur de courtes échelles de temps, et auront très peu d'influence sur le niveau génétique. En revanche, les influences qui ont pour origine les structures émergentes dans le génome (cf. animations web) vont varier sur des échelles de temps qui sont précisément celles de l'évolution du génome. Le principal biais sur les structures au niveau des comportements culturels à long terme sera donc génétique.

Si nous regardons dans le détail, un agent naissant *mini* aura de grandes chances, même si son comportement génétique est défecteur, d'adopter à court terme un comportement coopérateur avant de devenir conformiste (puisque sous ces conditions environnementales, l'insatisfaction des *mini* les amènera tôt ou tard à changer de règles). De la même manière, un agent *maxi* aura de très grandes chances d'être défecteur dans sa jeunesse avant de devenir conformiste. Toujours parce que l'équilibre métamimétique au niveau des règles est conformiste, ceci aura pour conséquences que les régions où la proportion d'agents génétiquement *maxi* est forte vont être biaisées culturellement en faveur de la défection, alors que celles où la proportion d'agents génétiquement *mini* est forte vont être biaisées en faveur de la coopération. Étant donné qu'au niveau culturel nous assistons à des vagues de comportements coopérateurs ou défecteurs, les vagues de comportements défecteurs vont s'attarder plus longtemps au-dessus des régions qui sont génétiquement *maxi*, de même que les vagues de comportements coopérateurs vont s'attarder plus longtemps au-dessus des

régions génétiquement *mini*. Ceci explique, que les agents génétiquement *mini* sont favorisés par la sélection naturelle alors que les agents génétiquement *maxi* sont défavorisés.

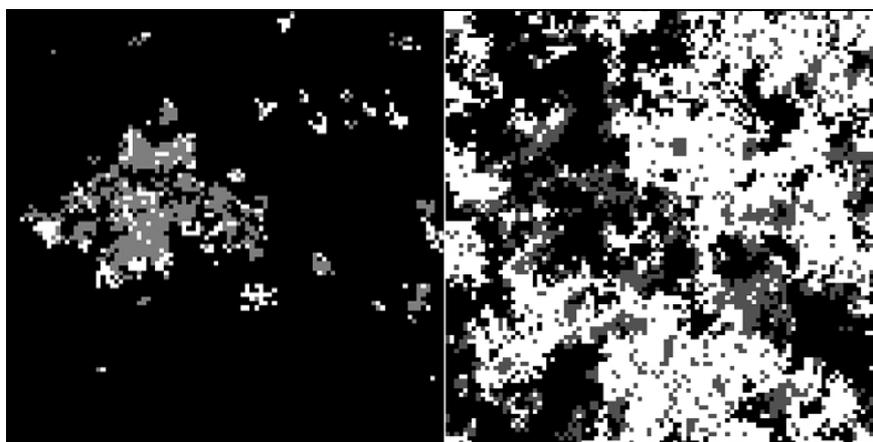


Figure 67 : Influence des allèles *maxi* et *mini* sur les comportements culturels. À gauche, structures émergentes au niveau culturel au sein des populations possédant l'allèle *maxi* (en gris les comportements défecteurs, en blanc les comportements coopérateurs). À droite, structures émergentes au niveau culturel au sein des populations possédant l'allèle *mini* (défecteurs en gris, coopérateurs en blanc). On remarquera sur chacune des figures, que le comportement minoritaire est en général aux frontières des clusters.

Ainsi, nous avons un enchevêtrement subtil d'influences réciproques entre le niveau génétique et le niveau culturel. Le niveau génétique influence les comportements au niveau culturel *parce que* l'équilibre métamimétique au niveau des métarègles est globalement conformiste, les structures émergentes au niveau culturel influencent en retour la composition du génome *à cause* des contraintes imposées sur ces structures par le niveau culturel des métarègles. Ceci mène à un résultat surprenant : dans cet exemple, *la sélection naturelle favorise la coopération* en faisant augmenter de près de 20 % de taux de coopération au cours d'une lente évolution. Par ailleurs nous pouvons conjecturer que le taux de coopération connaîtra une seconde phase de croissance si le taux de coopération dans le génome continue à croître de manière significative car nous aurons alors des phénomènes d'adoption en cascades, similaires à ceux que nous avons déjà étudiés, de comportements coopérateurs au sein de clusters conformistes défecteurs.

Pour conclure, nous remarquerons que nous avons ici un exemple avec *trois niveaux d'émergence enchevêtrés* : une émergence de structures au niveau génétique et une émergence au niveau des comportements culturels, toutes deux étant régulées par une émergence de structures au niveau des métarègles. *Ce sont donc les métadynamiques de la cognition sociale qui vont déterminer la co-évolution gènes/culture en posant des contraintes sur les*

dynamiques spatio-temporelles des formes émergentes au niveau génétique et au niveau des comportements des agents.

III.3.C Vers des réseaux sociaux endogènes

Nous ne pouvons pas terminer cette thèse sans reconnaître que nous nous sommes faits détourner de nos objectifs initiaux. Le but initial de notre recherche n'était pas d'étudier les systèmes mimétiques, mais de comprendre l'émergence de la topologie des réseaux sociaux. En effet, lorsqu'on s'intéresse au problème de la coopération, la première question à se poser est : Qui interagit avec qui ? De manière générale, si l'on envisage que les réseaux sociaux sont à la cognition sociale ce que les réseaux neuronaux sont à la cognition individuelle (Bourgin 2004), nous comprenons bien que la topologie des réseaux va avoir une influence non négligeable sur la dynamique du système.

Depuis quelques années, un nombre croissant de chercheurs s'intéressent à cette problématique. La première raison est que de nombreux modèles ont montré formellement l'influence incontournable de la topologie du réseau d'interactions sur les dynamiques des systèmes étudiés. Par exemple, un des buts de l'article de Nowak et May était de montrer que la dynamique de la coopération est très différente selon que le jeu est joué sur un réseau carré ou dans des conditions de tournois comme celles étudiées dans Axelrod 1984 ou Nowak & Sigmund 1989*, Nowak 1990*. Certaines études l'ont montré explicitement en considérant les deux conditions dans le cadre d'un même modèle (Cohen et al. 2001*). D'autres auteurs ont confirmé cette intuition en étudiant différentes topologies telles que les graphes aléatoires (Durán et Mulet 2003*, Ebel & Bornholt 2002*) ou des petits mondes (Abramson & Kuperman 2001*, Masuda & Aihara 2003*).

Le seconde raison de cet intérêt est un développement considérable de l'étude (Newman 2000*, Redner 1998*, Roth & Bourgin 2003*, Watts 1999) et de la formalisation (Newman et al. 1999*, Newman 2001*) des réseaux sociaux humains, notamment grâce aux nouvelles bases de données que constituent les pages web, les courriels et les archives scientifiques en ligne.

Très vite, des recherches ont visé à rendre endogène les réseaux sociaux en modélisation, en considérant que les réseaux étaient générés par les agents eux-mêmes, ceux-ci pouvant créer ou supprimer des liens avec d'autres agents en fonction de leur convenance et

de contraintes topologiques générales. D'après ce que nous avons déjà vu, nous ne serons pas surpris d'apprendre que ces types de modèle se divisent en deux catégories : dans la première catégorie, les agents ont des buts prédéfinis et disposent d'un certain nombre de procédures qui leur permettent de les atteindre (Bala & Goyal 1998*, Haller & Sarangi 2003*, Ferrer i Cancho & Solé 2001*, Weisbuch et al. 2002*, Zimmermann et Eguiluz 2001*), dans la deuxième catégorie, différents types d'agents, qui correspondent à différentes propensions à former des liens, évoluent selon une dynamique des répliqueurs dont le critère est exogène (Ashlock et al. 1995*, Bowles & Gintis 2000*, Jain & Krishna 2000*, Seth 1997*). Nous avons nous-mêmes proposé (Ahn et al. 2002*, Chavalarias 2002*) un modèle d'émergence de la coopération dans un cadre darwinien, avec la formation endogène du réseau social en environnement bruité. Nous avons alors montré qu'il pouvait y avoir émergence de la coopération dans une zone assez large de paramètres, même en cas d'environnement très bruité et de dilemme social fort, du moment que le temps de vie moyen des agents n'était pas trop petit. Ce modèle exhibait par ailleurs une région assez étendue de paramètres à l'intérieur de laquelle nous avons des équilibres hétérogènes.

Bien que fort intéressants dans le cadre d'une interprétation biologique, ces modèles rencontrent les problèmes évoqués dans la première partie à savoir, d'une part, la dynamique des répliqueurs agit sur des échelles de temps bien trop grandes pour pouvoir rendre compte d'une évolution de préférences d'origine culturelle sur les liens, d'autre part, les modèles de la première catégorie posent le problème de l'origine de la distribution des types d'agents. Le projet vers lequel se dirige l'approche que nous avons développée jusqu'ici, est donc de considérer que les liens que forment les agents, sont déterminés par des critères qui leur sont propres et qui évoluent en tant que traits modifiables, sous l'influence des métadynamiques. Les agents seront ainsi à la fois créateurs de leur personnalité et créateurs de l'interface (Γ) susceptible de la modifier. Les réseaux toriques ne sont donc qu'une étape intermédiaire, rendue nécessaire pour la clarté de la démonstration, l'objectif étant de rendre endogènes les voisinages à travers lesquels les agents interagissent avec le monde. Ce type de modèle aura par ailleurs l'avantage de permettre de tester empiriquement le formalisme métamimétique, étant donné que les caractéristiques des réseaux sociaux réels commencent à être relativement bien connues.

Il ne nous reste plus qu'à espérer que ce large détour par les chemins des phénomènes mimétiques aura engendré plus que son propre paysage.

Résumé du chapitre III.3

Nous avons tenté dans cette partie d'apporter quelques éléments de réponse à certaines questions qui se sont posées tout au long de notre parcours, en faisant entrevoir quelques directions possibles pour de futures recherches.

La première question traitée, évoquée au *III.2.A.b.* concerne le problème de la détermination des constantes de temps du modèle. Nous avons ainsi montré qu'il est possible au sein d'un modèle métamimétique, de rendre endogène la distribution d'un trait modifiable quelconque, discret ou continu, en prenant pour exemple la détermination des constantes de temps du modèle. Ceci nous a permis de vérifier que les propriétés que nous avons pu observer dans les chapitres précédents ne sont pas un artefact de la mise à jour parallèle synchrone que nous avons considérée.

La deuxième question concerne la relation entre l'évolution culturelle et des contraintes externes, comme par exemple des contraintes économiques ou la sélection naturelle. Il est ainsi possible d'introduire dans un même modèle la dynamique métamimétique et une dynamique de type réplicateurs afin d'étudier leurs influences mutuelles. Nous avons montré sur un exemple simple, que la métadynamique de la cognition sociale peut devenir très rapidement autonome par rapport à la dynamique du niveau biologique dès que le temps de vie moyen des agents est suffisamment long. En revanche il peut y avoir sur le long terme une nette co-évolution du niveau génétique et du niveau des comportements culturels, arbitrée par cette métadynamique. En particulier, nous avons vu que dans certaines situations, l'ajout d'une pression de sélection dans un jeu métamimétique peut sur le long terme accroître, par un jeu subtil entre le niveau génétique et le niveau culturel, le niveau de coopération, alors que d'un autre côté, la population sombrerait dans la défection si les agents n'étaient pas métamimétiques.

La dernière question, qui est certainement la plus importante dès lors que nous parlons d'imitation ou de cognition sociale est : Qui peut voir qui ? Qui peut interagir avec qui ? C'est donc la question de l'origine du réseau social sous-jacent aux interactions (Γ). Nous avons alors suggéré d'élargir l'approche des modèles de formation endogène des réseaux sociaux, qui s'appuient sur un critère fixe de sélection des liens, en considérant un ensemble de critères de sélection, qui évolueraient en tant que traits modifiables sous des dynamiques métamimétiques. L'ensemble des agents, vu comme un collectif, sera alors un système qui s'auto-organise, tant du point de vue de sa dynamique interne, que du point de vue de sa topologie, sous l'action de l'espace des règles.