



HAL
open science

Métadynamiques en Cognition Sociale Quelle définition de meilleur est la meilleure ?

David Chavalarias

► **To cite this version:**

David Chavalarias. Métadynamiques en Cognition Sociale Quelle définition de meilleur est la meilleure?. Modélisation et simulation. Ecole Polytechnique X, 2004. Français. NNT: . tel-00012087

HAL Id: tel-00012087

<https://pastel.hal.science/tel-00012087>

Submitted on 5 Apr 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Métadynamiques en Cognition Sociale

Quelle définition de meilleur est la meilleure ?

David Chavalarias

*Thèse présentée pour l'obtention
du grade de docteur de l'École Polytechnique*

Spécialité :
Sciences Cognitives &
Sciences des Systèmes Complexes

Date de soutenance : 25 Octobre 2004

Directeur de thèse :

M. Paul Bourgine, Directeur de l'Institut des Systèmes Complexes de Paris,
Enseignant-chercheur à l'École Polytechnique, CREA.

Rapporteurs :

M. André Orléan, Directeur de recherche au CNRS, CEPREMAP.

M. Karl Sigmund, Professeur à l'Institut de Mathématiques de l'Université de
Vienne, membre de l'Académie des Sciences Autrichienne.

Examineurs :

M. Jean-Pierre Dupuy, Professeur à l'École Polytechnique et à l'Université
Stanford, Directeur de recherche au CNRS.

Mme Mirta Gordon, Directeur de recherche au CNRS, IMAG.

M. Luc Steels, Directeur du laboratoire Sony CSL Paris, Professeur d'Informatique à
l'Université Libre de Bruxelles.

*A mes parents avec qui j'ai appris à marcher,
Aux chercheurs de qui j'ai emboîté le pas,
A la musique qui m'a permis de garder le pas léger.*

*Les opinions exprimées dans ce travail sont celles de l'auteur.
Elles n'engagent d'aucune façon l'Ecole Polytechnique*

REMERCIEMENTS

Ce travail est avant tout le fruit de nombreuses discussions, avec des interlocuteurs trop nombreux pour être tous mentionnés. Je tiens à les remercier collectivement, pour tous les échanges passionnants que j'ai pu avoir au cours de ces années de thèse. Je dois remercier en particulier T.K. Ahn, Henri Atlan, Michel De Glas, Nicolas Jonard, Jean Lassègue, Jean-Pierre Nadal, David Piotrowski, Jean Sallantin, Lucien Scubla, Bernard Victorri, Yves-Marie Visetti et Gérard Weisbuch.

Je suis très reconnaissant envers Ulrike Baumann, Jacques Durand, Myriam Henne-Ada, Christophe Jacquemin et Camille Roth pour les relectures et commentaires toujours judicieux.

Je remercie collectivement les membres du CREA pour l'effervescence intellectuelle et la grande convivialité qui y règnent ; ce qui serait impossible sans l'aide quotidienne de Marie-Jo Lecuyer, Danielle Bascle et Yamina Benfrid. Merci également au CNRS et à l'Ecole Polytechnique, dont les aides financières et matérielles m'ont permis d'écrire cette thèse.

Je remercie vivement les membres de mon jury, Mme Mirta Gordon, M. André Orléan, M. Karl Sigmund et M. Luc Steels. Merci d'avoir considéré mon travail et de m'avoir accordé votre confiance. Vos remarques et critiques ont été inestimables.

Je ne me serais certainement pas intéressé au problème de l'émergence de la coopération sans Jean-Louis Dessalles, dont la fougue au cours des passionnants débats du groupe MEL a suscité mon intérêt pour le sujet. Merci pour l'animation de ce groupe de recherche très stimulant.

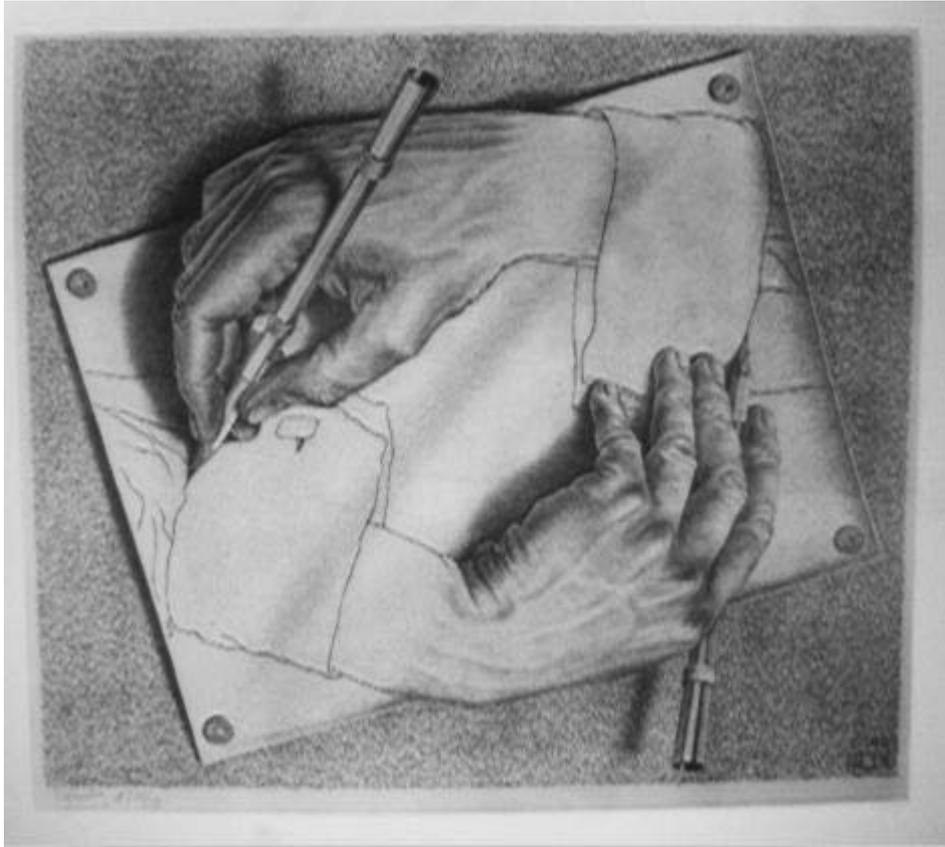
Un grand merci à Jean-Pierre Dupuy, qui a su me transmettre sa fascination pour l'auto-organisation, le mimétisme et l'autonomie du social. Je lui dois une grande partie des idées de cette thèse.

La vie d'un laboratoire ne serait rien sans l'implication humaine et scientifique de son directeur. Mille mercis à Jean Petitot pour son écoute, sa disponibilité et son interdisciplinarité exemplaires.

Dès le premier jour de notre rencontre, Paul Bourguine a attiré mon attention sur le niveau méta. Je sais maintenant que cette rencontre n'était pas un hasard. Merci Paul pour ta patience, tes encouragements, ta curiosité scientifique insatiable et communicative. Je ne doute point que tout ceci ne soit qu'un commencement.

Que serions-nous sans l'amour de nos parents ? Merci pour la vie.

Je ne remercie pas mon ordinateur.



Mains Dessinant, Escher 1948

Table des matières

INTRODUCTION	7
<hr/>	
PARTIE I	
<hr/>	
LA MODELISATION EN SCIENCES SOCIALES	13
I.1. UN EXEMPLE PARADIGMATIQUE : LA MODELISATION DE LA COOPERATION	15
I.1.A. DES FOURMIS ET DES HOMMES	15
I.1.B. SOCIETES D'INSECTES, SOCIETES HUMAINES	19
I.1.C. UNE APPROCHE FORMELLE DES SYSTEMES SOCIAUX AUTOUR DE L'EMERGENCE DE LA COOPERATION	21
I.1.C.a Modéliser la coopération	22
i. Le dilemme du prisonnier	22
ii) Un problème plus général	24
I.1.C.b La coopération en laboratoire	25
RESUME DU CHAPITRE I.1	29
I.2. IMITER A DIX MILLE : LES JEUX SPATIAUX	31
I.2.A. JEUX EVOLUTIONNISTES ET CHAOS SPATIAL	31
I.2.B LE CHAOS EST-IL ROBUSTE ?	39
RESUME DU CHAPITRE I.2	42
I.3. LA PRATIQUE DE LA MODELISATION EN SCIENCES HUMAINES	43
I.3.A. MODELISER AU QUOTIDIEN	43
I.3.A.a. Hasard, nécessité et volonté	45
I.3.A.b. Modéliser la modélisation	47
I.3.B LE PROBLEME DE LA REGRESSION INFINIE	48
I.3.B.a. Les populations hétérogènes	48
I.3.B.b Des agents à niveaux de contrôle multiples	51
I.3.B.c Déterminisme ou hétérogénéité	53
I.3.C. LE GENOME POUR FONDATION	55
I.3.C.a L'approche de la sociobiologie	57
I.3.C.b La co-évolution gènes-culture	58
I.3.C.c La culture est-elle adaptée ?	63
RESUME DU CHAPITRE I.3	66
I.4. LES PARADIGMES EN MOUVEMENT	67

PARTIE II

LA SPECIFICITE LA COGNITION HUMAINE	75
INTRODUCTION	77
II.1 LA PART DE L’HOMME, LA PART DE L’ANIMAL	83
II.1.A LES ANIMAUX ONT-ILS DES CAPACITES META-COGNITIVES ?	85
II.1.A.a La décision en situation d'incertitude	86
II.1.A.b Les tests de mémoire et de méta-mémoire, limites de la méta-cognition animale ?	89
II.1.A.c Conclusions : une méta-cognition rigide	92
II.1.B QUELQUES EXEMPLES D’APPRENTISSAGE SOCIAL NON HUMAIN	93
II.1.B.a Les singes laveurs de patates	93
II.1.B.b L’utilisation d’outils chez les chimpanzés	94
II.1.B.c. La communication gestuelle chez les chimpanzés	95
RESUME DU CHAPITRE II.1	98
I.2. LE ROLE DE L’IMITATION DANS LE DEVELOPPEMENT	99
II.2.A LE DEVELOPPEMENT DE L’IMITATION CHEZ L’ENFANT	100
II.2.B L’IMITATION ET L’ELABORATION D’UN SYSTEME DE REPRESENTATIONS	106
II.2.B.a L’imitation, processus de re-présentation	106
II.2.B.b Réflexivité et manipulation des représentations	110
RESUME DU CHAPITRE II.2	117
II.3 LA REFLEXIVITE DANS LA COGNITION HUMAINE	118
II.3.A LES PROCESSUS DE REPRESENTATION ET REDESCRIPTION	119
II.3.B CONNAISSANCE DIRECTE ET CONNAISSANCE REFLEXIVE	120
II.3.C L’AUTO-REGULATION HIERARCHIQUE DES SIGNES	122
RESUME DU CHAPITRE II.3	123
II.4. ENTRE METACOGNITION ET REFLEXIVITE	125

PARTIE III **129****LES SYSTEMES METAMIMETIQUES** **129**

INTRODUCTION	131
LA CYBERNETIQUE DE SECOND ORDRE ET LE PARADOXE DE L' AUTO-ORGANISATION	131
LE COUPLAGE PAR <i>INPUT</i> , LE COUPLAGE PAR <i>CLOTURE</i>	134
III.1 UNE APPROCHE FORMELLE DES SYSTEMES MIMETIQUES	139
III.1.A. ÊTRE SA PROPRE METAREGLE	139
III.1.B. LA META-COGNITION ET LA REFLEXIVITE DANS UNE DEFINITION DE L'IMITATION	142
III.1.B.a. Le problème du critère d'imitation	142
III.1.B.b. Définir les règles d'imitation	146
III.1.C. LE JEU METAMIMETIQUE	155
III.1.C.a Définition du jeu	156
III.1.C.b Mise à jour des traits modifiables	159
III.1.C.c Interprétation de la condition P3 : réflexivité et auto-cohérence des règles	164
III.1.C.d L'imitation est-elle une métarègle ?	167
III.1.C.e L'espace des états du système	172
III.1.C.f Entre couplage par input et couplage par clôture	174
III.1.D LES METADYNAMIQUES	178
III.1.D.a L'insatisfaction	179
III.1.D.b La réplication par imitation	181
III.1.D.c La dynamique des répliqueurs	182
III.1.D.d Concepts de stabilité pour les jeux métamimétiques	186
III.1.D.d.i) Les dynamiques non bruitées	186
III.1.D.d.ii) Les dynamiques bruitées	188
III.1.D.e La co-détermination des métadynamiques et de l'espace des stratégies	190
III.1.D.f Bruit et nouveauté dans les jeux métamimétiques	194
RESUME DU CHAPITRE III.1	195
III.2 PREMIERS EXEMPLES DE SYSTEMES METAMIMETIQUES AUTOUR DU DILEMME DU PRISONNIER	197
III.2.A LE DILEMME DU PRISONNIER METAMIMETIQUE SPATIALISE	198
III.2.A.a Description du jeu	198
III.2.C.b L'espace des règles d'imitation	200
III.2.B. LA DYNAMIQUE INTERNE DES JEUX METAMIMETIQUES	203
III.2.B.a Quelques cas de jeux simples	206
III.2.B.a.i) L'art d'être anticonformiste dans une société conformiste	206
III.2.B.a.ii) Choisir l'opulence, faire vœu de pauvreté	209
III.2.B.a.iii) Devenir maximisateur par conformisme	212
III.2.B.b. Le mélange des genres	214
III.2.B.b.i) La structuration des différences	215
III.2.B.b.ii) Cartographie des attracteurs	221
III.2.C LA SELECTION PAR LE BRUIT	229
III.2.C.a Quel avenir pour les maximisateurs myopes dans une société conformiste ?	231
III.2.C.a.i) Pourquoi l'erreur sur les actions favorise-t-elle le conformisme ?	231
III.2.C.ii) Pourquoi l'erreur sur les méta-règles favorise-t-elle les comportements maximisateurs ?	236

III.2.C.a.iii) Diagramme de phases	238
III.2.C.a.iv) Que se passe-t-il à la frontière d'un groupe coopérateur ?	241
III.2.C.b L'incertitude dans une société <i>maxi-mini</i>	242
III.2.C.c L'effet des perturbations sur les systèmes métamimétiques	243
III.2.C.c.i) Etre sans mémoire en environnement bruité	244
III.2.C.c.ii) La mémoire retrouvée	246
III.2.C.c.iii) Une distribution endogène des règles d'imitation	247
III.2.C.c.iv) Emergence de la coopération par différenciation	251
III.2.C.c.v) La nouveauté et le bruit	256
RESUME DU CHAPITRE III.2	258
III.3 POINT DE VUE METAMIMETIQUE SUR QUELQUES PROBLEMES CLASSIQUES DE MODELISATION	259
III.3.A. UN PRINCIPE D'ENDOGENEISATION DES DISTRIBUTIONS DES PARAMETRES PROPRES : L'EXEMPLE DES CONSTANTES DE TEMPS	260
III.3.B MODELISER LA CO-EVOLUTION GENES-CULTURE	263
III.3.B.a Dynamique métamimétique et dynamique des répliqueurs	264
III.3.B.b La sélection naturelle favorise la coopération	266
III.3.C VERS DES RESEAUX SOCIAUX ENDOGENES	273
RESUME DU CHAPITRE III.3	275
CONCLUSIONS	277
L'AUTO-ORGANISATION DU SOCIAL PAR LES PHENOMENES METAMIMETIQUES	279
LIMITES DE CETTE APPROCHE	283
LES AGENTS METAMIMETIQUES ET LEURS INSTITUTIONS	285
ANNEXES	289
Annexe informatique : algorithmes utilisés pour les simulations	291
III.2.B. La dynamique interne des jeux métamimétiques	291
III.2.C La sélection par le bruit	292
III.3.A. Un principe d'endogénéisation des distributions des paramètres propres : l'exemple des constantes de temps	293
III.3.B.b La sélection naturelle favorise la coopération	293
Annexe III.1.D.c : La dynamique des répliqueurs	295
ANNEXE III.2.B.A.II) : CHOISIR L'OPULENCE, FAIRE VŒU DE PAUVRETE	297
Annexe III.2.B.a.iii) : Devenir maximisateur par conformisme	301
Annexe III.2.C.a- i) : Pourquoi l'erreur sur les actions favorise-t-elle le conformisme ?	304
Annexe III.2.C.a- ii) : Pourquoi l'erreur sur les métarègles favorise-t-elle les comportements maximisateurs ?	307
BIBLIOGRAPHIE	313
INDEX	323
NOTATIONS.	327

Table des encarts

1 : Différences intra-groupes et inter-groupes dans le jeu de l'ultimatum	p 28
2 : Aux origines du chaos	p 36
3 : Quelques définitions du mot culture	p 56
4 : Un modèle de co-évolution gènes-culture	p 61
5 : L'émergence de la culture	p 65
6 : L'apprentissage social	p 80
7 : Théorie de la simulation vs. Théorie de la théorie	p 109
8 : L'impossibilité d'une auto-organisation forte	p 133
9 : D'où viennent les critères d'imitation ?	p 149
10 : Le dilemme du prisonnier métamimétique	p 158
11 : La question de l'inférence des traits	p 163
12 : L'imitation et l'éducation : deux principes de la prise de décision	p 170
13 : Quelques concepts de stabilité	p 184
14 : Exemple minimal d'un jeu métamimétique	p 187
15 : Exemple minimal d'un jeu métamimétique perturbé	p 188
16 : Comment voir un attracteur ou un SSS ?	p 204

Remarque importante

Les références marquées d'une étoile (par exemple Young 1993*), ainsi que la thèse, sont disponibles au format électronique sur le CD-Rom qui accompagne cette thèse. Les annexes informatiques sont disponibles sur le CD-Rom et sur le site Internet <http://chavalarias.free.fr/>

Introduction

Lorsque l'on observe le règne animal dans sa diversité, une chose est particulièrement frappante. Alors que la grande majorité des espèces vivent au sein de groupes relativement restreints, les espèces capables de s'organiser en grands groupes sociaux - dépassant les centaines de milliers voire les millions d'individus - se répartissent aux deux extrémités de l'échelle de la complexité individuelle.

En bas de cette échelle, se trouvent les insectes sociaux, fourmis, termites, abeilles, qui créent des communautés géantes pouvant atteindre plusieurs millions d'individus coordonnés de façon minutieuse. Ainsi, sont réalisées collectivement des tâches aussi extraordinaires que la chasse collective, la culture de champignons, l'élevage d'autres insectes ou la construction de véritables cathédrales de terre. Cela, sans qu'aucun des membres n'ait de représentation de l'activité globale de la société. Cette capacité d'une espèce à passer de comportements individuels simples à des comportements collectifs complexes est appelée *intelligence collective* (Bonabeau & Théraulaz, 1994). C'est un phénomène si remarquable que des recherches récentes en ingénierie visent à en tirer partie pour résoudre des problèmes qu'une organisation centralisée aurait du mal à résoudre (construction collective par une myriade de mini robots d'une station spatiale sur mars, recherche d'information dans les grandes bases de données, organisation de réseaux de télécommunication)

En haut de l'échelle de la complexité, une seule espèce présente des phénomènes de coordination et de coopération grande échelle : l'espèce humaine. Entre les insectes et nous, tout se passe comme si les individus des différentes espèces, en gagnant en autonomie et en intelligence, avaient perdu la capacité de se coordonner de manière efficace (Bourguin 2004). Pour ces espèces intermédiaires, il semblerait que l'hétérogénéité inter-individuelle nuise à l'organisation des grands groupes sociaux.

L'intelligence collective des insectes sociaux commence à être bien comprise des éthologistes. Elle est due à des phénomènes émergeant de l'agrégation d'événements individuels, qui sont possibles précisément parce que les membres de ces communautés ont des comportements homogènes et stéréotypés, favorisés par la simplicité de leur organisme et leur grande proximité génétique. En revanche, l'origine de l'organisation spontanée des groupes sociaux humains est bien moins évidente ; plus que la dégénérescence de la taille des

groupes chez les animaux cognitivement évolués, c'est plutôt le retour de cette coordination à grande échelle au niveau de l'espèce humaine qui tient du miracle.

Comment aborder les phénomènes sociaux humains? Sont-ils eux-aussi réductibles à des phénomènes d'agrégation de comportements individuels, comme le suppose *l'individualisme méthodologique*? Ou devons-nous au contraire adopter une position *holiste*, en attribuant aux systèmes sociaux des propriétés supra-individuelles, irréductibles aux propriétés de leurs composants? Il y a derrière ces questions un enjeu intellectuel majeur : comprendre l'origine de la diversité des cultures humaines.

Si cette problématique est déjà ancienne, son renouvellement est favorisé par le développement, ces dernières décennies, de la modélisation en sciences sociales. Les mathématiques et la physique statistique offrent de nombreux concepts pour penser le passage du local au global ; les nouvelles sciences de la simulation multi-agents nous permettent par ailleurs d'étudier expérimentalement les propriétés émergentes de collectifs d'agents artificiels. On peut donc s'attendre à ce que le principal apport de la modélisation soit précisément de proposer un point de vue nouveau sur la relation entre le collectif et les individus.

La modélisation en sciences sociales n'a cependant pris que progressivement la mesure de cet atout. Dans la lignée de l'individualisme méthodologique, elle a fait ses premiers pas en traçant une frontière nette entre l'individu et le collectif. L'individu face au collectif, prend des décisions en accord avec ses objectifs, mais n'influence pas le collectif, ni ne subit son influence. Ce type de modélisation s'est effectué principalement dans le sillage de l'économie. Ce n'est qu'à mesure que la pratique de la modélisation a diffusé dans l'ensemble des sciences sociales, permettant un échange de concepts entre disciplines, que cette frontière est devenue perméable, rendant possible une co-détermination de ces deux entités. Aujourd'hui, avec l'approche *systèmes complexes*, qui s'attache à étudier les propriétés émergentes d'un grand nombre d'entités en interaction, elle s'est déformée au point d'englober, telle une membrane, les deux entités. Il n'y a plus, d'une part l'individu, et d'autre part le collectif, mais le collectif émerge des interactions entre individus, et influence en retour leurs comportements et leurs règles de décision. Pour cette raison, cette nouvelle approche a été appelée *individualisme méthodologique complexe*.

La première conséquence de ces développements est une modélisation de plus en plus fine de la manière dont l'environnement de l'agent influence ses règles de décision. Cette évolution est particulièrement visible en économie où sont apparus, à la suite des travaux de Friedman, le concept de « *rationalité substantive* », qui met l'accent sur le seul résultat de la

décision et non sur le processus ; puis le concept de « *rationalité procédurale* », introduit par Simon¹, qui met l'accent sur la procédure de décision ; enfin plus récemment, le concept de « *rationalité adaptative* », « *pour rendre compte de la manière dont l'acteur modifie ses règles de comportement à l'aide de métarègles, au cours d'un processus d'apprentissage qui s'exerce à plusieurs niveaux fonctionnels (une règle supérieure agit sur des règles inférieures) et temporels (une règle supérieure se modifie plus lentement qu'une règle inférieure)* » (Bourgine et Walliser 2002). Nous adopterons par la suite ce parti pris de représenter les processus de décision en termes de hiérarchies de règles.

Le seconde conséquence est un intérêt croissant pour les propriétés des collectifs du point de vue de la cognition. En définissant la cognition comme le traitement de l'information, dans le sens le plus large possible d'information, nous pouvons définir la *cognition sociale* comme une cognition distribuée sur l'ensemble d'un réseau social (Bourgine 2004). C'est le tout formé de l'ensemble des processus individuels de traitement de l'information, dans leur adéquation avec les réseaux locaux d'interaction. De même que la cognition individuelle permet à un individu d'apprendre, au cours d'interactions avec le monde qui l'entoure, la cognition sociale permet aux sociétés d'élaborer une intelligence collective et de co-évoluer avec leur environnement. En adaptant les concepts de la cognition individuelle, nous pouvons alors parler de *rationalité procédurale distribuée* et de *rationalité adaptative distribuée*, qui définissent la manière dont un système, constitué d'un ensemble d'agents en interaction, réagit à un moment donné au monde qui l'entoure, et modifie sur le long terme, la distribution des règles de décision en son sein. Il y a alors une dynamique sur les comportements des agents, définie par l'ensemble des règles de comportement ; et une *métadynamique* sur l'ensemble de ces règles, qui fait évoluer leur distribution dans la population.

Cependant, comme le fait remarquer Dan Sperber (1997), l'individualisme méthodologique ne saurait être à la hauteur de ses partis pris ontologiques s'il n'inclue pas dans son programme de recherche, la question d'une explication causale de la distribution, dans les groupes humains, des représentations guidant les processus de décision (autrement dit des métarègles de décision si nous faisons le choix de cette représentation). Si, à notre connaissance, aucun des modèles actuels ne permet de répondre à cette question, notre thèse est qu'une telle explication causale est possible dans le cadre d'une modélisation, avec la conviction qu'elle ne peut se poser véritablement qu'en se plaçant au niveau de la cognition

¹ Simon, H.A. (1976), From substantive to procedural rationality, In Latsis S.J. (ed), *Method and Appraisal in Economics*, Cambridge University Press, 129-148.

sociale. *Il est possible de rendre compte du caractère endogène de l'évolution de la distribution des règles et métarègles qui définissent les comportements au sein d'une société d'agents.*

Une mise au point épistémologique est nécessaire pour éviter tout malentendu sur le sens du terme « modélisation ». L'homme face à la Nature se construit tout un ensemble de modèles pour comprendre les régularités observées dans le monde. Certains d'entre eux s'expriment dans des langages formalisés. Dans ces cas-là, l'objectif de la modélisation est de reconstruire des faits stylisés, c'est-à-dire des régularités observées dans des données. Le principal enjeu de cette reconstruction est de proposer des concepts portant sur les relations entre les éléments mis en jeu dans ces données. Dans le cas des systèmes sociaux, un des principaux attendus de la modélisation est donc de proposer des concepts portant sur la relation entre l'individu et le collectif, autour de modèles mettant en évidence une hétérogénéité endogène et structurée des règles et métarègles au sein d'une population d'agents.

La question de l'endogénéisation de ces métadynamiques n'est cependant pas une mince affaire. Sa possibilité même est, aujourd'hui encore, une question ouverte. Elle nécessite en effet de se placer dans le cadre des systèmes auto-organisés : à partir du moment où les métadynamiques doivent être elles-mêmes le produit de la dynamique collective, il n'y a plus aucune fondation sur laquelle s'appuyer, tout est ordre émergent ou chaos. Or il existe des arguments forts contre cette possibilité d'émergence spontanée d'une organisation (Ashby 1962*). Pour répondre à cette question, nous allons devoir nous placer au niveau plus général de la question de l'auto-organisation.

La modélisation est avant tout un outil. Pour apprécier son utilité, il faut donc la juger sur la reconstruction de faits stylisés. Nous prendrons dans cet ouvrage le problème de la coopération comme champ d'application, et nous essaierons de montrer comment les problématiques rencontrées dans ce cadre mènent directement à la question du choix des métarègles. En retour, les avancées conceptuelles que nous allons proposer nous permettront à la fin de cet ouvrage, de proposer de nouvelles perspectives sur cette problématique.

Le plan de cet ouvrage est le suivant. Dans une première partie, nous analysons les différentes catégories de modèles en sciences sociales en prenant comme fil directeur la

modélisation de la coopération. Ceci nous permet d'identifier les structures caractéristiques de ce genre de modèles et de rechercher ce qui, dans la modélisation, pourrait être le support d'une endogénéisation des métadynamiques dont nous venons de parler. Nous montrons qu'aucun des modèles actuels ne permet de poser la question de l'évolution endogène des métarègles, celles-ci étant toujours considérées comme des *données* du point de vue de l'agent. Ceci nous permet néanmoins de dégager un certain nombre d'heuristiques qui ont été proposées par la communauté scientifique dans sa réflexion sur cette question.

Dans une deuxième partie nous nous interrogeons sur ce qui fait la *spécificité de la cognition humaine*, afin d'identifier certains éléments déterminants qui pourraient faire défaut dans les modèles actuels. L'argument de fond est qu'une modélisation qui ne prendrait pas en compte la spécificité de la cognition humaine risquerait de n'expliquer que la complexité des sociétés animales et non la spécificité des sociétés humaines.

Enfin dans une dernière partie, nous proposons un cadre formel pour la modélisation des systèmes sociaux, *les jeux métamimétiques*, qui utilise les observations de la deuxième partie pour proposer une réponse aux questions soulevées dans la première. Nous montrons en quoi ce type d'approche peut apporter de nouveaux éléments au débat sur l'émergence de la coopération, et plus généralement, proposer un éclairage nouveau sur l'émergence de structures au sein des réseaux sociaux.

Partie I

La modélisation en Sciences Sociales

L'avantage ! Qu'est-ce que l'avantage ? et vous chargeriez-vous de me définir très exactement en quoi consiste celui des hommes ? Et s'il arrivait parfois non seulement qu'ils puissent, mais qu'ils doivent désirer un préjudice au lieu d'un avantage ?

Notes d'un souterrain, Dostoïevski

I.1. Un exemple paradigmatique : la modélisation de la coopération

I.1.A. Des fourmis et des hommes

C'est par la fourmilière que les très estimables fourmis ont commencé, c'est probablement par elle qu'elles finiront, ce qui fait grandement honneur à leur constance et à leur esprit positif.

Notes d'un souterrain, Dostoïevski

Commençons par une expérience. Dans votre cuisine sortez votre balance et mettez-la sur la table. Mettez alors dans l'un des plateaux l'ensemble des êtres humains, et dans l'autre l'ensemble des fourmis terrestres. À quoi peut-on s'attendre ? La balance penchera du côté des fourmis. Cela signifie que la biomasse des fourmis est supérieure à celle de l'espèce humaine.

Toute personne qui a déjà vu les fourmis à l'œuvre, comprendra le succès évolutif de cette espèce. Elles font partie de l'ensemble des insectes sociaux dont les communautés sont les plus développées, et arrivent, par une coordination et une coopération sans faille, à exploiter de manière extrêmement efficace leur environnement.

Les fourmis légionnaires chassent en faisant des raids dans la forêt à plusieurs centaines de milliers d'individus, les fourmis tisserands cousent des feuilles pour construire leur nid, les coupeurs de feuilles cultivent au sein de leurs colonies un champignon spécial dont elles s'alimentent, et grand nombre d'espèces de fourmis pratiquent l'élevage d'insectes, tels que les pucerons ou les chenilles. Pourtant, les fourmis sont des êtres vivants très simples, aux capacités cognitives très limitées, pour autant qu'on puisse parler de capacités cognitives, et dont il est certain qu'aucune d'entre elles n'a de représentation globale, ni même partielle, de l'activité de la fourmilière. Ce décalage extrême entre simplicité individuelle et complexité des comportements collectifs a longtemps fasciné, et commence maintenant à être bien compris du point de vue scientifique. La fourmilière est en effet devenue l'un des exemples prototypique de *systèmes complexes* illustrant l'émergence d'une *intelligence collective* (Bonabeau & Théraulaz, 1994).

Un *système complexe* est défini comme un ensemble constitué d'un très grand nombre d'éléments interagissant entre eux, dont le comportement global ne se déduit pas directement

de la description des éléments pris individuellement. Ainsi, dans un système complexe, il apparaît au niveau global ou macroscopique, des propriétés dites *émergentes*, qui sont la conséquence des interactions massives.

Il est possible, par exemple, dans le cas des sociétés de fourmis, de rendre compte des comportements de recherche de nourriture par une approche système complexe. Comme chacun a pu le remarquer, les fourmis sont incroyablement efficaces pour trouver de nouvelles sources de nourriture et relier celles-ci à la fourmilière par le chemin le plus court. L'étude des fourmis révèle qu'après avoir découvert une source de nourriture, celles-ci reviennent au nid en déposant au sol une substance chimique et volatile appelée phéromone. Les fourmis sont sensibles à ces traces de phéromones, et sont capables de les suivre. Ainsi d'autres fourmis seront amenées à découvrir cette source de nourriture. Le comportement d'une fourmi n'est cependant pas déterministe au sens où celle-ci suivrait à coup sûr un trajet de phéromone. Avec une certaine probabilité, spécifique à l'espèce, une fourmi a des chances de se perdre, et d'effectuer ainsi une recherche aléatoire.

Ces trois traits comportementaux simples peuvent se modéliser afin de rendre compte du comportement de la fourmilière. Pour cela, il faut définir dans un espace virtuel un emplacement qui représente le nid des fourmis. On place à quelque distance de là des sources artificielles de nourriture. Puis on donne à l'ordinateur la description d'un agent artificiel sous la forme d'un ensemble constitué des trois règles que nous venons de mentionner :

1. un agent qui trouve une source de nourriture en prélève une partie et rentre au nid, en déposant des traces de phéromone artificielle sur son chemin,
2. un agent qui n'a pas de nourriture explore au hasard les alentours de la fourmilière,
3. un agent qui n'a pas de nourriture et rencontre une trace de phéromone, suit cette trace avec une probabilité $1-\varepsilon$, et poursuit une recherche aléatoire avec une probabilité ε .

On demande ensuite à l'ordinateur de faire évoluer un nombre N grand ($N=10\ 000$ par exemple) de tels agents et l'on observe ce qui se passe.

À partir de ce modèle, il est possible d'effectuer tout un ensemble d'expériences en faisant varier la taille des sources de nourriture, leurs emplacements, la taille de la colonie et la probabilité qu'a une fourmi de ne pas suivre une trace de phéromone. Durant ces

expériences, on relève les structures émergentes de ces systèmes d'agents et on mesure l'efficacité avec laquelle les fourmis artificielles exploitent les sources de nourriture. Ces expériences de vie artificielle montrent que l'organisation spatiale et temporelle des sociétés d'agents correspond assez bien à ce que l'on peut observer chez les fourmis. Ainsi, bien que les agents artificiels soient purement réactifs et sans aucune sorte de représentation, leur comportement collectif est efficace et structuré. C'est ce qu'on appelle une propriété émergente du système. Le même type d'approche a été utilisé avec succès pour rendre compte d'autres caractéristiques des sociétés de fourmis et plus généralement des sociétés d'insectes (organisation spatiale des fourmilières, émergence d'une hiérarchie sociale chez les guêpes, construction des termitières etc.).

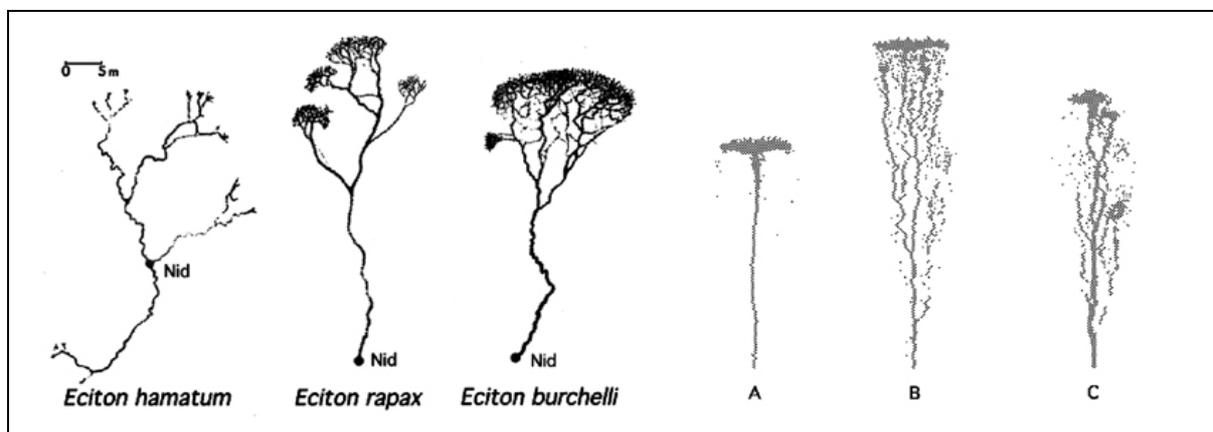


Figure 1 : Comparaison entre les structures émergentes engendrées par les comportements de chasse de trois espèces de fourmis légionnaires (à gauche), et les structures émergentes apparaissant dans les simulations des modèles mathématiques lorsque l'on fait varier les paramètres du modèle (source : Deneubourg et al. 1989)

Comprenons bien ce qu'apporte l'approche *systèmes complexes*. Dans l'exemple précédent, la modélisation du comportement de chasse des fourmis n'est en aucun cas une modélisation de la fourmi. Nous n'avons pas décrit comment une fourmi faisait pour se mouvoir, pour se nourrir, pour fabriquer la phéromone, et à vrai dire, nous n'avons pratiquement rien dit sur les fourmis. Modéliser le comportement de la fourmilière ne consiste donc pas à reproduire une fourmi dans le silicium. Nous en serions d'ailleurs tout à fait incapables, quand bien même nous ferions appel aux meilleurs spécialistes. Le but de ce type de modélisations est tout autre. Il consiste à rechercher les caractéristiques des fourmis qui suffiraient à expliquer l'émergence de certaines propriétés globales, avec pour objectif de reconstruire certains types de phénomènes émergents, et de mesurer l'importance de certains facteurs individuels dans l'apparition de ces propriétés globales.

Par exemple, dans le cas de la modélisation des fourmilières, l'étude révèle l'importance des traces de phéromone déposées dans l'environnement pour la structuration de la fourmilière. Ce type de traces est appelé traces stigmergiques. Par ailleurs, fait moins intuitif, la probabilité qu'une fourmi a de se perdre est également un paramètre déterminant pour comprendre le comportement collectif. En retournant à l'observation de terrain, il est possible de montrer, en comparant différentes espèces de fourmis, qu'il est adapté à l'environnement dans lequel vivent les colonies. Intuitivement, si les fourmis ne se perdent jamais, une fois une source de nourriture trouvée, toute la colonie va s'y approvisionner et se retrouvera en rupture de stock une fois la source épuisée. En revanche, si les fourmis ne tenaient jamais compte des traces de phéromone, nous assisterions à une exploration désordonnée sur tout le territoire. L'information récoltée par une fourmi à propos d'une source de nourriture ne serait jamais transmise au reste de la collectivité.

Entre ces deux extrêmes, il y a un comportement optimal qui est tel que la fourmilière exploite les sources de nourriture découvertes, alors même qu'une petite partie des ouvrières explore le reste du territoire aléatoirement, permettant la découverte de nouvelles ressources. Le compromis optimal entre exploitation des sources de nourritures découvertes et exploration du territoire dépend des caractéristiques de l'environnement dans lequel se trouve la fourmilière. Si les sources de nourriture sont abondantes, la part de l'exploration pourra être réduite ; elles sont rares, elle devra être augmentée. Le compromis exploration/exploitation est donc un paramètre déterminant dans l'activité de recherche collective de nourriture. La sélection naturelle a progressivement amené les différentes espèces de fourmis à trouver un paramètre exploration/exploitation relativement proche de la valeur optimale associée à leur écosystème. Nous avons donc ici un exemple où une part d'aléatoire, de bruit au niveau individuel, se projette au niveau collectif en un compromis exploration/exploitation structurant pour la communauté.

I.1.B. Sociétés d'insectes, sociétés humaines

Une fois expliquées, en termes de systèmes complexes, certaines propriétés globales des comportements collectifs des fourmis, il est possible de rendre compte, dans le cadre du paradigme darwinien, des raisons qui ont permis une telle organisation. En effet, les sociétés d'insectes sociaux ont toujours une structure très particulière : un individu unique, la reine (un très petit nombre d'individus dans certains cas), est chargé de la procréation, alors que le reste de la communauté, des ouvrières stériles, est chargé de s'occuper de tout ce qui concerne la survie de la colonie (construction et protection du nid, recherche de nourriture, etc.). Ainsi, tous les membres d'une même fourmilière ont grosso modo 75 % de leur patrimoine génétique en commun. Ils sont donc des quasi-clones et la faible complexité de leurs organismes engendre des comportements stéréotypés leur permettant de se coordonner de manière extrêmement précise. Par ailleurs, la stérilité de certains individus n'est pas préjudiciable à leur reproduction du point de vue de leur génome, puisque l'individu qui leur a donné naissance engendre également des individus reproducteurs. L'hétérogénéité des rôles que nous pouvons observer au sein d'une fourmilière provient d'une différenciation qui s'effectue au cours de l'ontogenèse² et non d'une hétérogénéité génétique. Ces deux caractéristiques, homogénéité génétique et différenciation ontogénétique, sont les facteurs qui permettent aux insectes sociaux de former des supers-organismes qui témoignent de phénomènes de coordination à grande échelle (au sens d'accomplissement collectif d'une même tâche) et coopération à grande échelle (au sens d'efforts consacrés par certains individus au bénéfice d'autres individus).

Ceci étant, nous comprenons assez bien pourquoi ce système d'organisation est incompatible avec le mode de reproduction des mammifères. Ceux-ci ne donnent naissance qu'à quelques individus par an, alors que par exemple, chez certaines espèces de fourmis, une reine peut pondre jusqu'à 300 000 oeufs par jour. Une des conséquences est que les différentes espèces de mammifères présentent en leur sein une très grande diversité inter-individuelle, aussi bien phénotypique que génétique, même au sein de groupes sociaux bien définis ; et force est de constater que les phénomènes de coordination et de coopération impliquent rarement plus d'une dizaine d'individus, le plus souvent apparentés (Wilson 1975). Tout se passe comme si, en perdant en proximité génétique et en gagnant en individualité, les

² Ontogenèse = développement de l'individu au cours de sa vie

mammifères n'avaient plus à leur disposition les liens qui permettent aux insectes sociaux de réaliser des tâches collectives. L'origine du problème est simple si l'on se place dans un cadre darwinien. Il tient en un mot : tricheur. Dans le cadre d'interactions répétées, si une lignée d'individus ne coopère pas et profite des efforts fournis par les autres, celle-ci aura un avantage reproductif sur le reste de la population. Dans le cas d'interactions entre individus non apparentés, une population de tricheurs pourra alors envahir une population de coopérateurs, et, à plus ou moins long terme, la tendance à coopérer disparaîtra.

Il est cependant une espèce de mammifères, et une seule, qui présente des phénomènes de coordination et coopération à grande échelle : l'espèce humaine (Bourguin 2004). Ce qui soulève la question suivante : Pourquoi nous, et pourquoi que nous ?

Nous proposerons une réponse dans le cadre de notre approche : les phénomènes de coopération à grande échelle sont la projection au niveau collectif de la diversité des stratégies que les êtres humains peuvent envisager. Mais n'allons pas trop vite. Il nous faut tout d'abord poser ce que nous appelons coopération en tant que fait stylisé, ce qui fera l'objet de la prochaine section.

Retenons de cet exemple, qu'en se plaçant au niveau de description des comportements collectifs, la théorie des systèmes complexes s'inscrit naturellement parmi l'ensemble des approches pertinentes. Dans une telle approche, l'objectif n'est pas de décrire dans le détail les comportements des agents, mais de comprendre la relation qu'il peut y avoir entre les phénomènes émergents, *certaines* caractéristiques individuelles, et les aléas de l'environnement.

I.1.C. Une approche formelle des systèmes sociaux autour de l'émergence de la coopération

La modélisation est un outil, et les modalités de son utilisation ne peuvent s'analyser que par rapport à une pratique. Nous illustrerons donc notre propos en prenant pour champ d'application le problème de l'émergence et la stabilité de la coopération. Nous allons dans cette section expliquer ce que nous entendons par coopération en tant que fait stylisé. Cela nous permettra par la suite de travailler sur des exemples clairement identifiés, à travers lesquels nous nous familiariserons avec les concepts classiques de la modélisation.

La modélisation des phénomènes de coopération a tout d'abord été abordée en 1964 par Hamilton, à propos de population d'individus apparentés, puis quelques années plus tard par Trivers (1971), qui a posé la question des phénomènes coopératifs dans une logique d'interactions répétées (*reciprocal altruism*). Cependant, comme le reconnaissent ces auteurs, une sophistication de ces approches est nécessaire pour expliquer la coopération entre individus non apparentés. Le sujet de l'émergence et de la stabilité de la coopération a connu par la suite un engouement variable, et a été remis au goût du jour dans les années 1980 par les travaux de Robert Axelrod (1984) avec cette question : sous quelles conditions la coopération peut-elle émerger dans un monde égoïste dépourvu d'autorité centrale ? C'est, depuis, devenu un sujet de recherche transdisciplinaire extrêmement dynamique, qui couvre des domaines aussi variés que la théorie des automates, la théorie des jeux, la biologie théorique, l'économie, les sciences politiques, la sociologie, la psychologie et l'anthropologie.

Dans le cas d'une approche formelle, la coopération est abordée sous la forme d'une situation stylisée, qui se représente sous forme de jeu. Plusieurs types de jeux ont été proposés pour modéliser les phénomènes de coopération, ceux-ci étant regroupés sous la catégorie des *dilemmes sociaux*. Le dilemme du prisonnier est le plus connu, et nous le prendrons comme exemple paradigmatique. Mentionnons toutefois d'autres types de jeux, très étudiés dans le cadre de l'économie expérimentale, dont nous évoquerons parfois les apports : la provision de biens publics ou de ressources communes (Dal Forno et Merlone 2004*, Ostrom et al. 1994, Sonnemans et al. 1999*), le jeu de l'ultimatum (Henrich et al. 2001*), ou le jeu de l'investissement (Cochard et al. 2004*, Fehr & Fischbacher 2003*).

I.1.C.a Modéliser la coopération

i. Le dilemme du prisonnier

Un vol vient d'être commis. La police soupçonne deux individus A et B. Ils sont séparés sans aucun moyen de communiquer et sont mis par les autorités devant le dilemme suivant : ils peuvent choisir de dénoncer l'autre (D) ou de rester muet (C). S'ils se dénoncent mutuellement, chacun écopera de quatre mois de prison. S'ils choisissent de se taire, chacun en prendra pour deux mois. Par contre, si l'un parle et que l'autre reste muet, ce dernier, considéré comme coupable, sera emprisonné cinq mois, tandis que le bavard sera relâché.

Cette situation apparemment simple est en fait un des plus célèbres paradoxes de la rationalité. Supposons en effet que *A* et *B* aient pour but de passer le moins de temps possible en prison, quels qu'en soient les moyens. Un rapide examen de la situation leur indiquera que, quelle que soit l'action de leur complice, ils sortiront plus vite de prison en parlant. En effet, si leur complice ne les dénonce pas, ils seront libérés au lieu de rester deux mois en prison ; si leur complice parle, ils ne resteront que quatre mois au lieu de cinq. En suivant ce raisonnement, tous deux parleront, et par conséquent, ils resteront, en définitive, quatre mois en prison, alors qu'ils n'auraient pu en faire que deux s'ils avaient tenu leur langue.

La situation du dilemme du prisonnier schématise le cas général où l'intérêt individuel est en conflit avec l'intérêt collectif. Elle a l'avantage de se modéliser facilement sous la forme d'un jeu à un coup entre deux joueurs, *A* et *B*. Les règles en sont les suivantes :

1. Chacun des joueurs a deux options: *C* (pour coopération) et *D* (pour défection).
2. Les joueurs jouent simultanément et sans annoncer leur action au préalable.
3. Une fois les jeux faits, des gains sont attribués suivants les quatre situations possibles résultant des choix individuels.

En notant *T*, *S*, *R* et *P* des nombres vérifiant les conditions deux contraintes suivantes :

contrainte 1 : $T > R > P > S$,

contrainte 2 : $T + S < 2R$,

le résultat du jeu peut se résumer par le tableau suivant :

Tableau 1 : Matrice synthétisant les gains obtenus au cours d'un dilemme du prisonnier.

Joueur B → ↓ Joueur A	B joue C	B joue D
A joue C	A et B gagnent R	A gagne S et B gagne T
A joue D	A gagne T et B gagne S	A et B gagnent P

Soit par exemple :

B → ↓ A	B joue C	B joue D
A joue C	A et B gagnent 3 €	A gagne 0 € et B gagne 5 €
A joue D	A gagne 5 € et B gagne 0 €	A et B gagnent 3 €

La contrainte 1 exprime deux choses. D'une part, quelle que soit l'action de l'adversaire, la défection apporte toujours, du point de vue individuel, un gain strictement supérieur à ce qu'aurait apporté la coopération toutes choses étant égales par ailleurs ($T > R$ et $P > S$). D'autre part, que la coopération mutuelle est strictement préférable, à titre individuel, à la défection mutuelle ($R > P$).

La contrainte 2 assure que collectivement, la coopération mutuelle est plus avantageuse que toutes les autres configurations. Entre autres, il n'y a aucun moyen pour les joueurs, une fois le jeu terminé, de partager les gains de manière à ce que, après partage, la coopération mutuelle eut rapporté moins qu'une autre combinaison de décisions.

Selon la situation étudiée, les coefficients T , R , P et S sont amenés à représenter des aspects très variés de la réalité comme par exemple, le temps consacré à une certaine tâche, la sécurité, le plaisir procuré à autrui, les gains monétaires au cours d'un jeu, etc. Ainsi, beaucoup de situations de la vie réelle ont une structure du type dilemme du prisonnier, comme par exemple la queue à un arrêt de bus ou la course aux armements entre deux pays.

ii) Un problème plus général

Dans sa forme originale, le dilemme du prisonnier est un jeu en un coup à deux joueurs. Il se généralise facilement en un jeu à plusieurs joueurs, qui traduit le même type de conflit entre intérêt collectif et intérêts individuels. Ces types de jeux sont appelés de manière générale *dilemmes sociaux*. Une situation proto-typique est par exemple le problème de la *provision de biens publics*. Si des villageois veulent construire un pont pour permettre le franchissement plus facile d'une rivière, ils peuvent être amenés à collecter des fonds ou à demander à chacun de participer à sa construction. Étant donné qu'une fois construit, tout un chacun pourra profiter également du pont, certains individus peuvent être amenés à ne pas contribuer à la construction en laissant faire les autres. S'il n'y a aucune obligation à contribuer, cette tendance à resquiller pourra en décourager certains, et le pont ne sera finalement peut-être pas construit.

Ces dilemmes sociaux sont présents à toutes les échelles de l'organisation sociale. Nous les retrouvons avec la même force lorsqu'il s'agit d'établir des décrets entre États concernant la réduction des gaz à effet de serre, que certains ne respecteront pas. Dans ce cas précis, il s'agit d'un dilemme légèrement différent du précédent, du type *gestion biens communs (Common Pool Resources)*. Il est caractérisé par le fait que l'exploitation du bien par certains individus peut détériorer le profit que peuvent en retirer les autres consommateurs (principe de rivalité), voire mener à la destruction du bien commun (un climat stable et de moindre variance qui deviendrait instable avec de fortes perturbations). La provision de biens publics et la gestion des biens communs font partie de dilemmes sociaux les plus difficiles et les plus tragiques, car dans ces cas, il n'est pas possible de sélectionner son action en fonction de son partenaire (ceci s'appelle en économie principe de non-exclusion). Tout le monde profite d'une contribution, et une trahison a un effet sur tous. Précisément parce que les problèmes de biens communs ou de biens publics sont les terrains les plus défavorables au maintien de la coopération, les principales situations modélisées dans cet ouvrage appartiendront à l'une de ces deux catégories. Le nombre d'ouvrages et d'articles consacrés aux différents types de dilemmes sociaux est considérable et nous ne pourrions en donner qu'un compte-rendu partiel. Un bon exposé des problèmes mis en jeu dans le cas particulier des biens communs, aussi bien du point de vue institutionnel, que social et individuel, pourra être trouvé dans le très instructif *Rules, Games, & Common-Pool Resources* (Ostrom et al. 1994).

I.1.C.b La coopération en laboratoire

Une fois déterminé un ensemble de situations qui représentent de façon schématique des situations de coopération, la question qui se pose naturellement est de savoir comment se comportent des êtres humains placés artificiellement dans ce genre de situation. Par exemple, de nombreux économistes et psychologues ont élaboré des expériences dans lesquelles ils faisaient jouer anonymement un dilemme du prisonnier à des joueurs volontaires. Les résultats obtenus sont très intéressants, car ils mettent en évidence l'hétérogénéité des comportements face à ce genre de situation.

Le protocole standard est le suivant ;

- des valeurs pour T , R , P et S vérifiant les contraintes 1 et 2 sont choisies par l'expérimentateur. Dans la littérature on retrouve fréquemment les valeurs $T=5$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$ qui sont celles choisies initialement par Axelrod.
- Un groupe de joueurs volontaires est réuni, et les joueurs se font expliquer le jeu à huis clos. Ils sont ensuite associés par paires de manière aléatoire, sans que les identités soient révélées.
- Le jeu est joué une et une seule fois par chaque paire, puis chacun repart avec des gains monétaires proportionnels aux gains obtenus au cours du jeu (par exemple 50€, 30€, 10€ ou 0€).

Les joueurs ne se voient donc jamais, n'ont aucune chance d'interagir à nouveau et n'ont aucune connaissance sur leur adversaire. En admettant que l'appât du gain constitue la principale motivation des individus qui ont consacré du temps à se soumettre à ce jeu, nous pourrions nous attendre à ce que la majorité des joueurs fasse défection. En effet, *quoi que fasse son adversaire*, le gain d'un joueur est *toujours* supérieur lorsque celui-ci joue D plutôt que C . Cette attente est en partie réalisée, mais fort heureusement, pas au niveau que le laisserait supposer une première approche. Les multiples études réalisées à ce jour révèlent en effet que le taux moyen de coopération se situe entre 40 et 60 % (voir par exemple Ahn et al. 2001).

Ce type de résultats se retrouve également lorsque l'on examine d'autres dilemmes sociaux, comme des situations de provisions de biens publics (Dal Forno et Merlone 2004*, Sonnemans et al. 1999*), le jeu de l'ultimatum (Henrich et al. 2001*) ou le jeu de

l'investissement (Cochard et al. 2004*, Fehr & Fischbacher 2003*), suggérant une forte prédisposition des sociétés humaines pour la coopération. Mais le plus intéressant est l'insistance des différents rapports d'expériences sur *l'hétérogénéité des règles de comportement* au sein des populations étudiées. Le plus bel exemple d'un tel constat est fourni par une étude récente portant sur les influences de la culture d'origine des joueurs sur l'issue de ce genre d'expériences (cf. encart I). Ainsi, après avoir mené une étude à large échelle sur différents continents autour du dilemme du prisonnier, du jeu de l'ultimatum et du jeu du dictateur, dans 15 sociétés traditionnelles de petites, Henrich et al. (2001*) nous livrent les conclusions suivantes³ :

We found, first, that the canonical selfishness-based model fails in all of the societies studied. Second, there is more behavioral variability than had been found in previous research. [...]

Our evidence leads us to recognize two fundamental types of behavioral heterogeneity:

- between group heterogeneity, which is apparently closely related to group differences in social structure and culture,
- and within group heterogeneity, which is for the most part unexplained in our study but which is strongly suggestive of the coexistence within groups of distinct dispositions, situationally cued mental models, or other behavior-producing constructs.

Ces résultats empiriques concernant les stratégies et les procédures de décision que sont capables de mettre en œuvre des êtres humains sont très importants dans le cadre d'une modélisation des systèmes sociaux. Ils mettent en évidence une diversité de comportements et de règles de comportements qui est désormais devenue l'une des principales propriétés dont cherchent à rendre compte les modèles. Nous montrerons dans la partie III comment il est possible d'envisager cette hétérogénéité du collectif comme une propriété intrinsèque des capacités cognitives des individus et des réseaux qu'ils forment. Les études empiriques que nous venons de mentionner ne prennent pas en compte cette dernière composante. L'observation des réseaux sociaux nécessiterait en effet de pouvoir observer sur le long terme, dans des conditions expérimentales, un

³ Nous avons trouvé, premièrement, que le modèle canonique fondé sur l'agent rationnel égoïste ne s'applique à aucune des sociétés étudiées. Deuxièmement, qu'il y a beaucoup plus de variabilités comportementales que ne l'ont montré les études précédentes.[...] Nos résultats nous ont amené à identifier deux types fondamentaux d'hétérogénéités :

- une hétérogénéité inter-groupes, qui est apparemment fortement liée à des différences dans leurs structures sociales et leurs cultures,
- une hétérogénéité intra-groupes, qui reste en grande partie non expliquée par notre étude, mais qui suggère fortement la coexistence à l'intérieur d'un même groupe, de différentes dispositions, de modèles mentaux contexte-dépendants ou d'autres types de processus de production de comportements.

nombre important d'individus, ce qui est difficilement réalisable. Nous allons donc nous tourner vers les sciences des systèmes complexes, qui vont nous fournir des exemples proto-typiques de l'effet de la structure du réseau sur les comportements collectifs dans le cadre des phénomènes de coopération.

DIFFÉRENCES INTRA-GROUPES ET INTER-GROUPES DANS LE JEU DE L'ULTIMATUM

Lors d'une étude dans 15 sociétés traditionnelles de petite taille, Henrich et al. (2001*) ont observé l'influence de la structure sociale et du contexte culturel sur le comportement des individus en situation de jeu. Cette étude s'est concentrée sur trois types de jeux : la provision de biens publics, le jeu de l'ultimatum et le jeu du dictateur. Le jeu de l'ultimatum est, comme le dilemme du prisonnier, un jeu à deux joueurs très classique. Quoique très différents dans sa structure du dilemme du prisonnier, nous avons choisi de présenter cette partie de leurs résultats, car elle est la plus facilement interprétable d'un point de vue graphique, et illustre de façon remarquable le propos des auteurs.

Le protocole est le suivant. Une certaine somme d'argent est attribuée à un joueur *A*. Il lui est ensuite demandé de la partager avec un autre joueur *B*. *A* propose alors au joueur *B* un certain pourcentage de cette somme. Dans un deuxième temps, *B* a le choix d'accepter ou de refuser cette proposition. S'il l'accepte, le partage est effectué et chacun repart avec sa part. Dans le cas contraire, l'expérimentateur reprend la somme d'argent, et personne ne gagne rien. La théorie du choix rationnel prédit que le joueur *B* devrait accepter le partage quelle que soit sa nature, car mieux vaut un peu que rien du tout. Le joueur *A*, sachant cela, devrait alors proposer un partage fortement à son avantage. Dans les faits, les choses sont bien différentes.

Comme le montrent les graphiques suivants (Figure 2 et Figure 3), les natures des offres sont très variées au sein d'une même société, et leur distribution varie significativement d'une société à l'autre. Nous pouvons voir clairement que le partage effectué par le joueur *A* n'est pas nécessairement à son avantage. De plus, le joueur *B* n'accepte pas nécessairement toutes les offres et, fait encore plus étonnant, certaines offres trop généreuses (au-dessus de 50 %) sont rejetées dans certains groupes (en particulier chez les Au et les Gnaou).

Après une étude prenant en compte le contexte économique et culturel des différentes sociétés étudiées, les auteurs ont montré qu'une part substantielle des variations comportementales inter-groupes pouvait être expliquée par le degré d'intégration économique de ces sociétés : plus le marché est développé ou plus la coopération est avantageuse au sein de ces sociétés, plus la pro-socialité s'est révélée marquée dans les expérimentations. En revanche, les variables individuelles démographiques ou économiques n'expliquent pas les variations comportementales intra-groupes, celles-ci ne peuvent être expliquées que par la coexistence de motivations différentes. Enfin, les comportements dans les situations de jeu sont cohérents avec ceux observés dans la vie quotidienne.

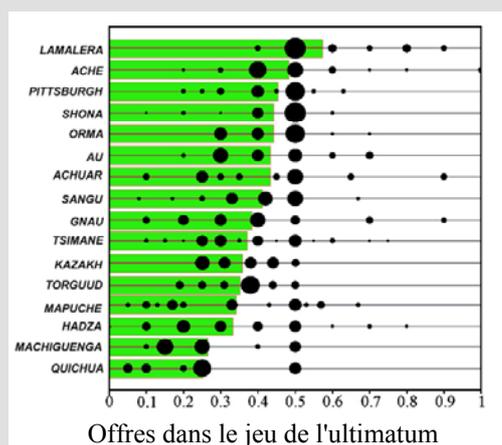


Figure 2 : Graphique montrant la distribution des offres dans le jeu de l'ultimatum pour chaque groupe (joueur *A*). La taille des bulles le long de chaque colonne horizontale représente la proportion de l'échantillon correspondant à ce niveau d'offre. Les barres grisées indiquent l'offre moyenne au sein de chaque groupe. Par exemples chez les Au, une grande partie des offres se concentrent autour de 25 % du montant total, tandis que la moyenne des offres est de 40 % du montant total.

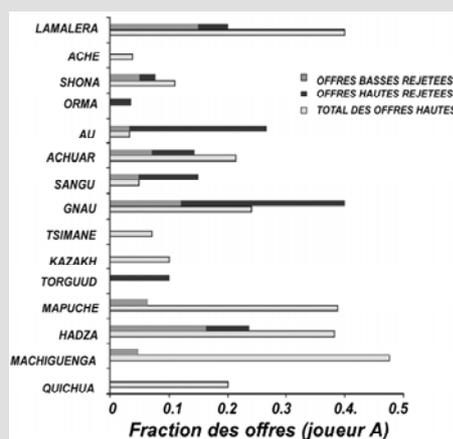


Figure 3 : Résumé des réponses aux offres dans le jeu de l'ultimatum (joueur *B*). Les barres en gris clair indiquent la proportion des offres dont le montant représente moins de 20 % du montant total. La barre en gris plus foncé située au-dessus représente la proportion totale des offres qui ont été rejetées par *B*, et sa partie la plus claire, la proportion des offres rejetées qui se situent en dessous de 20 %. Par exemple chez les Au, il y a eu environ 3 % d'offres en dessous de 20 % du montant total, qui toutes ont été rejetées. Les offres basses tracées pour les Lamalera sont une feinte de l'expérimentateur.

Résumé du chapitre I.1

En nous intéressant à l'organisation de la fourmilière, nous avons pu donner un premier exemple de *systèmes complexes* et de leur modélisation. Ceci nous a permis d'introduire la notion de propriété émergente, et de voir dans quelle mesure ce type de propriété pouvait être indépendant d'une description fine des individus. Certaines caractéristiques individuelles ont cependant été identifiées comme déterminantes pour le comportement collectif, parmi lesquelles la manière dont la fourmi résout ce que nous avons appelé le *compromis exploration/exploitation*.

Cette notion fondamentale en vie artificielle, intelligence artificielle, systèmes dynamiques et théorie de la décision consiste à décrire le rapport existant entre processus déterministes (suivre une trace de phéromone) et processus aléatoires (explorer au hasard). Dans cet exemple, l'efficacité de la fourmilière en tant que super-organisme dans la recherche de nouvelles sources de nourriture, est paramétrée de manière simple par une part d'aléatoire dans le comportement des fourmis, qui s'interprète au niveau collectif comme la résolution d'un compromis exploration/exploitation. Cette part d'aléatoire fréquemment appelée *bruit* ou *perturbations* en théorie des systèmes dynamiques, peut donc, si elle est bien ajustée, peut avoir un effet structurant sur le système.

La fourmilière est un exemple intéressant c'est un cas rare dans la nature, de coopération et de coordination à grande échelle. Si rare, que mis à part les insectes sociaux, seule l'espèce humaine présente de tels phénomènes. Si la complexité de la fourmilière commence à être bien comprise, celle des systèmes sociaux humains est toujours problématique. En particulier, la question de l'origine de la coopération humaine à grande échelle a fait l'objet de nombreuses études théoriques. Si la communauté scientifique s'accorde à modéliser les situations de coopération sous la forme du *dilemme du prisonnier* et de ses variantes, il n'y a pas actuellement de consensus dans la communauté scientifique autour de l'origine de la coopération. Parallèlement, des études empiriques ont mis en évidence un fait important : l'*hétérogénéité des procédures et des comportements* des êtres humains dans des tâches coopératives révèle une *hétérogénéité d'objectifs*.

La coopération étant un domaine de modélisation clairement identifié, nous l'avons choisie comme exemple prototypique de modélisation d'un fait stylisé. Nous étudierons donc des dilemmes sociaux, en essayant de rendre compte de l'émergence et de la stabilité de la coopération, ainsi que de l'hétérogénéité des buts des agents.

I.2. Imiter à dix mille : les jeux spatiaux

Parmi les divers principes susceptibles de modeler 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 (Bourguine 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 certains 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.

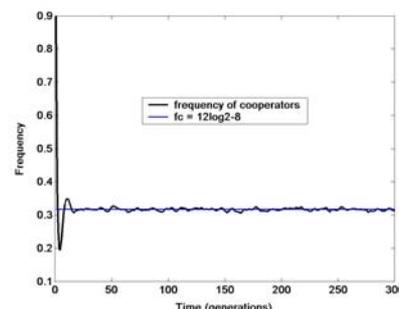


Figure 6 : Evolution du taux de coopération au cours du temps dans le régime chaotique. La courbe correspond à une simulation avec 40 000 agents. La droite horizontale est la proportion asymptotique de coopérateurs telle qu'elle est estimée par Nowak et May 1992 : $fc = 12 \log_2 - 8$.

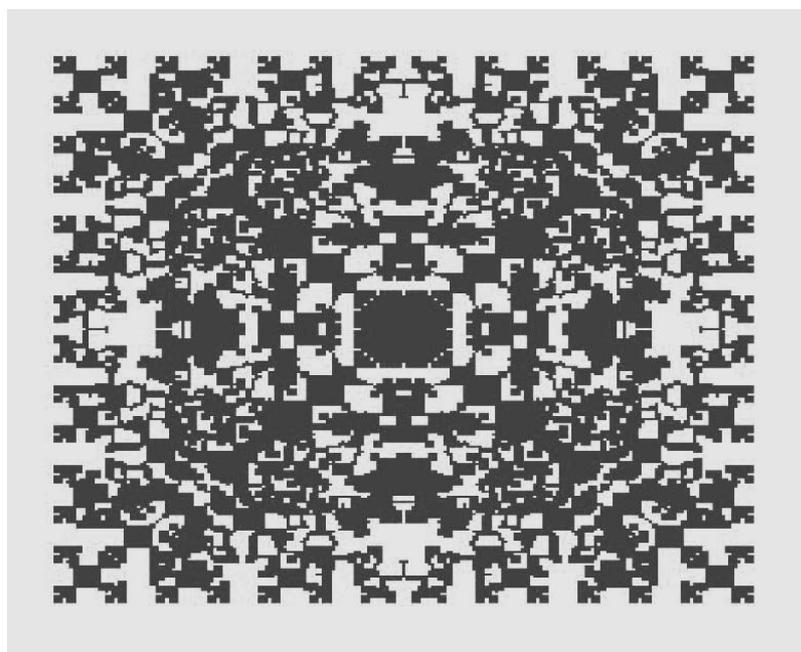


Figure 7 : Les quatre dragons. Exemple de structure spatiale caractéristique de la zone $1.8 \leq T \leq 2$ lorsque l'on met initialement un pavé de défecteurs au milieu d'un échiquier de coopérateurs (conditions initiales symétriques avec 90 000 agents). La figure ne cesse d'évoluer tout en conservant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

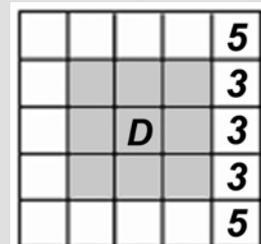


Figure 8 : cluster de défecteur 5×5 entouré de coopérateurs. Les coins ont 5 voisins coopérateurs alors que les arêtes n'en ont que 3.

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 défaut envahissant un réseau de coopérateurs. Supposons qu'au temps t^n , il existe un carré de défauts 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 défauts 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.

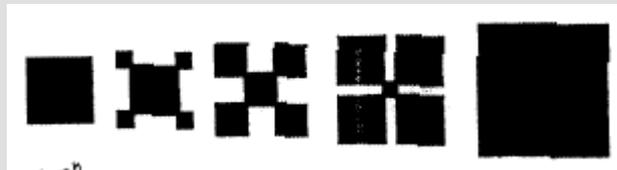


Figure 9 : Évolution simplifiée de la croissance d'un cluster de défauts (Nowak & May 1993)

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.

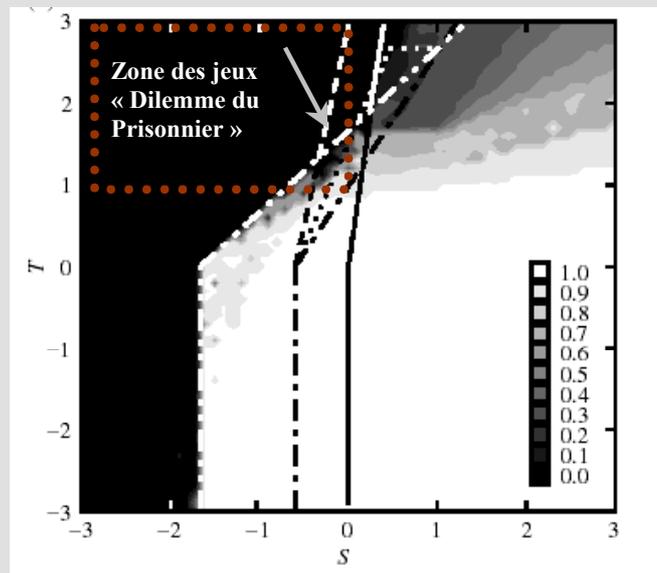


Figure 10 : Proportions moyennes de coopérateurs trouvées par simulations dans un jeu défini par $R=1$, $P=0$, T et S , avec une structure de voisinages de Von Neumann et auto-interaction (source : Hauert 2001*). Les conditions initiales consistent en 20 % de coopérateurs répartis aléatoirement sur une 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).

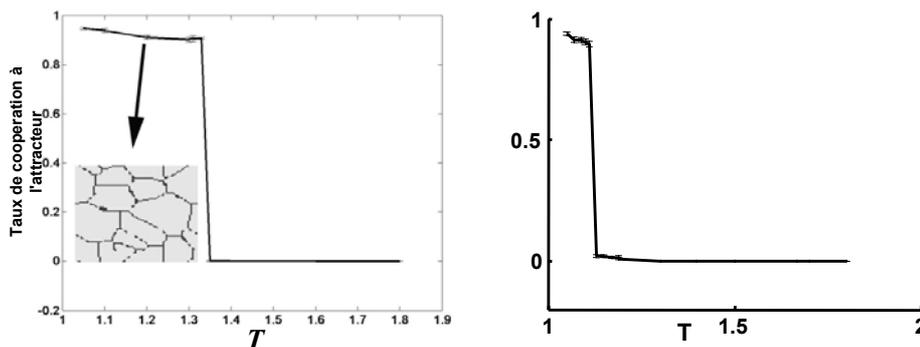


Figure 11 : Evolution du taux de coopération en fonction de T . Nous avons ici $P=1/3$, $R=1$ et $S=0$. Ceci étant, pour $T=5/3$, la matrice de jeu est proportionnelle à celle du dilemme du prisonnier standard ($T=5$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$) et définit donc le même jeu. À gauche, la dépendance du taux 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 règles '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 silico* 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

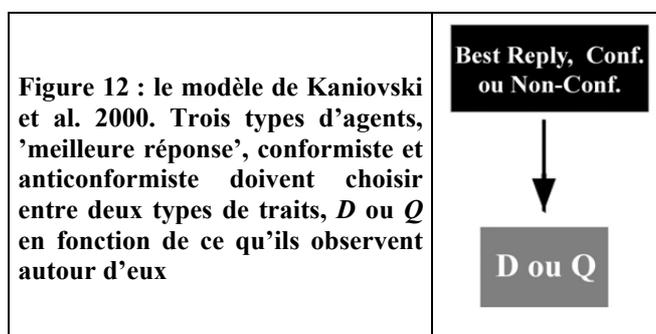
Nous allons parler ici des modèles qui considèrent des populations qui ne se renouvellent pas, mais dont les agents changent leur comportement au cours de leur vie, à travers un système de règles qui les caractérise. Nous avons déjà vu un exemple très simple de tels modèles lorsque nous avons étudié 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 :

<i>Employeurs</i> →		
↓ <i>Secrétaires</i>	<i>DVORAK</i>	<i>QWERTY</i>
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 sophistiquer 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 .

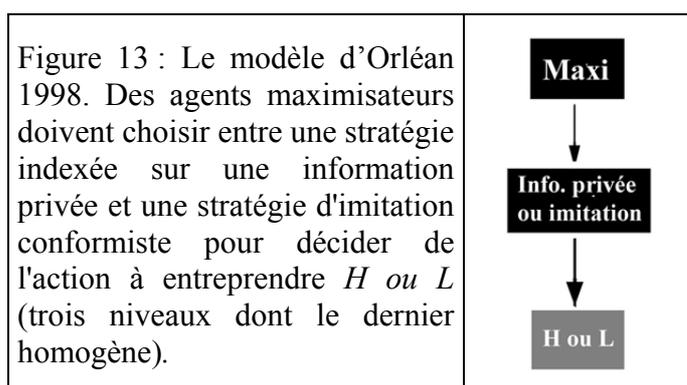
Ainsi, si l'on sait que $p > 0.5$, bien qu'individuellement les agents utilisant la stratégie I se trompent régulièrement avec une probabilité $(1-p)$, l'état du monde est indiqué avec quasi-certitude par le comportement adopté par la majorité d'agents I . Dans ce cas-là, choisir d'être conformiste dans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

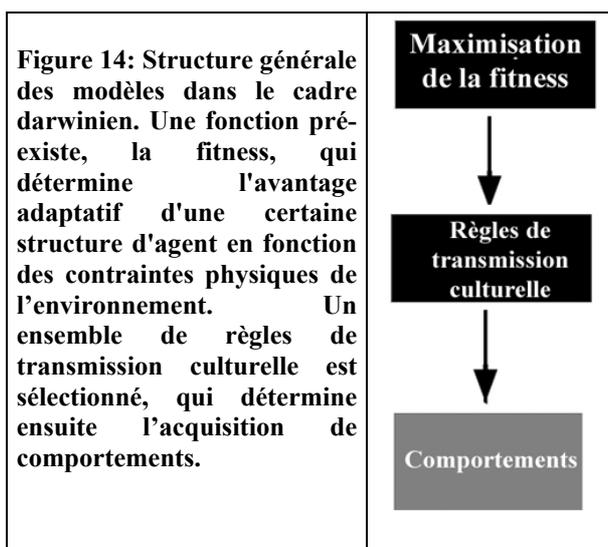
Le premier courant à avoir pris en compte des aspects génétiques dans une approche formelle des comportements sociaux fut la sociobiologie (Wilson 1975). Forts de leur succès dans l'explication de certains comportements sociaux animaux, les sociobiologistes ont entrepris de développer une théorie des 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).

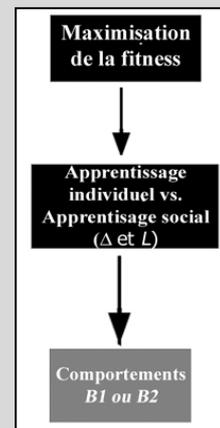
Les auteurs ont effectué une série de simulations en faisant varier m , ε et ρ à partir de populations initiales constituées à 99,99% d'agents s'appuyant sur un apprentissage individuel ($L=0$, $\Delta=0$), et avec 0,01% d'agents définis par des valeurs de L et Δ aléatoirement réparties entre 0 et 1. 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 ?

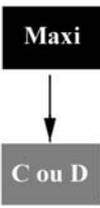
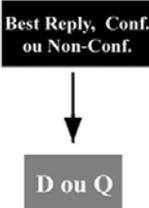
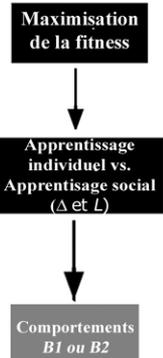
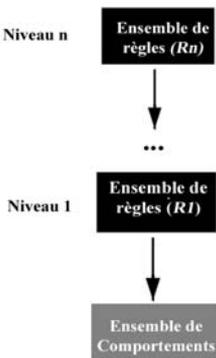
Le domaine de recherche initié par Boyd et Richerson est actuellement en plein développement et est labellisé *anthropologie évolutionniste*. Cependant, aussi intéressante que puisse être la question de la relation entre l'évolution génétique et la forme des processus de transmission culturelle tels 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

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

¹¹ « Lorsque les gains représentent l'avantage reproductif d'un individu, la dynamique des réplicateurs est une première approximation naturelle pour modéliser les dynamiques évolutives. 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 réplicateurs 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.

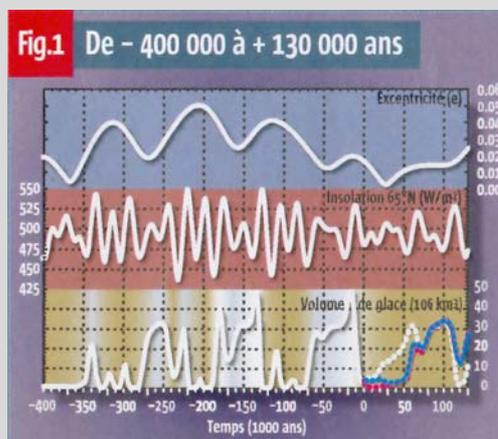


Figure 15 : Estimation de l'évolution du volume des glaces depuis 400 000 ans. La période autour de -50 000 est marquée par l'entrée dans la dernière période glaciaire. (Berger & Loutre, *La recherche*, 368 :42-46)

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.

1.4. Les paradigmes en mouvement

Economists must acknowledge that today microeconomic theory, the kernel of which is general equilibrium theory, is in crisis, though it is currently used to interpret observed facts. Why? Because we frequently encounter phenomena that it cannot explain easily, if at all. From this point of view, it is, to a certain extent, in the situation of Newtonian physics when the theory of relativity was about to appear. This comparison shows how irrelevant it would be to disregard classical microeconomics, as some people suggest. The important thing is to go beyond it¹².

Jacques Lesourne, *The Future of Cognitive Economics*, 2004

* *
*

The clear conclusion of gene-culture coevolutionary analysis is that cultural transmission can transform evolutionary dynamics in a numerous ways, implying that, for many questions related to human evolution or human behavior genetics, traditional methods and model are no longer appropriate.¹³

Gene-culture coevolutionary theory, Marc W. Feldman, Kevin N. Laland, de
TREE 1996*

Ces deux citations empruntées respectivement à la littérature économique et la littérature de l'évolution culturelle sont l'expression, de la part de personnalités phare de chacune de ces disciplines, d'une insatisfaction grandissante vis-à-vis des paradigmes dominants. Loin d'être isolées, ces différentes attaques se multiplient dans la littérature (voir Aumann 1997*, Bowles 2000a*, Henrich et al 2001*, Kirman 2004, Gintis 2003). L'étude des différents types de modélisation que nous avons menée dans les sections précédentes va nous permettre d'en entrevoir les points de convergence.

¹² « Les économistes doivent reconnaître qu'aujourd'hui, la micro-économie, coeur de ce qui est la théorie de l'équilibre général, est en crise, bien qu'elle soit fréquemment utilisée pour interpréter les faits observés. Pourquoi ? Parce que l'on rencontre fréquemment des phénomènes qui ne s'expliquent pas facilement, voire pas du tout. De ce point de vue, c'est dans une certaine mesure, la situation dans laquelle se trouvait la physique newtonienne lorsque la théorie de la relativité était sur le point d'apparaître. Cette comparaison montre comment il serait hors de propos d'écarter la micro-économie classique, comme le suggèrent certaines personnes. Les choses importantes se trouvent bien au-delà de ça. » [TdA]

¹³ « Les conclusions claires de l'analyse de la co-évolution gènes-culture et de la transmission culturelle de transformer les dynamiques évolutives d'un grand nombre de manières, ce qui implique que pour un grand nombre de questions liées à l'évolution humaine ou à la génétique des comportements humains, les méthodes et modèles traditionnels ne sont plus appropriés. » [TdA]

La première citation est tirée du livre *Cognitive Economics* (Paul Bourguine et Jean-Pierre Nadal ed., 2004), dont le thème général est de dresser un bilan de l'état de la science économique et d'en proposer de nouvelles perspectives et orientations en tirant partie des recherches en sciences cognitives. Cet article, qui vient en conclusion de l'ouvrage, est très révélateur. Jacques Lesourne y identifie une pièce manquante à la modélisation économique : la volonté. Ainsi, plus loin dans l'article nous pouvons lire :

The new element is the will of agents seeking to implement plans in the future on the basis of expectations (what they consider true) and of choices having favorable effects (what they consider good)¹⁴.

Les deux assertions entre parenthèses ne sont pas de simples précisions. Elles insistent sur le fait que c'est le point de vue des agents qui jusqu'à présent a été sous-représenté en modélisation. Ce qui importe, c'est ce qu'ils considèrent comme vrai et ce qu'ils considèrent comme bon. Il s'agit donc d'orienter la modélisation en économie vers une formalisation qui prenne en compte non seulement les actions des agents, mais également leurs buts et leurs motivations. La citation suivante d'Alan Kirman va nous permettre de mieux cerner ce qui est reproché au paradigme économique dominant. Elle est tirée du même ouvrage :

What should we assume about the preference of the individuals in the economy? Preferences govern choices and economists would like to make assumptions that will lead to "coherent" choices. Two things are important to note here. Firstly, preferences are taken to be given and to be fixed and immutable. They are influenced neither by experience nor by the choices of others. This is an assumption that will be called into question elsewhere in this book but it is basic to the general equilibrium model. Secondly, the intelligent reader will ask himself whether the assumptions made about preferences are made to obtain a result or whether they are made because they correspond to some fundamental notion as to what constitutes rationality. The reader may judge for himself.

Cette critique n'est pas uniquement d'ordre technique. Il ne s'agit pas de dire que les économistes auraient mal choisi une pièce de leur modèle. Lorsqu'on représente un agent économique, sous la forme d'une hiérarchie de règles intra-individuelles, les préférences sont

¹⁴ « Le nouvel élément est la volonté des agents cherchant à exécuter leurs plans du futur à partir de leurs prévisions (ce qu'ils considèrent comme vrai) et des choix qu'ils considèrent comme ayant des effets favorables (ce qu'ils considèrent comme bien). » [TdA]

logées au sommet de la hiérarchie. C'est effectivement ce qui gouverne le choix des agents. Si Kirman critique les économistes en leur reprochant de confondre leurs motivations avec celles des agents qu'ils modélisent, le point le plus important est que l'hypothèse de fixité des préférences n'est plus une simplification acceptable. Ainsi, l'enjeu pour la modélisation en économie est de comprendre comment le niveau des préférences évolue en fonction de l'expérience de l'agent, et de ce qu'il observe chez les autres agents.

Mais nous voyons bien qu'un tour de passe-passe qui consisterait à jouer sur la sémantique en faisant glisser le niveau des préférences vers un niveau inférieur dans la hiérarchie des règles, ce afin qu'elles puissent évoluer, ne changerait rien au problème. La gageure est donc d'introduire une interdépendance entre les préférences des agents qui ne se traduise pas par l'arbitraire d'une règle d'évolution indexée sur un critère fixe. Aux dires même des économistes, ce problème est à ce jour, encore ouvert. Nous pouvons cependant donner d'après les différentes études que nous avons menées, le portrait-robot du modèle qui intégrerait tous les niveaux évoqués. Dans un tel modèle (Figure 16) Le comportement d'un agent i évolue sur le court terme sous l'influence de ses procédures de choix rationnel (rationalité procédurale) guidés par un ensemble d'objectifs O_i , ces procédures évoluent sur le moyen terme sous des processus d'apprentissage guidés par des critères d'apprentissage C_i (rationalité adaptative), ces critères d'apprentissage évoluent sur le long terme sous influence sociale (rationalité collective) à travers le réseau social de l'agent.

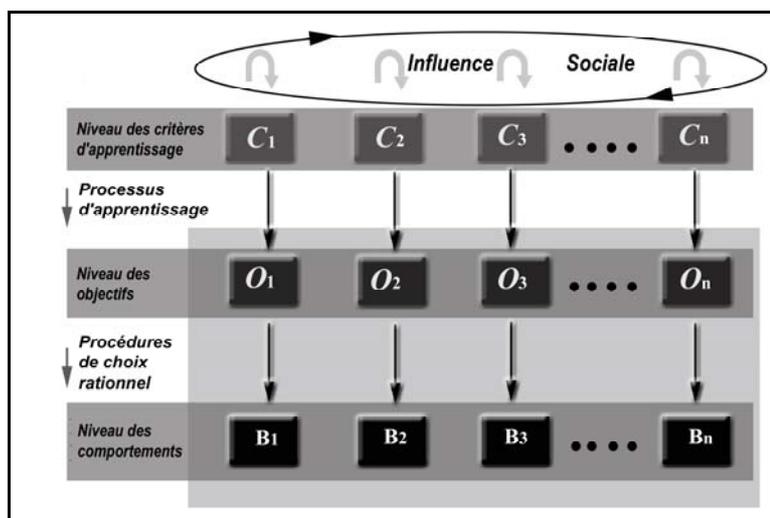


Figure 16 : Portrait-robot du modèle qui intégrerait les différentes forces d'évolution des comportements. Le comportement d'un agent i évolue sur le court terme sous l'influence de ses procédures de choix rationnel (rationalité procédurale) guidés par un ensemble d'objectifs O_i , ces procédures évoluent sur le moyen terme sous des processus d'apprentissage guidés par des critères d'apprentissage C_i (rationalité adaptative), ces critères d'apprentissage évoluent sur le long terme sous influence sociale (rationalité collective) à travers le réseau social de l'agent.

Si l'on se rappelle que les préférences consistent à savoir si l'on préfère le lait de vache au lait de soja, les films d'art et d'essai aux productions hollywoodiennes, les grenouilles au rosbif, on se rendra compte que l'évolution des préférences est étroitement liée aux problèmes que se posent les chercheurs travaillant sur l'évolution culturelle. Comme nous l'avons vu au I.3.C.c , ce dernier domaine de recherche se pose en fait exactement la même question, ce que résumait Henrich et al. (2001*, cf. encadré I) dans la conclusion d'une étude de terrain, déjà évoquée, mettant en évidence de façon claire des hétérogénéités inter-individuelles et inter-culturelles :

Why did members of different groups behave so differently? Why is there so much variation between human groups [...]?
Addressing this question will require theories that explain why and how different dispositions, different sets of contextual rules, or different modes of information processing spread in different groups and how they are maintained.¹⁵

Le fait que ce type d'hétérogénéité ne soit pas compatible avec un déterminisme génétique fort suggère qu'une attention particulière doit être portée sur la modélisation des mécanismes de transmission culturelle et leurs impacts sur l'organisation des systèmes sociaux. L'idée adoptée par un nombre croissant de chercheurs sur l'évolution culturelle, prend donc le parti d'un déterminisme génétique faible. Les capacités cognitives qui ont permis l'émergence de la culture auraient effectivement été sélectionnées pour leur caractère adaptatif, mais les formes culturelles que celles-ci ont rendues possibles ne sont pas nécessairement sous déterminisme génétique. Un autre mécanisme d'évolution a pris le relais de l'évolution génétique, avec une structure intrinsèquement lamarkienne. C'est cette transition que les modélisateurs de l'évolution culturelle s'attachent à expliciter, ainsi que les modalités selon lesquelles la culture a gagné son autonomie par rapport aux exigences de la survie quotidienne.

* *
*
*

¹⁵ "Pourquoi les membres de différents groupes se comportent-ils de manières différentes ? Pourquoi y a-t-il tant de variations entre les groupes humains ? [...]"

Le traitement de cette question doit faire appel à des théories qui puissent expliquer pourquoi et comment différentes dispositions, différents ensembles de règles contextuelles ou différents modes de traitement de l'information diffusent dans différents groupes, et comment ils s'y maintiennent." Henrich et al. (2001*)

Economists and to a lesser extent other social scientists have resisted addressing the complexity and endogeneity of human motivations, not because we think the behavioral simplicity of *homo economicus* is an adequate representation, but rather because we lack both adequate conceptual tools and empirical information on the process of preference formation¹⁶.

Samuel Bowles 2000a*

Comme le suggère cette citation de Samuel Bowles, les grandes difficultés que rencontrent la théorie du choix rationnel et la théorie de l'évolution culturelle dans leur tentative de rendre compte des caractéristiques de la coopération humaine semblent être liées au fait que ces deux théories sont sur cette question, prisonnières de leurs formalismes. Ceux-ci exigent en effet du modélisateur que soit établi un critère exogène fixe qui détermine *in fine* la dynamique des systèmes étudiés. Puisqu'on ne peut pas dire que ce critère est la recherche de l'intérêt collectif, ce qui supposerait le problème résolu avant même de l'avoir posé, ce critère représente la plupart du temps, sous une forme ou une autre, l'intérêt individuel. Mais ce problème de représentation rencontré dans le cadre de la coopération est en fait, un problème bien plus général, qui touche les deux disciplines dans leur tentative de prendre en compte l'hétérogénéité des agents. Les stratégies qu'elles mettent en oeuvre pour y remédier procèdent d'une double impulsion, ascendante dans le cadre de la modélisation économique qui s'ancre dans les comportements, et descendante dans le cadre de modélisation de l'évolution culturelle qui s'ancre dans le génome, convergeant vers un niveau d'explication intermédiaire, le niveau culturel.

Si la culture n'a pas encore cédé les clefs de son évolution, un des phénomènes que réintroduit ce niveau en modélisation est sans aucun doute une certaine interdépendance dans les comportements sociaux, à travers les processus d'apprentissage social. Dans le cas de la coopération humaine, c'est cette interdépendance qui pourrait permettre de relier entre eux les intérêts individuels afin de constituer l'intérêt collectif. Celle-ci trouverait son origine dans des capacités cognitives qui seraient spécifiques aux êtres humains. En effet, comme certains auteurs l'ont fait remarquer (Bowles & Gintis 2003*, Fehr & Fischbacher 2003*, Alvard 2003*), un modèle qui viserait à expliquer la complexité des structures sociales humaines à

¹⁶ «Les économistes, et dans une moindre mesure les autres chercheurs en sciences sociales, ont été réticents à l'idée de considérer la complexité et le caractère endogène des motivations humaines, non pas parce que nous pensons que la simplicité comportementale d'*Homo economicus* est une représentation adéquate, mais plutôt parce que nous manquons tout à la fois d'outils conceptuels et de données empiriques sur le processus de formation des préférences » [TdA]

partir de capacités cognitives communes à plusieurs espèces animales courrait le risque de n'expliquer que la complexité des sociétés animales les plus évoluées, et non celle des sociétés humaines.

Parmi les processus d'apprentissage social que nous avons évoqués dans les parties précédentes, l'imitation se trouve être au cœur des préoccupations. Nous avons vu notamment que l'imitation était potentiellement capable d'engendrer des structures macroscopiques au sein des populations. Bien que la modélisation des phénomènes d'imitation soit relativement récente, la nécessité d'intégrer l'imitation dans une théorie des comportements humains a été clairement exposée il y a plus d'un siècle par le criminologue, sociologue et philosophe Gabriel Tarde, dans son ouvrage *Les Lois de l'imitation* (1890):

Le moment serait venu d'exposer les lois générales qui régissent la répétition imitative et qui sont à la sociologie ce que les lois de l'habitude et de l'hérédité sont à la biologie, ce que les lois de la gravitation sont à l'astronomie, et les lois de l'ondulation à la physique.

Il est particulièrement intéressant, étant donné ce que nous venons de voir, de remarquer qu'il y a une façon proprement humaine d'imiter. Si déjà Aristote considérait *que « l'Homme diffère des autres animaux en ce qu'il est plus apte à l'imitation »*, la recherche de cette différence se transforme en heuristique sous la plume de René Girard (1978):

Pour élaborer une science de l'homme, il faut comparer l'imitation humaine avec le mimétisme animal, préciser les modalités proprement humaines des comportements mimétiques si elles existent.

C'est en suivant cette heuristique que nous allons être amenés, dans la prochaine partie de cet ouvrage, à rechercher au vu de recherches récentes en sciences cognitives et en éthologie, quelles sont les spécificités des capacités cognitives humaines, et quelles perspectives cela apporte dans la modélisation des phénomènes d'imitation.

Partie II

La spécificité la cognition humaine

Je m'exerce à la réflexion et par conséquent, pour moi, toute cause première en amène immédiatement une autre encore plus première, et ainsi de suite à l'infini. Tel est précisément l'essence de toute conscience et de toute réflexion.

Notes d'un souterrain, Dostoïevski

Introduction

Les actions médiatisées des insectes sociaux sont collectives et rigides, celles des chimpanzés sont au contraire individuelles et intelligentes - et celles des humains sont collectives et intelligentes.

Dominique Lestel (2001)

Ce triptyque dressé par Dominique Lestel résume en quelques mots les trois grands types d'organisations sociales évoqués au début de la partie I. Comme nous l'avons vu, loin d'être une simple description, il recèle un certain mystère. En effet, la dernière forme d'actions, *collectives et intelligentes*, relève d'une double prouesse puisqu'elle consiste à coordonner entre elles un grand nombre d'entités, hétérogènes par nature. En particulier, le problème est redoutable si nous le pensons dans le contexte de la coopération. Cette dernière forme emprunte à chacune des deux précédentes des caractéristiques à première vue incompatibles, leur juxtaposition provoquant la cristallisation immédiate d'un redoutable conflit entre intérêt collectif et intérêts individuels.

Parmi les divers processus cognitifs que les systèmes vivants sont susceptibles d'utiliser pour faire face à de tels dilemmes, les phénomènes d'imitation ouvrent une voie étroite mais prometteuse. Elle est sans aucun doute partie prenante du lien caractéristique existant dans les sociétés humaines entre l'individu et le collectif, qui permet de rétablir l'équilibre entre rationalités individuelles et rationalité collective. Cependant, de même que les intérêts individuels qui forment les arguments – au sens fonctionnel du terme - de la rationalité sont multiples, il y a plusieurs formes d'imitation, et l'introduction de processus mimétiques dans la modélisation des systèmes sociaux soulève des problèmes d'endogénéisation similaires à ceux rencontrés généralement en modélisation. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, des scientifiques ont proposé des heuristiques pour orienter la recherche de solutions. Parmi les différentes propositions, nous trouvons l'idée que l'identification et la prise en compte de spécificités de la cognition humaine dans la modélisation est une condition sine qua non, si l'objectif de la modélisation est d'explicitier certaines spécificités des systèmes sociaux humains. Nous pouvons donc nous attendre à ce que le problème de la multiplicité des formes d'imitation humaine nécessite de définir une imitation proprement humaine.

Une seconde raison a amené les scientifiques à s'intéresser à l'imitation dans sa forme spécifiquement humaine. Lorsque l'on regarde l'évolution de la branche des hominidés, qui s'étend sur 2 à 6 millions d'années, *Homo sapiens* n'apparaît que dans les derniers 250 000 ans. Pendant cette courte période à l'échelle de l'évolution, il développe une gamme très impressionnante d'adaptations cognitives et de productions culturelles. Sur de telles échelles de temps, un seul type d'adaptation biologique est capable de produire une telle diversité : un nouveau mode de transmission culturelle (Alvard 2003, Feldman & Laland 1996, Boyd et Richerson 1985). Plus précisément, à partir du paléolithique supérieur, les traditions et les productions humaines accumulent des modifications dans le temps d'une manière qui ne se retrouve pas chez les autres espèces. Ce type d'évolution est appelé *évolution culturelle cumulative*. En effet, aucune des productions humaines, outils, traditions, institutions etc., n'a été inventée une fois pour toutes à un moment donné, par un seul individu. Celles-ci sont plutôt le produit de variations et de rétentions successives, les découvertes individuelles étant rapidement assimilées par le reste de la population si elles correspondent à des avancées notables, engendrant ainsi un *effet cliquet (ratchet effect*¹⁷), qui évite tout retour arrière une fois une avancée technologique ou culturelle découverte. Il est surprenant de constater que pour beaucoup d'espèces, ce n'est pas la partie créative qui fait défaut mais plutôt l'effet cliquet stabilisant (Tomasello 1999). Ainsi, beaucoup de primates non humains produisent régulièrement des innovations intelligentes, mais celles-ci ne sont pas reprises au niveau de la communauté et disparaissent avec l'inventeur. L'hypothèse qui s'impose aujourd'hui est donc que l'évolution culturelle cumulative est le fruit d'une nouvelle forme d'apprentissage social. Celle-ci aurait marqué pour les sociétés humaines, la transition entre une évolution de type darwinien et une évolution lamarckienne beaucoup plus rapide. L'imitation étant une des formes les plus élaborées d'apprentissage social, celle-ci est devenue naturellement un sujet de recherche pour nombre de scientifiques.

Que la question soit d'appréhender l'organisation actuelle de notre société ou son évolution historique, l'enjeu est bien de dégager un principe de transmission culturelle qui soit caractéristique de l'espèce humaine afin de pouvoir étudier formellement les modes d'organisation engendrés par ce principe.

¹⁷ Tomasello M., Kruger A.C., and Ratner, H. H., 1993 Cultural Learning. *Behavioral and Brain Sciences* 16, 495-550

Cet objectif est ambitieux et il est important de le modérer en rappelant qu'une telle approche formelle ne peut pas avoir pour but de donner une description formelle des êtres humains et des systèmes sociaux qu'ils forment. Il s'agit plutôt de s'inspirer de la spécificité des systèmes sociaux humains afin de proposer de nouveaux principes d'organisation, dont l'étude formelle soit un objet d'intérêt scientifique à part entière. Eventuellement, ce type d'études pourra nous éclairer en retour sur certaines relations que peuvent entretenir différents aspects des systèmes sociaux, comme par exemple la relation de l'individu au collectif.

Comme nous allons le voir dans cette deuxième partie, certaines études menées en éthologie et en psychologie ont déjà mis en évidence un certain nombre de spécificités de la cognition humaine, qui nous permettront dans une troisième partie, de proposer une approche formelle des processus de transmission culturelle en étendant la définition de l'imitation. Nous allons commencer par un bref exposé du débat qui anime aujourd'hui éthologues et psychologues autour des différences entre cognition animale et cognition humaine. Ceci nous permettra d'identifier certaines spécificités de la cognition humaine et d'en tirer des conséquences quant aux formes d'imitation susceptibles de ne figurer qu'au répertoire des humains. Nous ferons ensuite une étude détaillée de travaux récents en psychologie du développement autour de l'imitation chez l'enfant, qui d'une part montrent l'émergence de différents types d'imitation à différents stades du développement, d'autre part proposent une articulation très précise entre capacités d'imitation et développement des interactions sociales chez l'enfant. Ceci nous permettra de mettre en avant le rôle de la réflexivité dans la cognition humaine, et nous amènera dans une troisième partie, à évoquer plus en détail différentes recherches pointant sur le caractère générateur de la réflexivité dans la cognition humaine.

Pour une meilleure compréhension des différentes interprétations associées aux expériences et aux observations de terrain que nous allons présenter, les différents types d'apprentissage social sont présentés dans l'encart « *L'apprentissage social* ».

L'APPRENTISSAGE SOCIAL

L'un des processus cognitifs responsables de la diffusion de comportements dans les systèmes sociaux est ce qu'on appelle l'apprentissage social, qui peut être défini de manière générale comme l'acquisition de comportements et d'attitudes par observation de congénères. L'apprentissage social résulte d'un ensemble varié de processus, les principaux étant la facilitation sociale et l'imitation.

La facilitation sociale est une forme très élémentaire d'apprentissage dans laquelle le sujet apprenant n'attribue pas d'intentions ou d'états mentaux à l'agent duquel il apprend. Les sous-catégories suivantes sont le plus souvent évoquées (Tomasello 1999) :

- *L'exposition (Exposure)*: certains sujets peuvent être exposés à de nouveaux contextes d'apprentissage par le simple fait de se tenir à proximité de congénères, sans nécessairement apprendre quelque chose directement du comportement des congénères. C'est par exemple le cas lorsqu'un jeune chimpanzé, en suivant sa mère, apprend l'emplacement d'un nouveau point d'eau. C'est également le cas si en regardant sa mère rechercher des insectes sous une bûche, il apprend qu'il y a des insectes sous les bûches. La connaissance des intentions ou des buts de sa mère n'est pas nécessaire pour l'apprentissage, le jeune chimpanzé aurait pu tout aussi bien apprendre cela de lui-même si un quelconque élément extérieur, comme par exemple une grosse rafale de vent, avait déplacé le morceau de bois.
- *Le renchérissement de stimulus (stimulus enhancement)*: l'activité de congénères provoque une concentration particulièrement élevée de certains stimulus dans certaines situations qui facilite la découverte individuelle. C'est le cas par exemple, lorsqu'en suivant sa mère sur un site de casse de noix, un jeune singe se trouve en présence d'une concentration haute de noix, pleines ou ouvertes, d'enclumes et de marteaux de pierre, ceci favorisant ainsi la découverte, par apprentissage individuel, de la manière d'ouvrir des noix.
- *L'émulation* : phénomène pendant lequel les buts d'un animal sont influencés par le spectacle des actions d'un congénère. Les buts de ce dernier peuvent être adoptés sans que les méthodes qu'il emploie le soient pour autant. L'émulation s'attache au changement d'états dans l'environnement et aux relations entre objets plus qu'aux intentions et aux stratégies utilisées (exemple donné plus bas)
- *La duplication (mimicking)*: de jeunes individus peuvent avoir des aptitudes innées à reproduire le comportement de congénères, sans aucune appréciation de son efficacité instrumentale et dans un domaine comportemental très restreint - comme lorsque certaines espèces d'oiseaux apprennent le chant caractéristique de leur espèce. Ce comportement d'imitation primaire n'a pas besoin d'être motivé et peut être d'origine génétique, lié ou non à une adaptation.

Le deuxième facteur important d'apprentissage social est *l'imitation*. Si la notion d'imitation est une notion intuitive et populaire, plusieurs définitions très différentes ont été proposées. Cette question sera abordée en A.2.

Enfin, mentionnons un phénomène à la marge de l'apprentissage social : le *priming*. Il est défini comme le rappel d'une représentation existante chez un individu suite à l'observation des actions des congénères. Par exemple, le fait de voir casser des noix chez un singe qui sait casser des noix peut activer à plus ou moins long terme, une envie de casser des noix. Le même phénomène apparaît par exemple lorsque suite à une conversation sur les pantalons-cigarettes l'envie vous vient de griller une clope. Ainsi, l'individu n'apprend rien de nouveau par le priming, mais des comportements et des concepts existants sont renforcés. Mentionnons en ce qui nous concerne, que le priming est également largement utilisé dans la publicité pour suggérer à plus ou moins long terme des actions aux consommateurs, ce dont chacun pourra se rendre compte en observant son propre comportement.

Pour aller plus loin :

- *The Origin of Human Cognition*, M. Tomasello, 2000
- *Intelligent Social Learning*, Conte R., Paolucci M., *JASSS*, 2001
- *Is it really imitation? A review of simple mechanisms in social information gathering*, Noble & Tood 1998, www.citeseer.com.

II.1 La part de l'homme, la part de l'animal

Si certaines personnes préfèrent avoir un chien plutôt que des enfants, d'autres privent les non-humains de toute forme d'intelligence. Entre ces deux extrêmes, il y a toute l'épaisseur des esprits curieux. Pour appréhender « *cet animal particulier qui se pense comme un animal spécial*¹⁸ », il faut le placer sur le fond que constituent les autres espèces animales et en regarder les aspects saillants. Il n'est pourtant pas nécessaire de considérer toutes les espèces animales. Regardons en effet le schéma ci-dessous qui dresse l'arbre d'évolution de la famille des hominoïdes. Nous retrouvons la structure caractéristique de l'évolution des espèces. La succession des bifurcations au cours de la phylogenèse trace un arbre dont les sous-branches correspondent à une stratégie de survie bien spécifique, et dont les feuilles sont les espèces que nous connaissons. Ainsi, il est communément admis que des espèces portées par une même sous-branche auront entre elles plus de caractéristiques communes que si elles étaient comparées avec des espèces d'une autre sous-branche. Par exemple, nous savons que du point de vue génétique, nous partageons 99 % de nos gènes avec le reste de la famille des hominines¹⁹ (chimpanzés, bonobos).

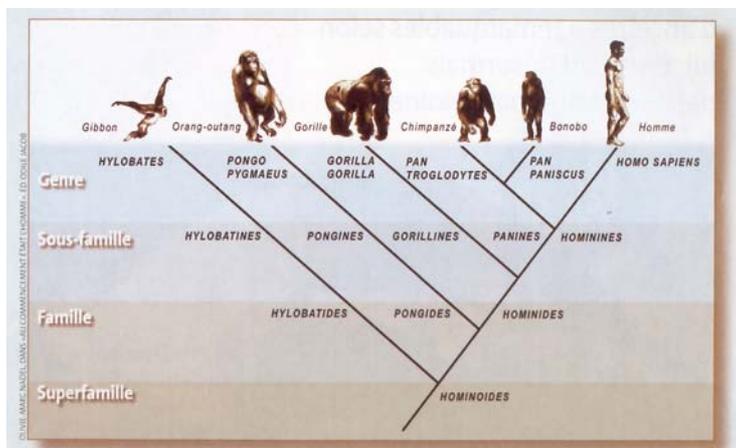


Figure 17 : La branche des Hominoïdes. Les bonobos, les chimpanzés et les gorilles sont les espèces présentant le plus de similarités sur le plan cognitif avec l'espèce humaine. La période de la dernière bifurcation entre l'*Homo Sapiens* et les Panines (Bonobos & Chimpanzés) est estimée entre -6 à -4 millions d'années. (Source : « Au Commencement était l'Homme », O.-M. Nadel, ed. Odile Jacob). Pour donner une idée des échelles de temps, la branche des primates, ici appelée superfamille, est apparue il y a environ 60 millions d'années, alors que l'*Homo Sapiens* avec les capacités cognitives que nous lui connaissons a dû apparaître entre 200 000 et 50 000 ans avant notre ère.

¹⁸ Lestel 2001.

¹⁹ Il n'est pas inutile de remarquer au passage que contrairement à une idée reçue, cette structure en arbre n'est en rien une structure hiérarchique, en ce sens qu'elle impliquerait une supériorité de certaines espèces par rapport à d'autres (l'homme se plaçant volontiers en haut de la hiérarchie). L'évolution n'a pas de sens à proprement parler, et la ramification plus ou moins importante d'une sous-branche donnée ne traduit que des phénomènes contingents, comme la variabilité au cours du temps de la niche écologique que les espèces de cette sous-branche exploitent.

Ceci étant, les spécificités d'une espèce donnée peuvent être identifiées de manière plus aisée par contraste avec les caractéristiques des espèces des branches adjacentes plutôt que sur le fond de l'ensemble des espèces. En regardant la figure ci-dessus, nous pouvons voir que les espèces les plus proches de la nôtre sont les grands singes : les bonobos, les chimpanzés, les gorilles et les orangs-outans. Elles sont effectivement celles dont les caractéristiques, du point de vue de la cognition individuelle et de l'organisation sociale, sont les plus proches des nôtres. C'est la raison pour laquelle elles seront fréquemment évoquées dans la suite de cette section. Le lecteur intéressé pourra trouver des propositions concises de scénarii d'évolution de la branche des hominidés dans Byrne 2000*, Donald 1997* ou Tomasello 1999. Enfin, il arrive, quoique rarement, que des branches éloignées de l'arbre de l'évolution, présentent des spécialisations similaires. La branche des hominidés partage ainsi des caractéristiques communes avec la branche des cétacés, dont les feuilles que constituent certaines espèces de dauphins et de baleine témoignent d'un développement remarquable de l'intelligence individuelle et des types d'organisations sociales. Pour cette raison, ces espèces seront également évoquées dans la discussion qui va suivre.

* *
*

La section suivante est destinée à présenter des résultats très récents en psychologie comparative dans le domaine de la méta-cognition. Le domaine est trop jeune et les réponses qu'il apporte sont trop partielles pour pouvoir apporter des éléments capables d'influencer significativement le débat qui nous préoccupe. Cette section (II.1) n'est donc pas indispensable pour la compréhension du reste de l'ouvrage.

Nous avons cependant choisi de parler de ces recherches car la méta-cognition sera un thème central dans notre troisième partie et il nous a semblé important de montrer en quoi les recherches sur la méta-cognition sont actuellement au centre des préoccupations de la psychologie comparative. Celles-ci seront certainement à terme, une des principales sources permettant de tracer la frontière entre cognition animale et cognition humaine.

*
* *

II.1.A Les animaux ont-ils des capacités méta-cognitives ?

Comme chacun peut en faire l'expérience, nous sommes très fréquemment amenés à prendre des distances par rapport aux activités dans lesquelles nous sommes impliqués, parfois spontanément, mais le plus souvent suite à un blocage au niveau de l'une des étapes du processus en cours. Cela se traduit la plupart du temps par des questions que nous nous posons, et qui consistent à savoir si l'activité dans laquelle nous sommes engagés peut être menée à bien, si son exécution se déroule correctement ou si cette dernière peut être améliorée. C'est par exemple le cas lorsque vous demandez si telle ou telle tâche sera facile à apprendre, lorsque vous interrompez votre lecture pour relire un passage afin d'en améliorer la compréhension ou lorsque vous décidez que l'information dont vous disposez est insuffisante pour mener à bien la tâche courante, et que vous décidez d'allouer un temps supplémentaire à la recherche d'information.

Ce sentiment de savoir que l'on sait et les différentes manières de contrôler l'exécution de ses propres tâches cognitives rentrent dans le cadre général de la méta-cognition, définie comme la cognition sur la cognition. C'est une activité à laquelle s'adonnent massivement les êtres humains et qui trouve peut-être son ultime développement dans l'épistémologie, en tant que théorie de la connaissance. La méta-cognition est un sujet très en vogue actuellement en sciences cognitives car elle est pressentie comme un trait distinctif des êtres humains. Elle se dispute parfois la vedette avec le langage, souvent considéré comme le trait distinctif qui tracerait la frontière entre humains et non-humains. Mais plusieurs observations laissent à penser que la méta-cognition ou les mécanismes dont elle serait issue, seraient premiers par rapport au langage dans la phylogénèse. Dan Sperber (2000*) fournit par exemple une argumentation conceptuelle de cette thèse, en avançant qu'un langage sans méta-représentations ne serait qu'une affaire de codage-décodage, guère différente des autres formes de communications présentes dans la nature. Par ailleurs, lorsque l'on s'intéresse aux capacités d'apprentissage social d'une espèce donnée, il est important de savoir ce que les individus de cette espèce sont capables d'inférer à partir du comportement des autres (actions, intentions, états mentaux, etc.), ce qui pose naturellement la question de la nature de la connaissance des individus sur leur propre état. Dans le cadre d'une étude comparative entre les processus d'apprentissage humains et non humains, il est donc naturel de s'intéresser à la manière dont les animaux peuvent appréhender leur propre état

de connaissance et en contrôler le contenu.

Ces recherches sur la méta-cognition animale sont relativement récentes et mettent toujours en jeu des protocoles expérimentaux très astucieux visant à contourner le fait que les animaux ne sont pas capables de communiquer verbalement leurs impressions. Elles ont donné lieu à des résultats fascinants, synthétisés récemment dans un article intitulé *The Comparative Psychology of Uncertainty Monitoring and Metacognition* paru dans la revue *Brain and Behavioral Science* (Smith J.D. et al. 2003*), et commenté dans le même numéro par une trentaine de spécialistes de différentes disciplines. Deux exemples permettront de comprendre la problématique soulevée par les études comparatives sur la méta-cognition: les tâches de décision en situation d'incertitude et les tâches de mémoire.

II.1.A.a La décision en situation d'incertitude

Beaucoup de décisions de la vie quotidienne sont prises de manière automatique ou s'inscrivent dans des routines. Il arrive souvent par exemple, de conduire en discutant, laissant une quantité d'actes de conduite (accélération, décrochage, etc.) sous un contrôle automatique, non nécessairement conscient. Il est cependant un certain nombre de situations, comme les situations d'incertitude, où nous sommes obligés d'émettre un jugement sur notre état de connaissance, et d'indexer notre action sur ce jugement. Dans de telles situations, nous sommes forcés de nous placer en position méta par rapport à l'activité courante, afin d'intégrer dans son évaluation un nombre plus important de paramètres. C'est en exploitant ce phénomène bien connu que s'est construit le paradigme de l'étude comparative des situations d'incertitude. L'idée est simple et nécessite deux ingrédients. Le premier est de disposer d'une tâche perceptive présentant quelques difficultés pour l'animal, de manière à le mettre dans un état d'incertitude contrôlée. Le deuxième est de donner la possibilité à l'animal de fournir une réponse comportementale (i.e. non verbale) lui permettant de commenter ou de s'adapter aux divers degrés d'incertitude. Concernant la méta-cognition, la question importante est de savoir si un animal a une certaine connaissance de son degré d'incertitude et s'il peut y répondre de

manière adaptée.

Dans cette optique, plusieurs protocoles ont été établis autour de la notion de discrimination perceptive. Nous présentons ici celui proposé par Shields²⁰ et al. (1997) et rapportée dans l'article de *BBS* que nous venons d'évoquer. Le protocole est le suivant : des sujets sont mis devant un écran sur lequel figurent une étoile, une lettre et deux carrés noirs, mis côte à côte, et clairsemés de petits points blancs répartis aléatoirement sur toute leur surface (Figure 18). Les sujets disposent d'un joystick qui leur permet de pointer sur les carrés, l'étoile ou la lettre selon qu'ils estiment que les densités des points blancs dans chacun des carrés sont respectivement les mêmes, différentes ou qu'ils sont incertains. Différentes issues du jeu sont associées aux différents cas de figure : un temps d'attente en cas de mauvaise réponse (la lettre alors que les densités sont les mêmes, les carrés alors que les densités sont différentes), une forte récompense en cas de bonne réponse et une faible récompense lorsque l'étoile est choisie (choix dont les auteurs cherchent à démontrer qu'il révèle une utilisation de l'incertitude). Ainsi, avec ce protocole, si les sujets sont capables de prendre en compte leur perception de leur incertitude, nous pouvons nous attendre à ce que les sujets choisissent presque certainement de désigner les carrés lorsque leurs densités sont pratiquement égales, de désigner la lettre lorsque celles-ci sont très différentes, et de choisir de manière préférentielle l'option incertaine lorsqu'il y a ambiguïté. Ce test a été effectué avec des singes et des humains, et ces intuitions correspondent effectivement à ce que l'on a pu observer dans la plupart des cas (Figure 18) avec de plus une forte corrélation ($r=0,98$) entre les performances des humains et de certains singes suggérant des mécanismes de décisions relativement proches.

Dans le cas des humains, les rapports post-expériences ont corroboré les données expérimentales qui associent l'étoile à une situation d'incertitude. En effet, alors que les sujets associaient les deux autres réponses à des stimuli objectifs, l'étoile était associée à des situations où les sujets rapportaient un sentiment de doute, d'incertitude, de ne pas connaître la réponse correcte. De plus, leur manière de formuler leurs réponses suggérait que la réponse «incertain» était associée non seulement à un acte de contrôle métacognitif, mais aussi à une conscience aiguë du fait d'être engagé dans une tâche réflexive de contrôle de soi. Dans le cas des singes, des tests de choix forcés, après le choix de

²⁰ Shields W.E., Smith, J.D. & Washburn D. A., 1997, Uncertain responses by humans and rhesus monkeys (*Macaca mulata*) in psychological same-different task. *Journal of Experimental Psychology:General*, 126:147-64.

l'option « incertain » ont permis de vérifier que ceux-ci avaient effectivement des performances moindres lorsqu'ils choisissaient cette option.

D'autres expériences mettant des sujets en situation d'incertitude ont été menées et ont abouti aux mêmes conclusions concernant les chimpanzés (Smith et al. 1997²¹), et les dauphins (Smith et al. 1995²²), alors que des animaux cognitivement moins sophistiqués, tels que les rats, se sont montrés incapables d'utiliser la réponse « incertain » de manière intelligente (Smith & Shull 1989²³). Le fait que la réponse « incertain » ne soit pas associée à une classe de stimuli particulière fait dire à Smith et ses co-auteurs que cette réponse est en position méta par rapport aux perceptions primaires des sujets, elle exprime déjà un point de vue sur celles-ci. Plus précisément, contrairement aux différentes configurations présentes sur l'écran qui sont des objets extérieurs au sujet, le sentiment d'incertitude est un reflet intérieur de la confrontation du sujet avec le monde extérieur. Le fait que le sujet soit capable d'utiliser ce sentiment pour modifier son comportement témoigne de sa capacité à utiliser ses propres réactions à l'environnement dans un processus de décision (ce qui ne veut pas dire qu'il a conscience d'agir de la sorte).

²¹ Smith, J.D., Shield, W.E., Shull J. & Washburn, D.A. (1997), The uncertain response in humans and animals, *Cognition* 62:75-97.

²² Smith, J.D., Schull, J., McGee, K, Egnor, R. & Erb, LK. (1995), The uncertain response in bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*), *J. of Experimental Psychology: General* 124:391-408.

²³ Smith, J.D. & Shull, J., 1989, A failure of uncertainty monitoring in the rat. (données non publiées)

²⁴ Hampton, R.R., 2001, Rhesus monkey know when they remember. *Proceedings of the National Academy Of Sciences, USA* 98:5359-62

²⁵ Shields, W. E., 1999, *Non verbal judgment of knowing by humans and rhesus monkeys*. Doctoral dissertation, State University of New York at Buffalo.

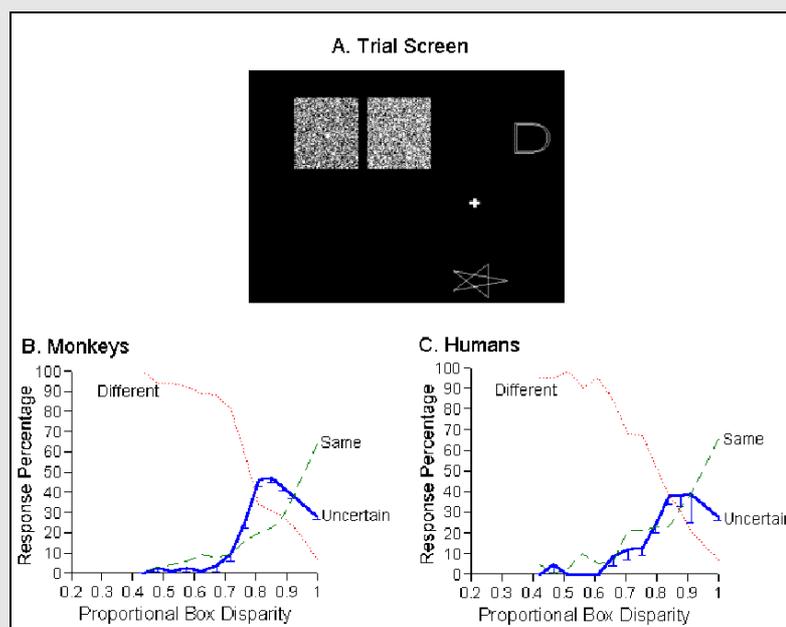


Figure 18 : A. Ecran correspondant à la tâche pareils/différents de Shields et al. 1997 dans le cas de figure où les densités sont différentes. Le sujet doit pointer avec le curseur sur les carrés, le D ou l'étoile, selon qu'il estime que ces densités sont identiques, différentes ou qu'il décline le test (réponse incertaine) B. Performances de deux singes au cours de cette tâche. L'axe horizontal donne le rapport entre les densités de blanc dans les deux carrés. La réponse « pareils » (joystick pointant sur les carrés) est correcte lorsque ce rapport vaut 1. Dans tous les autres cas, la réponse « pareille » était considérée comme mauvaise et avait comme conséquence que le sujet devait subir un temps d'attente. La ligne continue en gras représente le pourcentage de réponses pour lesquelles l'option «incertain» a été choisie. Les deux autres courbes correspondent au pourcentage de réponses «différent» (pointillés décroissants) et «pareils» (tirets croissants). C. Performances de six humains pour la même tâche.

II.1.A.b Les tests de mémoire et de méta-mémoire, limites de la méta-cognition animale ?

Une autre catégorie de tests très étudiée dans le cadre de la méta-cognition concerne les tests de mémoire. Chez l'humain, des décisions sur la base de la méta-mémoire sont omniprésentes. Nous savons quand nous ne savons pas et nous accommodons notre comportement en fonction. Les tests de méta-mémoire sont très intéressants. Tout en mettant en évidence une réelle perception de l'état de la mémoire à court terme de la part des singes étudiés, un raffinement de ces tests a pu également mettre en évidence les limites des capacités des primates à réfléchir sur leurs capacités cognitives.

Commençons par considérer des tests simples de supervision de la mémoire de travail. L'un de ces types d'expériences, proposé par Hampton²⁴ pose la question de savoir si les singes peuvent utiliser l'intensité de la trace laissée par des souvenirs dans

leur mémoire pour décider d'accepter ou de décliner des tests de mémoire. Ce genre de tests exploite le fait que les performances de mémoire déclinent de manière prédictible lorsque le délai augmente entre la présentation d'un objet et le rappel de son souvenir. Le principe de l'expérience est alors simple : dans un premier temps, l'expérimentateur présente au sujet un objet. L'objet doit dans un deuxième temps être reconnu de mémoire parmi trois autres alternatives. Le paramètre que l'expérimentateur fait varier est alors le temps d'attente entre ces deux étapes (entre 15 et 100 secondes). De même que dans l'expérience de choix en situation d'incertitude, le sujet a la possibilité de décliner le test de mémoire à la fin du temps d'attente. S'il accepte le test, mais qu'il échoue, le sujet est exposé à un délai d'attente ; s'il réussit, il reçoit une forte récompense. En revanche, si le sujet décline le test de mémoire, celui-ci reçoit une faible récompense dans 66% des cas, et est soumis à un test de mémoire forcé dans 33% des cas, ceci permettant de contrôler la force des traces mnésiques, même lorsque l'animal décline le test.

Hampton fit deux prédictions sur ce que les singes feraient s'ils acceptaient ou déclinaient les tests de mémoire sur la base de leur méta-mémoire. La première est que les animaux devraient décliner plus de tests à mesure que le temps d'attente s'accroît, en raison du fait que les traces mnésiques sont d'autant plus faibles que l'intervalle s'accroît, ce qui fait passer plus fréquemment le souvenir en dessous du seuil de disponibilité de la mémoire. La seconde prédiction est que les performances des animaux devraient être bien meilleures pour les tests de mémoire qui ont été choisis volontairement, que pour les tests de mémoire forcés. La raison en est que si les fortes traces mnésiques après de courts temps d'attente favorisent des performances proches de l'optimum dans les deux cas de tests volontaires et forcés, les traces mnésiques plus faibles après de longs délais devraient être plus variables ; et si l'animal supervise ses décisions sur la base de la force de ces traces, il devrait être possible de voir clairement la valeur adaptative de la stratégie méta-cognitive. Sur les deux singes étudiés par Hampton, le comportement de l'un d'entre eux a confirmé exactement ces prédictions, alors que le comportement du deuxième n'était en accord qu'avec la première.

D'autres études du même type avec des protocoles légèrement différents (Smith et al. 1998) ont renforcé l'hypothèse que certains singes sont effectivement capables d'indexer leur comportement en fonction de la force des traces mnésiques laissées par des événements antérieurs dans leur mémoire à court terme, laissant supposer que certains singes savent qu'ils ne savent pas et utilisent cette connaissance. Fait notable, comme

pour les tâches de discrimination, des études similaires ont été effectuées avec des espèces cognitivement moins évoluées, comme le pigeon, sans montrer de capacités de méta-mémoire.

Si les singes sont capables d'avoir accès à la fiabilité de leur mémoire, se voient-ils pour autant comme des sujets apprenants ? Une étude menée par Shields²⁵ tendrait à montrer que nous atteignons là les limites des capacités cognitives des singes en ce qui concerne la méta-mémoire. Le principe en est le suivant : des singes ont été entraînés à exécuter des tâches associatives au cours desquelles ils doivent établir des liens entre des paires arbitraires, de type amorce-cible, constituées de polygones à neuf côtés. Une fois les associations apprises, les animaux sont placés devant un écran où figurent un polygone (l'amorce) et une étoile. S'ils choisissent le polygone (jugement de savoir), ils ont alors à choisir sur l'écran suivant un polygone parmi deux, dont l'un est la cible associée, et l'autre un polygone choisi au hasard. Les animaux sont alors récompensés en cas de bonne réponse et subissent un long temps d'attente dans le cas contraire. S'ils choisissent l'étoile (jugement de ne pas savoir), ils sont testés sur l'écran suivant avec une possibilité de moindre récompense mais sans risque d'attente. Ainsi, le fait de tester les animaux même après qu'ils ont répondu « incertain » permet de vérifier que le choix de l'étoile est effectivement corrélé à une performance de moindre qualité.

L'astuce dans l'expérience de Shields est que, lors de la phase d'apprentissage des associations, certaines paires sont présentées plus souvent que d'autres, et par conséquent, sont mieux apprises. Les résultats des tests montrent que c'est effectivement le cas, bien que le singe testé n'ait pas pu décliner préférentiellement les tests sur la base de la présentation d'amorces appartenant à des paires moins bien apprises. L'étude n'a pas non plus révélé de différence au niveau des performances entre les tests acceptés et ceux déclinés. Ceci étant, Shields a monté une seconde expérience dans laquelle le singe avait à prendre une décision (décliner ou accepter) avec sur le même écran l'amorce, en dessous la cible et un deuxième polygone, et plus bas l'étoile. Cette fois-ci, le singe avait tous les éléments pour savoir s'il était capable de reconstituer la paire. Il fut alors effectivement capable de décliner préférentiellement les tests correspondants à des paires moins bien apprises, et fut moins performant sur les tests déclinés.

Comme l'admettent les auteurs, il n'est pas possible de dire au vu de ces seules expériences, si les expériences de Shields ont mis en évidence des limites de l'animal dans ses capacités de supervision prospective et de représentation de ses propres

capacités ou si nous assistons là à un artefact du protocole. Cette expérience a cependant le mérite de nous montrer le type de résultats auxquels nous pouvons nous attendre dans ce domaine.

II.1.A.c Conclusions : une méta-cognition rigide

Les expériences visant à tester les capacités méta-cognitives des différentes espèces permettent d'explicitier des opérations cognitives de haut niveau que certains organismes ont pu développer pour leur autorégulation, d'en tracer la phylogenèse et de comparer celles-ci avec les capacités cognitives des êtres humains. Ceci permet en retour d'appréhender les capacités cognitives humaines comme la superposition de niveaux de contrôle de plus en plus élaborés et de plus en plus distants des percepts primaires. Ces études montrent pour le moment une distinction très nette entre d'un côté les êtres humains, les grands singes et certains cétacés, et de l'autre les autres animaux dans leurs capacités à faire une première intégration de certaines perceptions à un niveau méta où sont prises des décisions de plus haut niveau. Elles semblent également pointer vers certaines limites des capacités méta-cognitives des grands singes dans leurs capacités à intégrer plusieurs méta-niveaux successifs ou à se voir soi-même en tant qu'individus apprenants. Cela est par ailleurs corroboré par le fait que l'enseignement est très peu développé voire absent chez les primates non-humains (Lestel 2002). Ces limites suggèrent que si certaines tâches peuvent être qualifiées de méta-cognitives chez quelques espèces d'animaux, il est très probable que celles-ci sont déjà pré-cablées dans les circuits neuronaux et soient donc relativement inflexible.

Ces études ouvrent plus généralement une voie vers l'étude chez les animaux les plus évolués, de l'existence d'une conscience, d'une conscience de soi et d'une conscience des autres, questions d'importance lorsqu'il s'agit d'étudier les différents modes de transmission sociale utilisés par les différentes espèces. Enfin, ces études éclaireront sans doute les différentes formes de conscience dont disposent les êtres humains, de récents travaux en neurobiologie ayant déjà montré qu'il est possible de distinguer plusieurs niveaux de conscience (Damasio 1999).

II.1.B Quelques exemples d'apprentissage social non humain

Nous avons assisté ces dernières décennies à un renouveau considérable de l'éthologie, de nombreuses études visant à dégager une véritable notion de culture animale, notamment avec le développement de la biosémiotique. Loin d'être la simple projection de la notion de culture humaine, les éthologues s'attachent à la définir à partir de mécanismes de transmission qui prennent en compte les spécificités des représentations et de la perception des différentes espèces. Ainsi, ont été dégagées des propositions concernant la nature des représentations mentales animales pour ce qui concerne la compréhension de l'espace, des outils, des catégories d'objets, de la causalité, des comportements, voire même des représentations mentales de leurs congénères, dans des activités telles que la coopération, la compétition, la communication et l'apprentissage social. De cette fascinante littérature, dont Dominique Lestel dresse un excellent panorama dans *Les origines animales de la culture* (2001), se dégage un thème récurrent, étroitement lié à nos préoccupations : les processus de transmission culturelle et en particulier l'imitation animale (Byrne & Russon 1998*, Donald 1991&1997*, Lestel D. 2002a, 2002b*, Rendell L.& Whitehead H. 2001*). Pour anticiper sur ce qui va suivre sans en entamer le suspense, nous pouvons dire que le thème de l'imitation est actuellement un véritable champ de bataille en éthologie, ce qui a pour effet de stimuler la recherche par l'émergence de toute une gamme de propositions concurrentes ou complémentaires sur la nature des processus de transmission sociale. Les quelques exemples donnés par Tomasello (1999) dans son chapitre *Biological and Cultural Inheritance* vont nous permettre d'avoir un aperçu général du débat qui fait rage autour de l'imitation.

II.1.B.a Les singes laveurs de patates

Le cas le plus connu de tradition culturelle non humaine est celle des macaques japonais laveurs de patates²⁶. En 1953 une jeune femelle de 18 mois du nom de Imo a été observée en train de laver dans l'eau des patates douces qui avaient été données à la troupe par les scientifiques. Après trois mois d'une telle pratique, le même comportement a été observé chez la mère d'Imo, ainsi que chez deux autres de ses compagnes de jeu. Dans les deux années qui suivirent, sept autres jeunes macaques firent de même et en moins de trois ans,

²⁶ Kawamura, S., 1959. The Process of sub-culture propagation among Japanese macaques, *Primates* 2,43-60
Kawai, M., 1965, Newly-acquired pre-cultural behavior of the natural troop of Japanese monkey of Koshima Islet. *Primates*, 6, 1-30.

40% de la troupe lavait leurs patates. Le fait que ce soient les proches d'Imo qui les premiers adoptèrent ce comportement fut interprété tout d'abord comme le fait que le mode de diffusion de ce comportement devait être l'imitation. Cependant, deux observations vinrent contredire cette interprétation. Premièrement, ce comportement a été observé par la suite dans plusieurs autres troupes de macaques et par ailleurs, des macaques en captivité apprennent rapidement par eux-mêmes à laver des aliments sablonneux lorsqu'on leur fournit un bol d'eau²⁷. Cette activité peut donc avoir pour origine l'apprentissage individuel. Deuxièmement, Galef²⁸ a objecté que la lenteur de la propagation du nouveau comportement ainsi que sa dynamique n'est pas compatible avec l'imitation. Un comportement d'imitation mènerait en effet à une propagation beaucoup plus rapide s'accroissant à mesure que le nombre de modèles augmente dans la population, ce qui n'est pas compatible avec ce qui a été observé. Ceci a conduit à l'abandon de l'hypothèse de l'imitation et à une interprétation du phénomène en termes de *renchérissement des stimuli* (cf. encart 6) : étant donné que les amis et les parents d'un individu ont tendance à rester proches, les amis d'Imo ont eu plus de chances de la suivre près de la rivière au cours de repas, ce qui a augmenté leurs chances d'apprendre par eux-mêmes ce nouveau comportement.

II.1.B.b L'utilisation d'outils chez les chimpanzés

Plus d'une centaine d'animaux utilisent des outils de façons plus ou moins sophistiquées. Entre autres, les populations de chimpanzés d'Afrique de l'Est attrapent des termites en sondant les termitières à l'aide de fines branches, pour ensuite porter les insectes à leur bouche. Dans d'autres régions, les singes détruisent simplement les termitières à l'aide de gros bâtons, puis attrapent les termites à la main. Ces différences sont-elles dues à des traditions culturelles qui se maintiendraient par des phénomènes d'imitation au sein du groupe? Des expériences menées en laboratoire laissent à penser que ce n'est pas le cas et que nous avons plutôt affaire ici à un phénomène d'émulation, couplé avec des variations environnementales (dans certaines régions très sèches, les termitières sont si dures qu'elles sont difficilement destructibles). Nagel, Olguin et Tomasello²⁹ ont par exemple étudié l'apprentissage de l'utilisation d'outils en comparant le comportement de chimpanzés et de

²⁷ Visalberghi E. & Fragaszy D. M., 1990, Food-washing behavior in tufted capuchin monkeys, *Cebus apella*, and crab eating macaques, *Macaca fascicularis*. *Animal Behavior*, 40, 829-836.

²⁸ Galef, B., 1990, The question of animal culture. *Human Nature* 3, 157-178.

²⁹ Nagel, K., Olguin K., et Tomasello, M., 1993, Processes of social learning in the tool use of chimpanzees (*Pan troglodytes*) and human children (*Homo Sapiens*) *Journal of Comparative Psychology* 107, 174-186.

jeunes enfants de deux ans lorsqu'ils sont mis en présence d'un râteau et d'un d'objet attrayant, hors de portée de main. L'outil pouvait être utilisé de deux manières avec des efficacités différentes afin d'attraper l'objet. Pour chaque espèce, un groupe de sujets a observé un démonstrateur employant l'une des techniques d'utilisation du râteau (la moins efficace), tandis qu'un autre groupe a observé l'autre forme (la plus performante). Le résultat est particulièrement instructif sur les différences entre l'homme et le singe dans les processus d'influence sociale. Alors qu'en général les enfants ont copié la méthode utilisée par le démonstrateur dans chacun des groupes (apprentissage par imitation), les chimpanzés ont tenté toutes sortes de choses pour attraper l'objet, et celles-ci étaient du même type dans chacun des deux groupes, quel que soit le type de démonstration auxquelles ils aient assisté. Les chimpanzés ne se sont donc intéressés qu'aux changements d'état de l'environnement provoqués par le démonstrateur ainsi qu'aux relations entre objets, et non à la stratégie particulière utilisée. Ce type d'influence sociale a été appelé *émulation*. Il est intéressant de remarquer au passage que l'apprentissage par imitation n'est pas nécessairement plus performant ou plus 'intelligent' que l'apprentissage par émulation étant donné que dans ce cas, lorsque le démonstrateur a utilisé la mauvaise stratégie, les enfants ont eu tendance à la reproduire, alors que les singes ont eu plus souvent la possibilité de trouver la meilleure en essayant autre chose. Comme le note Tomasello, l'imitation est simplement une stratégie plus sociale qui, dans certaines conditions, a ses avantages.

II.1.B.c. La communication gestuelle chez les chimpanzés

Il a été remarqué que les jeunes chimpanzés acquièrent en grandissant les gestes utilisés par les adultes pour communiquer entre eux. Encore une fois, s'il est tentant d'interpréter ceci comme de l'imitation. Tomasello et ses collègues ont proposé un mécanisme alternatif : la *ritualisation ontogénétique (ontogenetic ritualisation)* : un signal de communication est créé entre deux individus par influences mutuelles au cours d'interactions sociales répétées qui font converger ce signal vers une forme donnée. Une bonne manière d'envisager ce processus est d'imaginer un singe tendant le bras à travers les barreaux de sa cage. Si quelqu'un vient lui donner à manger à ce moment là, ce geste sera probablement associé à de la nourriture. Le singe pourra par la suite tendre la main en vue d'obtenir de la nourriture. Bien que le premier geste ait pu être totalement dépourvu d'intention, ce geste sera devenu un signal pour réclamer de la nourriture et sera interprété comme tel par un observateur humain extérieur.

Les débats auxquels nous pouvons assister parmi les éthologues et les psychologues autour de l'imitation est en grande partie une question de définition. Par exemple, l'approche de Tomasello (1999) part des constatations suivantes³⁰ :

In their natural habitat, nonhuman primates :

- *Do not point or gesture to outside objects for others;*
- *Do not hold objects up to show them to others;*
- *Do not try to bring others to locations so that they can observe things there;*
- *Do not actively offer objects to an other individuals by holding them out;*
- *Do not intentionally teach other individuals new behaviors.*

Il synthétise ces différentes observations en formulant l'hypothèse que les animaux ne comprennent pas leurs congénères comme des agents intentionnels, pourvus d'états mentaux pouvant potentiellement être affectés ; ce qui n'écarte pas la possibilité que certains animaux, comme les grands singes, soient eux-mêmes des agents intentionnels. Ainsi, toujours selon Tomasello, l'hypothèse la plus plausible est que les primates non humains comprennent leurs congénères comme des êtres animés, capables de se mouvoir spontanément, ce qui formeraient la base de leur compréhension du social en général, mais qu'ils n'ont pas la capacité d'envisager les autres comme des agents poursuivant des buts ou ayant des pensées sur le monde. C'est avec cette approche qu'il définit l'imitation comme un processus au cours duquel un comportement est reproduit *dans le même but* que celui du modèle. C'est une définition de l'imitation qui ne s'intéresse pas seulement aux résultats engendrés par l'action d'un agent dans l'environnement, mais également à ses motivations.

Il est clair que le fait de définir l'imitation par un processus de haut niveau, tel que l'inférence d'intentions ou de buts, élimine de fait tout un ensemble de phénomènes plus élémentaires. En particulier, un grand nombre de controverses autour de l'imitation peuvent être comprises en distinguant les défenseurs de l'imitation en tant que simple copie d'une

³⁰ *Dans leurs habitats naturels, les primates non humains :*

- *Ne s'adressent pas aux autres en pointant ou en faisant des gestes en direction d'objets extérieurs ;*
- *Ne s'emparent pas d'objets pour les montrer aux autres ;*
- *N'essaient jamais d'amener leurs congénères sur certains lieux de sorte qu'ils puissent y observer certaines choses ;*
- *N'offrent pas activement des objets à d'autres individus en les leur tendant ;*
- *N'enseignent pas intentionnellement de nouveaux comportements aux autres individus.*

action, des personnes pour qui l'imitation implique nécessairement l'inférence des intentions du modèle.

Quels que soient les noms donnés aux différents types d'apprentissage social, ces débats ont le mérite de montrer que le problème n'est pas un problème binaire imitation vs. non-imitation, apprentissage social vs. apprentissage individuel, mais qu'il y a toute une gradation dans les processus d'apprentissage social qui est d'autant plus étendue que les capacités cognitives des individus sont élevées. La principale chose cependant à retenir de cette discussion est le point sur lequel s'accordent la majorité des éthologues : *le type d'imitation qui semble réservée à l'espèce humaine³¹ est une imitation qui s'intéresse aussi bien au résultat d'une action dans l'environnement, qu'à la procédure qui a été utilisée (l'enfant et le râteau), ou à l'intention sous-jacente à cette action.* Ce type d'imitation, qui va bien au-delà des comportements de surface, sera désormais le principal objet de notre réflexion.

Étant donné que nous écartons là tout un ensemble d'autres processus de transmission sociale, qui ont probablement plus d'importance en termes de fréquences d'utilisation, il est bien évident que ce que nous nous proposons d'étudier n'est qu'une petite partie des comportements sociaux. Notre hypothèse est cependant que cette petite partie est l'un des principaux facteurs qui, au niveau collectif, nous font apparaître les sociétés humaines comme si particulières.

³¹ Certains éthologues admettent l'inférence d'intentions de la part des dauphins. Cependant, très peu d'études permettent de confirmer ce point, et quoi qu'il en soit, ce phénomène n'est certainement pas aussi massif que chez les être humains.

Résumé du chapitre II.1

"[...] prehuman imitation is non-reflexive; the subject has no knowledge of itself as a self imitating another."

Cette citation d'Eric Gans (1995*) fait en quelque sorte le lien entre les deux sections de ce chapitre. Nous avons vu en A.1 les capacités remarquables, mais cependant limitées, des grands singes dans des tâches méta-cognitives, dans le domaine de la mémoire et de la perception. En particulier, certaines expériences récentes semblent suggérer des limites dans la capacité qu'ont les individus de ces espèces à se voir eux-mêmes comme des êtres apprenants, c'est-à-dire à envisager, par une opération réflexive, un niveau de connaissance où ils seraient eux-mêmes les sujets de cette connaissance.

D'un autre côté, l'étude des mécanismes d'apprentissage social chez les grands singes montre que ceux-ci ne semblent pas percevoir leurs congénères comme des êtres intentionnels. Même si on ne peut exclure que certains animaux aient une certaine conscience de soi et qu'ils se perçoivent eux-mêmes comme des êtres intentionnels, il est pratiquement certain qu'ils ne considèrent pas leur congénère comme un autre pourvu d'états mentaux et d'intentions. Il n'y a pas *d'autre* intentionnel au sens où nous l'entendons.

Enfin, nous avons vu à travers des comptes-rendus d'expériences que l'imitation humaine d'actions s'intéresse également à *la stratégie* ou à *la procédure* que le modèle a utilisé pour effectuer cette action ; alors que l'imitation animale ne s'intéresse qu'au résultat de cette action dans l'environnement.

Le type d'imitation qui semble réservée à l'espèce humaine est une imitation qui s'intéresse aussi bien au résultat d'une action dans l'environnement, qu'à la procédure qui a été utilisée, ou à l'intention sous-jacente à cette action.

1.2. Le rôle de l'imitation dans le développement

‘My sense of myself grows by imitation of you,
and my sense of yourself grows in terms of my
sense of myself.’

Baldwin (1894)

Nous avons vu dans la section précédente la place singulière que peut avoir l'imitation dans la caractérisation des processus de transmission sociale propres à l'espèce humaine. Nous avons en particulier mis l'accent sur une définition de l'imitation en tant que processus qui œuvre à la modification des actions mais également des buts et des désirs des individus. Cette approche de l'imitation ne s'inscrit pas dans un espace tout à fait vierge. L'imitation est un thème ancien dans le débat sur la distinction entre l'homme et les autres animaux puisque déjà Aristote considérait que « *l'Homme diffère des autres animaux en ce qu'il est plus apte à l'imitation* » (Poétique 4). L'étude de l'imitation a cependant connu un regain d'intérêt à la fin XIXe siècle, avec les travaux de Tarde qui lui a consacré une grande partie de son oeuvre et ne promettait rien de moins à l'imitation qu'un rôle équivalent en sciences sociales à celui que joue la théorie de l'évolution darwinienne en biologie. Fait notable par rapport à ce que nous venons de voir, la notion d'imitation évoquée par Tarde est précisément une imitation qui s'attache, au-delà des actions proprement dites, aux vouloirs et aux idées :

L'invention et l'imitation sont l'acte social élémentaire, nous le savons. Mais quelle est la substance ou la force sociale dont cet acte est fait : dont il n'est que la forme? En d'autres termes, qu'est-ce qui est inventé ou imité ? Ce qui est inventé ou imité, ce qui est imité, c'est toujours une idée ou un vouloir, un jugement ou un dessein, où s'exprime une certaine dose de croyance et de désir, qui est en effet toute l'âme des mots d'une langue, des prières d'une religion, des administrations d'un État, des articles d'un code, des devoirs d'une morale, les travaux d'une industrie, des procédés d'un art. La croyance et le désir : voilà donc la substance et la force, voilà aussi les entités psychologiques que l'analyse retrouve au fond de toutes les qualités sensationnelles avec lesquelles elles se combinent ; et lorsque l'invention, puis l'imitation, s'en emparent pour les organiser et les employer, ce sont là, pareillement, les vraies quantités sociales.³²

³² *Les Lois de l'imitation*, Tarde G., 1890/2001, p203

Ce passage est d'autant plus intéressant qu'il met en évidence une certaine complication logique à considérer que l'imitation peut prendre également comme objet les idées et les vouloirs. Tarde fait ici une distinction entre la substance dont est fait l'acte d'imitation, les croyances et désirs, et l'acte d'imitation lui-même, qui est à la fois la forme de cette substance et la force qui l'organise. Par conséquent, l'imitation qu'aborde Tarde est un objet étrange : il n'est que la forme de sa substance et pourtant il l'organise et donc donne forme à cette même substance. Ainsi la notion d'imitation qui apparaît dans ce passage des *Lois de l'imitation* met en scène *l'imitation comme un processus capable de changer sa propre forme*. Nous reviendrons dans la partie III sur cet aspect singulier de l'imitation.

Mais la démarche de Tarde n'est pas isolée et à la même époque, d'autres scientifiques s'intéressent à l'imitation sous un angle de vue bien différent. Parallèlement à cette approche de l'imitation comme principe fondamental dans la constitution du social, le psychologue James Mark Baldwin³³ propose une vision de l'imitation comme principe fondamental de développement chez l'enfant en proposant une théorie selon laquelle l'imitation serait le premier mode d'interaction sociale à partir duquel l'enfant construit les représentations qui lui permettront d'élaborer des modes d'interactions sociales plus complexes. Quelques décennies plus tard, la psychologie du développement connaîtra un essor considérable avec les travaux de Piaget, qui à partir des années 1960 proposera une théorie constructiviste du développement, étroitement lié à l'imitation, qui dresse un portrait en six stades discrets de l'émergence de représentations chez l'enfant. Comme nous allons le voir, certains courants actuels en psychologie du développement poursuivent leurs investigations dans cette direction et sont à même de proposer à l'imitation un rôle d'amorce dans la construction des représentations des individus.

II.2.A Le développement de l'imitation chez l'enfant

Il est couramment admis par les psychologues que l'imitation est l'une des modalités importantes par lesquelles l'enfant apprend de nouvelles choses de son environnement. Il est par ailleurs fréquent que l'enfant ne puisse pas reproduire immédiatement un comportement observé et le rejoue de manière différée. Ce phénomène a attiré l'attention des chercheurs car il fournit une preuve indirecte de l'existence de représentations. C'est la raison pour laquelle il

³³ Baldwin, J. M. (1894). Imitation: A chapter in the natural history of consciousness. *Mind*, 3, 2 6–55. Le rapport de la théorie de Baldwin est essentiellement tiré de la présentation qu'en ont fait Zelazo et Lourenco 2003.

a fait l'objet de nombreux protocoles expérimentaux. En effet, dans le cas de l'imitation différée, l'enfant doit garder sous forme de représentations mentales, un modèle du comportement qui puisse être réutilisé lors d'une action future. De ce point de vue, l'imitation est donc étroitement liée aux capacités à former des représentations durables, ainsi qu'aux caractéristiques de la mémoire. Cette propriété de l'imitation différée a été soulignée par Piaget³⁴ au début des années 1960. Sa théorie constructiviste du développement fait en effet l'hypothèse d'une succession de stades discrets au cours du développement, caractérisés par l'acquisition de fonctions cognitives inter-domaines. Pour Piaget, les capacités pour l'imitation culminent entre 18 et 24 mois, précisément lorsque l'enfant se montre capable d'imitation différée (Figure 19). Dans cette perspective, l'imitation différée est la marque de l'apparition de représentations mentales qui délimitent la fin du stade sensori-moteur.

Numéro des stades et âge	Développement sensori-moteur	La construction de l'objet permanent	Vers la représentation par l'imitation
I Premier mois	Exercice des réflexes	(il n'y a que des réactions immédiates et incoordonnées à des stimuli actuels) phénoménisme	Absence d'imitation (mais renforcement éventuel d'un excitant interne par un excitant externe)
II (1 - 2 mois)	Premières adaptations acquises Réactions circulaires primaires	Pas de recherche de l'objet absent (en dehors du prolongement immédiat de l'action présente)	Imitation sporadique (prolongement des mouvements d'accommodation)
III (3 - 9 mois)	Réactions circulaires secondaires Procédés destinés à faire durer les spectacles intéressants	Idem (pas de recherche de l'objet absent) mais action plus prolongée après un départ	Imitation systématique des sons appartenant déjà à la phonation de l'enfant ou des mouvements exécutés antérieurement de façon visible pour le sujet
IV (10 - 11 mois)	Application de moyens connus aux situations nouvelles Coordination des schèmes secondaires	Recherche de l'objet disparu, mais avec retour à la première cachette	Imitation des mouvements déjà exécutés de manière invisible pour le sujet Début d'imitation de modèles (sonores ou visuels) nouveaux
V (12 - 17 mois)	Réactions circulaires tertiaires Découverte de moyens nouveaux par expérimentation active	Recherche de l'objet disparu, avec retour à la première cachette seulement si le déplacement est invisible (connaissance des déplacements visibles)	Imitation systématique des modèles nouveaux (y compris s'ils correspondent à des mouvements invisibles)
V (18 - 24 mois)	Invention de moyens nouveaux par combinaison mentale	Recherche de l'objet disparu avec connaissance même des déplacements invisibles (objet substantiel)	Imitation différée début de l'imitation représentative

Figure 19 : Tableau récapitulatif des sous-stades de la petite enfance selon Piaget. (document fourni par l'IUFM de Midi Pyrénées, <http://www2.toulouse.iufm.fr/>)

Suite aux travaux pionniers de Piaget en psychologie du développement, de nombreuses études ont été menées pour tenter de confirmer ou d'infirmer la théorie de Piaget d'un développement procédant par stades successifs. Cette littérature étant bien évidemment très vaste, nous allons nous concentrer plus particulièrement sur l'étude de l'imitation et des phénomènes associés. Ces trente dernières années, un certain nombre d'études (voir Hayne

³⁴ Piaget, J. (1962). *Play, dreams and imitation in childhood*. New York: Norton.

2002* et Meltzoff 1998*,1999* pour des articles de fond) ont pu dresser un portrait assez précis de l'évolution de l'imitation au cours de la petite enfance. Contrairement au tableau dressé par Piaget, les travaux de Meltzoff et Moore suggèrent que le nouveau-né est doté, dès la naissance, de capacités représentationnelles rudimentaires, mesurées en termes d'imitation différée, qui se développent ensuite au cours des interactions avec son environnement. Celle-ci porterait initialement sur des représentations sensorimotrices dont les fameux neurones miroirs³⁵ pourraient être les bases neurologiques. Nous résumons ici dans leurs grandes lignes les principales observations faites chez des enfants durant les deux premières années de leur vie, en les combinant avec des résultats portant sur l'inférence d'intentions chez l'enfant, pour des raisons qui n'échapperont pas au lecteur, les résultats sont tirés d'exposés de fond qui pourront être trouvés dans [Hayne 2002*](#), [Johnson et al. 2001*](#) et Tomasello 1999 (cette liste de micro-stades n'est pas bien sûr une liste exhaustive, et est de plus limitée aux observations effectivement réalisées):

- 72h : Des nouveau-nés imitent des expressions du visage comme l'action de sortir la langue ou d'ouvrir la bouche.
- Six semaines : Les nouveaux-nés imitent des expressions du visage en présence d'un modèle et également de manière différée (avec 24h de délai).
- 6 mois : Les enfants sont capables d'imitation différée suggérée portant sur des actions mettant en scène des objets.
- 9 mois : Les enfants s'intéressent préférentiellement aux objets qui semblent être mus par un but précis (par exemple atteindre une cible donnée, en contournant d'éventuels obstacles. La notion de but est ici minimale). Ils commencent à s'engager spontanément dans de nouveaux types de relations qui ne sont plus dyadiques (enfant-objet), mais triadiques (enfant, adulte, objet), dans des configurations d'attention partagée ou dans des actes d'imitation.
- 9-12 mois : Les enfants contrôlent du regard l'attention de l'adulte lorsqu'ils sont engagés dans une activité commune.
- 11-14 mois : Les enfants utilisent le regard de l'adulte pour concentrer leur attention sur un objet extérieur et commencent à agir sur ces objets de la même manière que l'adulte.
- 13-15 mois : Les enfants désignent des objets à l'adulte afin que celui-ci ajuste son attention à la leur.

³⁵ Les neurones miroirs sont des neurones dont l'activité est suscitée par certains mouvements, qu'ils soient effectués par le sujet lui-même ou par un individu se trouvant dans son champ de vision.

- 14-16 mois : Les enfants se sont montrés capables d'imitation différée avec quatre mois de délai, par rapport à des actions mettant en jeu des objets.
- 15-18 mois : Les enfants se montrent capables de reproduire une action ratée effectuée par un démonstrateur en reconstituant le but initial présupposé (comme par exemple mettre une boule dans un pot alors que le démonstrateur l'a jetée à côté par accident). Fait intéressant, Johnson et al. (2001*) ont montré que des enfants de 15 mois se sont révélés attribuer des intentions à un être non humain (une poupée représentant un singe, manipulée de manière invisible par un marionnettiste) du moment qu'il présentait une organisation morphologique et un comportement similaire au leur (dans ce cas : la présence d'un visage, de mains, de mouvements spontanés et d'interactions sociales avec d'autres agents). Ceci suggère que les enfants de cet âge sont capables d'attribuer des intentions à des agents, mais que leur distinction entre agents intentionnels et agents non intentionnels n'est pas nécessairement isomorphe à la distinction entre humains et non humains.
- 24 mois : Les enfants passent le test de reconnaissance de soi dans un miroir dit test de Gallup³⁶ (le protocole standard est le suivant : le sujet est marqué à son insu d'une marque de couleur en un endroit inaccessible à la vue - par exemple sur le front - puis on vérifie que le sujet prend conscience de la présence de la marque lorsqu'il se voit dans un miroir. Ceci se manifeste généralement par le fait que le sujet porte la main à l'endroit où se trouve la marque)

Cette liste non exhaustive met en évidence un certain nombre de traits caractéristiques du développement cognitif chez l'enfant. La première chose à remarquer est que l'imitation différée apparaît très tôt, contrairement à l'hypothèse de Piaget, et rien dans les observations actuelles ne permet d'écarter l'hypothèse que les enfants possèdent, dès la naissance, un certain type de représentations sensorimotrice (Hayne 2002*) qui dès le départ, rend possible un apprentissage social par le jeu de l'imitation. L'imitation différée porte tout d'abord sur des comportements de surface, pour s'étendre aux procédures mises en jeu pour les effectuer et à des phénomènes non directement visibles comme l'intention qui sous-tend une action, avant même l'apparition du langage.

³⁶ Gallup, G. G., Jr. (1970). Chimpanzees: self-recognition. *Science* 167: 86-87.

Ceci est particulièrement mis en évidence par une série d'expériences démontrant cette capacité chez les enfants de 14 mois. L'étude initiale menée par Meltzoff³⁷ met en scène un adulte assis à une table, sur laquelle est posée une boîte lumineuse. Sous les yeux des enfants, l'adulte s'incline et allume la boîte en la touchant avec son front. Deux tiers des enfants se sont montrés capables d'imiter ce comportement une semaine plus tard. Ils n'ont pas utilisé leurs mains pour allumer la lampe, bien que cela eût été beaucoup plus facile pour eux. Cette expérience peut s'interpréter de deux façons. La première est que les enfants n'ont pas considéré l'adulte comme un agent intentionnel et ont simplement imité son comportement sans réellement en comprendre les buts. La seconde interprétation est que les enfants ont bien compris les intentions de l'adulte et ont utilisé les mêmes moyens pour satisfaire les mêmes buts (ici un des buts possibles est celui d'allumer la boîte *avec* le front). Cette conclusion a été dans une certaine mesure confirmée par des expériences suggérant que dans certains cas, les enfants de 14 mois apprenant par l'observation vont bien au-delà de la simple imitation.

Ainsi, Gergely et al. 2002* ont reproduit les expériences de Meltzoff qu'ils ont comparé à un protocole où les enfants ont pu observer que les mains de l'adulte étaient occupées à tenir une couverture enveloppant l'adulte (Figure 20). Avec ce deuxième protocole, 79% des enfants ont utilisé leurs mains lorsqu'ils ont eu par la suite l'occasion d'imiter l'action en question, alors que seulement 20% ont utilisé cette procédure dans l'expérience originale reproduite. Ces études montrent donc que l'imitation chez ces enfants, qui ne parlent pas encore, est déjà un processus sélectif et interprétatif plutôt que la simple reproduction d'un comportement observé. L'hypothèse des auteurs est que dans les cas où les enfants ont reproduit le geste de l'adulte, ceux-ci auraient pu le faire après avoir inféré que l'action d'allumer la lampe avec la tête devait procurer quelque avantage. C'est la raison pour laquelle ils qualifient cette imitation de « *rationnelle* ».

D'autres interprétations sont cependant possibles, comme par exemple le fait que l'enfant interprète cette action comme une intention d'allumer la lampe d'une façon inhabituelle, et reproduise cette intention, que l'enfant interprète ceci comme un acte chargé d'une signification inconnue, qu'il cherche néanmoins à reproduire (un peu comme un étranger nouvellement débarqué qui imite certaines coutumes sans nécessairement en comprendre la signification), ou le fait que l'enfant porte un intérêt particulier à la stratégie mise en œuvre lors d'une action.

³⁷ Meltzoff A. 1988. Infant imitation after a 1-week delay—long-term-memory for novel acts and multiple stimuli. *Dev Psychol* 24:470–476

Quoi qu'il en soit, le résultat important de ces expériences est que l'imitation à 14 mois est déjà une imitation intentionnelle et interprétative, qui met en jeu à la fois le produit des actions dans l'environnement, mais également les stratégies et les intentions, ce qui est un trait spécifiquement humain. Ces études en psychologie sont d'ailleurs corroborées par de récents travaux en neurobiologie, qui commencent à mettre en évidence l'influence de ces trois facteurs dans des actes d'imitation (Rumiati & Bekkering 2003*, Chaminade et al. 2002*).

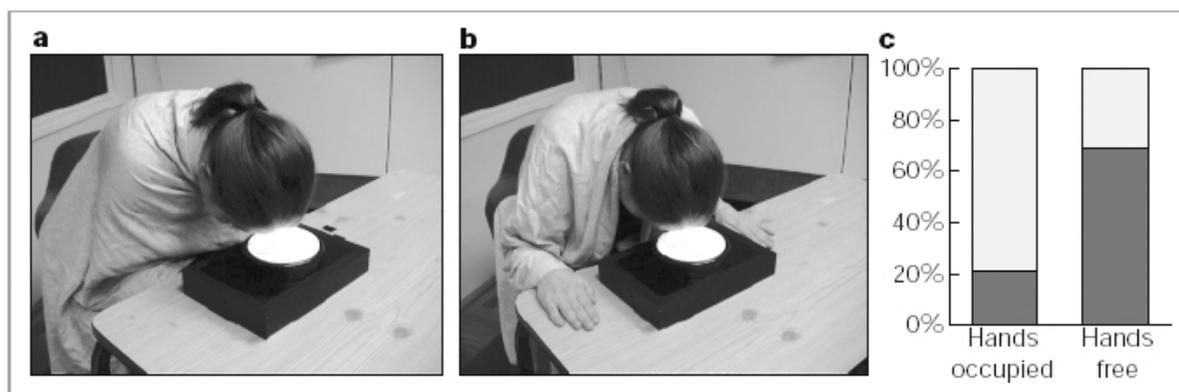


Figure 20 : Comparaison des méthodes utilisées par un enfant de 14 mois pour allumer une boîte lumineuse une semaine après avoir observé un adulte exécuter la même tâche sous deux conditions différentes *a* et *b*. Condition *a*: l'adulte allume la lampe en la touchant avec son front, ses mains étant occupées sous une couverture. Condition *b* : l'adulte allume la lampe avec son front, ses mains étant libres et clairement apparentes. C: pourcentages des méthodes utilisées par les enfants pour allumer la lampe une semaine après avoir vu un démonstrateur l'allumer avec le front (barre de gauche : l'adulte avait les mains occupées ; barre de droite : l'adulte avait les mains libres) enregistrés sur une période de 20 secondes. En gris foncé : l'action avec la tête est reproduite, en gris clair : seules les mains ont été utilisées. (extrait de : Gergely et al., Rational imitation in preverbal infants, Nature, Vol 415, 2002*).

Le deuxième phénomène à mentionner, qui apparaît par exemple dans le compte-rendu de Tomasello (1999), est que les différentes capacités évoquées ci-dessus émergent graduellement dans un ordre bien défini, suggérant un processus sous-jacent de construction récursive des capacités cognitives où chaque acquis est à même d'intervenir dans la formulation des acquis qui le suivent (c'est le cas par exemple du rôle de l'attention d'autrui qui passe du statut de donnée extérieure à l'interaction – l'adulte fait ou ne fait pas attention à l'action en cours - au statut d'élément qui peut être contrôlé au cours de l'interaction – l'enfant sait qu'il peut attirer l'attention de l'autre par des gestes déictiques par exemple. Ainsi, contrairement à l'idée de Piaget selon laquelle le développement se fait par grandes étapes constituées d'avancées cognitives inter-domaines, les études précédentes suggèrent une évolution beaucoup plus graduelle, qui s'opère dans des domaines particuliers de la connaissance à mesure que de nouveaux éléments sont intégrés et maîtrisés.

Le fait d'observer une évolution graduelle est important. Dans une perspective évolutionniste, les nouvelles capacités cognitives qui ont marqué une différence entre humains et non-humains sont apparues lors de transitions brutales au cours de l'évolution. Or le caractère très récent de l'apparition de la lignée des *Homos* ne laisse la place que pour un nombre très restreint d'adaptations majeures (une ou deux). Cela veut dire que la spécificité de la cognition humaine devrait donc pouvoir être ramenée à un très petit nombre de changements cognitifs majeurs qui, par l'effet du développement, peuvent engendrer un grand nombre de différences cognitives spécifiques. Par exemple, Donald (1991 & 1997*) dresse un portrait de l'évolution humaine à partir de deux adaptations majeures qui sont l'acquisition de capacités mimétiques et l'acquisition de la parole, Tomasello (1999) propose une transition cognitive majeure qui serait la capacité des êtres humains à voir les autres comme des êtres intentionnels. Toutes les autres caractéristiques de la cognition humaine sont alors vues comme la combinaison du développement et de ces quelques caractéristiques principales. C'est cette vision des choses que semble confirmer l'évolution graduelle observée, et c'est sur la capacité des acquisitions cognitives pressenties à engendrer cette succession de micro-adaptations qu'est jugée la cohérence des théories proposées.

II.2.B L'imitation et l'élaboration d'un système de représentations

II.2.B.a L'imitation, processus de re-présentation

Une des théories actuelles de la psychologie du développement est particulièrement pertinente en ce qui nous concerne, car elle place l'imitation au centre du système de construction des représentations. Exposée par Zelazo and Lourenco dans *Imitation and the dialectic of representation*, celle-ci s'inscrit dans la lignée de l'épistémologie génétique de James Marc Baldwin, et s'inspire d'un certain nombre de travaux plus récents comme par exemple, l'herméneutique de Paul Ricœur.

Baldwin (1861-1934), fut un des premiers adeptes du courant de la « nouvelle psychologie », introduite par Wilhelm Wundt, psychologue de Leibzig, qui se mettait en porte-à-faux avec la théorie nativiste de l'époque. Il fut en particulier l'un des premiers à effectuer des expériences de psychologie avec des enfants. Sa théorie du développement considérait l'imitation comme principe générateur chez le nouveau-né, du système de représentations que celui-ci est amené à développer au cours de sa vie. À ses yeux, la pratique mimétique était pour lui la source de la distinction fondamentale entre le soi et les autres. Selon Baldwin, le nouveau-né s'engage dès sa naissance dans un processus dialectique

d'identification par imitation, qui lui permet de construire au cours de *re-présentations* mimétiques des représentations. Celui-ci est initié par la présence d'une action qui est (au moins partiellement) en dehors du répertoire comportemental de l'enfant et qui est donc vue à travers son aspect projectif d'entité extérieure. En imitant cette action, le nouveau-né en vient peu à peu à saisir son aspect subjectif, comme par exemple les émotions qui l'accompagnent ou les efforts qu'elle engendre. Une fois que cela se produit, cette subjectivité est automatiquement éjectée vers le comportement initial, lui fournissant ainsi une nouvelle interprétation.

L'acte d'imitation devient ainsi également un acte d'interprétation au cours duquel le sujet donne un nouveau sens aux objets de son imitation, modifiant par-là même la représentation qu'il en a. Zelazo et Lourenco (2003*) dans leur présentation de l'évolution de ce courant de pensée, proposent comme illustration la position de Baldwin, l'exemple d'un père qui se pique le doigt avec une aiguille. Sa fille peut observer son comportement sans pour autant apprécier la portée douloureuse de son action. Cependant, si elle imite le comportement de son père, elle ressentira la douleur et en inférera immédiatement que son père l'a également ressentie. Par conséquent, elle donnera une interprétation nouvelle à la scène qu'elle a observée et verra désormais le fait de se piquer sur une aiguille d'une manière différente ; sa compréhension de ce phénomène se sera transformée d'un point de vue projectif, en un point de vue subjectif, puis éjectif.

Ainsi, Baldwin développe une théorie selon laquelle les représentations sont originellement liées à des stimuli et sont dépendantes du contexte, ce qui implique que les premières représentations sont déterminées par quelque chose d'extérieur. Cependant, les enfants deviennent peu à peu capables de créer des représentations sur la base de suggestions plus subtiles, ces représentations sont de moins en moins dépendantes d'un contexte extérieur et de plus en plus déterminées de façon interne. Elles sont à l'origine, littéralement des *re-présentations* d'actions ou de situations extérieures que l'enfant reproduit par imitation et internalise durant ce processus. L'imitation est alors le phénomène qui dès la naissance permet à l'enfant d'avoir prise sur le monde.

Dans la théorie de Baldwin, les enfants sont donc imitateurs dès la naissance. Il les désigne d'ailleurs comme de véritables « *machines à copier* ». Le caractère de cette imitation se développe à mesure que le système des représentations évolue et que les centres sensori-moteurs de l'enfant se développent. Ainsi Baldwin considère l'imitation comme étant initialement automatiquement suggérée chez l'enfant par la perception de son propre

comportement et celle des stimuli de son environnement, tels que les expressions faciales³⁸. Petit à petit, l'imitation devient moins automatique et plus délibérée à mesure que l'enfant apprend à distinguer le connu du connaissant. C'est ainsi que Baldwin suggère que l'origine de la volition peut être vue dans le changement du caractère de l'imitation qui apparaît à la fin de la première année de la vie de l'enfant, lorsque la maturation des centres de coordination rend possible une comparaison consciente entre l'action qui vise à être imitée et celle qui figure au répertoire de l'enfant.

Les représentations ainsi construites de manière récursive en interaction avec le monde extérieur sont susceptibles d'être utilisées en dehors de leur contexte de création à mesure qu'elles se stabilisent. Ceci a pour effet d'apporter une compréhension conceptuelle de divers aspects des représentations par un processus de distanciation. Par exemple, les enfants commencent d'abord par distinguer les représentations de leurs significations, puis peuvent appréhender les relations qu'elles établissent entre elles, etc. Zelazo suggère que ce processus de décontextualisation est guidé par une activité réflexive qui permet, à mesure que les représentations deviennent des images mentales manipulables, de les intégrer à des structures de pensées hiérarchisées. Ce processus est alors contraint par la complexité des relations que les enfants sont susceptibles d'établir, complexité qui connaît des changements qualitatifs à des tranches d'âge bien déterminées, comme ceux que l'on observe entre trois et cinq ans, et qui correspondrait à un accroissement de leurs capacités réflexives.

Remarquons enfin l'actualité de la position de Baldwin qui, bien qu'ancienne, s'inscrit parfaitement dans le débat entre la théorie de la simulation et la théorie de la théorie (cf. encart n°7) autour des capacités humaines de mentalisation. Elle permet en effet d'envisager une articulation au cours du développement de l'individu, entre les deux modes de représentation. Le premier, précoce, fondé sur la simulation dont l'étendue d'application se développe à la suite de chaque acte d'imitation, ceux-ci transformant un point de vue projectif en un point de vue éjectif. Le deuxième, plus tardif et plus efficace dans beaucoup de situations complexes, s'appuie sur la théorie de la théorie, et utilise les représentations développées par le premier.

³⁸ Baldwin, J. M. ,1897 *Social and ethical interpretations in mental development: A study in social psychology*. New York: Macmillan

Théorie de la simulation vs. Théorie de la théorie

« La théorie de la simulation repose sur l'idée qu'un mécanisme cognitif peut fonctionner "hors-circuit" ou "hors-ligne" (off line) (Stich et Nichols). Un système de traitement de l'information peut être détourné de son fonctionnement normal, travailler sur des "entrées" non canoniques et les transformer en "sorties" non canoniques. Par exemple, la fonction du système de décision de l'agent est de transformer ses croyances et ses désirs en décisions d'agir. Un tel mécanisme peut travailler hors-circuit et transformer des représentations de croyances et de désirs d'autrui, non pas en décisions d'agir, mais en prédictions sur les décisions d'agir d'autrui. Selon les psychologues Kahneman et Tversky, la capacité de prédire les réactions émotionnelles d'autrui s'appuie également sur une heuristique de la simulation.

Dans l'étude des capacités humaines de mentalisation (c'est-à-dire d'attribution à soi et à autrui d'états mentaux), une controverse importante oppose les partisans de la "théorie de l'esprit" dite "théorie de la théorie" (Leslie, Baron-Cohen, Gopnik) et les partisans de la théorie de la simulation (Gordon, Goldman, Harris). Certains partisans de la théorie de la théorie (Gopnik, Meltzoff) comparent la genèse des capacités de mentalisation au processus de construction d'une théorie scientifique lui-même conçu sur le modèle kuhmien des changements révolutionnaires entre paradigmes scientifiques. Les partisans d'une approche modulaire (Leslie, Baron-Cohen) conçoivent la genèse des capacités de mentalisation comme un processus de maturation d'un module inné et spécialisé (comparable au processus chomskien de la maturation de la faculté de langage). Dans ces deux versions, la capacité d'attribuer des états mentaux à soi et à autrui est conçue d'une part comme une aptitude spécialisée au raisonnement dans le domaine psychologique, et d'autre part comme une capacité métareprésentationnelle, c'est-à-dire comme une capacité à former des représentations de représentations.

Le débat entre théorie de la simulation et théorie de la théorie s'organise autour de l'idée, émise notamment émise par Gordon et Goldman, que la genèse des capacités de mentalisation pourrait être expliquée de manière plus économique par le développement progressif d'une capacité de simulation, c'est-à-dire comme une capacité générale à se projeter dans une situation éventuellement contrefactuelle ou hypothétique. Plus économique parce que le mécanisme postulé est général et non spécialisé dans le domaine du raisonnement psychologique. Cette hypothèse soulève à son tour deux types de questions : dans quelle mesure l'aptitude introspective à détecter ses propres états mentaux a-t-elle une priorité sur l'aptitude à adopter le point de vue d'autrui ? Par quels mécanismes un individu se projette-t-il en autrui et comment représente-t-il la différence entre ses propres représentations de la réalité et celles d'autrui lorsqu'elles divergent ? »

Source : Institut Jean Nicod, extrait de projet de recherche (2004*)

II.2.B.b Réflexivité et manipulation des représentations

Pour défendre l'idée que la réflexivité, dans sa capacité à permettre une distanciation par rapport aux représentations, est à l'origine de la complexification du système des représentations (théorie dénommée *Cognitive Complexity and Control Theory - CCC*), Zelazo et ses collègues ont établi un programme de recherche visant à mettre en évidence expérimentalement le lien chez l'enfant entre l'évolution des capacités à réfléchir sur ses représentations et le niveau de complexité, en termes d'enchâssement de règles, des problèmes qu'il peut résoudre.

Parmi les changements qualitatifs des capacités cognitives de l'enfant, certains sont si importants qu'ils frappent toujours ceux ou celles qui les observent. C'est le cas en particulier du changement radical observé entre trois et cinq ans concernant son rapport aux autres et au monde, et que certains attribuent à l'émergence d'une théorie de l'esprit. C'est en effet vers cinq ans que les enfants commencent à pouvoir prendre différentes perspectives sur les objets du monde et commencent à pouvoir juger les autres en fonction d'états mentaux qu'ils leur attribuent en propre, distincts des leurs.

De nombreux psychologues se sont intéressés à ce phénomène au milieu des années 1980. Toute une série d'expériences a ainsi mis en évidence l'incapacité des enfants de trois ans à prendre en compte l'asymétrie d'information pour inférer les états mentaux d'autrui, alors qu'à partir de cinq ans, ils commencent à envisager des états mentaux différents des leurs. L'expérience la plus connue révélant l'émergence de ces nouvelles capacités chez l'enfant est celle dite de la « fausse croyance³⁹ ». Le protocole est le suivant : on montre à un enfant deux marionnettes, Anne et Jean, devant une table où sont posés deux bols et une bille. Jean place devant Anne la bille sous le bol *A*, puis Anne sort de la pièce. Pendant son absence, Jean change la bille de bol (bol *B*). Lorsque Anne revient dans la pièce, on demande à l'enfant de désigner le bol sous lequel Anne croit que la bille se trouve. À trois ans, la plupart des enfants désignent le bol *B*, montrant ainsi qu'ils ne distinguent pas leurs croyances de celle des marionnettes. Ils ne peuvent pas formuler la fausse croyance d'Anne car celle-ci est en conflit avec leur propre croyance. En revanche vers cinq ans, la plupart des enfants répondent correctement à la question en désignant le bol *A*. Il a souvent été déduit de ce type d'expériences que la différence de comportement entre les enfants de trois et de cinq ans est

³⁹ Wimmer, H., & Perner, J. (1983). Beliefs about beliefs: Representation and constraining function of wrong beliefs in young children's understanding of deception. *Cognition*, 13, 103-128.

due à l'émergence de nouvelles capacités à comprendre les états mentaux d'autrui, c'est-à-dire à élaborer une théorie de l'esprit.

Du fait de ces nombreuses études, la tranche d'âge 3-5 ans constitue un domaine privilégié pour examiner le rôle de la réflexivité dans la cognition. Si la théorie CCC est fondée, elle devrait pouvoir mettre en relation l'apparente émergence d'une théorie de l'esprit chez les enfants avec un changement dans leur capacité à réfléchir sur leurs représentations. C'est la raison pour laquelle, ses défenseurs se sont particulièrement intéressés à cette tranche d'âge. Ainsi, Frye et al. 1995* remarquent que les différentes expériences sur l'émergence d'une théorie de l'esprit (« fausse croyance », Wimmer and Perner 1983, « apparence-réalité », Gopnik et Astington⁴⁰ 1988, « changement de représentation » , Flavell, Green, et Flavell⁴¹ 1986), mettant en évidence des changements *simultanés* de performances dans ces trois tâches, ont toutes en commun de mettre en jeu deux perspectives différentes et contradictoires sur le même jugement (celle de l'enfant et celle de l'autre dans le cas de la fausse croyance). Ainsi pour répondre correctement à une question sur les croyances de l'autre, l'enfant doit être capable de raisonner depuis la perspective de l'autre, en dépit d'un éventuel conflit avec sa propre perspective.

Zelazo et ses collègues proposent comme solution au problème de la fausse croyance d'introduire la notion de cadre initial de référence (*initial setting*) de manière à restreindre de manière appropriée le domaine d'application de la règle d'inférence. Dans le cas de la fausse croyance par exemple, un cadre de référence est nécessaire pour coder la distinction entre la perspective de soi et la perspective de l'autre. Ainsi, l'enfant après cinq ans est capable d'émettre un jugement sur une perspective donnée, malgré la présence d'une autre perspective conflictuelle, car il est capable de restreindre ses inférences à cette perspective. Une des manières de représenter le changement de cadre de référence pour le jugement est d'utiliser des règles enchâssées du type « si *s* alors si *a* alors *c* » où *s* représente un cadre initial de référence, *a* l'antécédent et *c* le conséquent. Une hiérarchie de ce type est nécessaire lorsque les réponses concernant un jugement sont conflictuelles d'un cadre de référence à l'autre. Le fait de conditionner leur jugement à un cadre de référence permettrait aux enfants de cinq ans de moduler leur réponse en fonction du cadre de référence choisi. L'hypothèse de Zelazo et de ses co-auteurs est donc que les enfants deviennent capables vers cinq ans de manipuler des

⁴⁰ Gopnik, A., & Astington, J.W. (1988). Children's understanding of representational change and its relation to the understanding of false belief and the appearance-reality distinction. *Child Development*, 59, 26-37.

⁴¹ Flavell, J.H., Green, E.L., & Flavell, E.R. (1986). Development of knowledge about the appearance-reality distinction. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 51 (1, Serial No. 212).

règles enchâssées du type précédent, alors qu'à trois ans, ils ne sont capables que de manipuler des règles du type « si a alors c ».

L'avantage d'une telle approche est qu'elle propose une explication commune aux trois expériences standards en théorie de l'esprit : fausse croyance, apparence-réalité, changement de représentation ; et qu'elle peut être testée expérimentalement par des protocoles qui ne mettent pas en jeu la compréhension des états mentaux d'autrui. Illustrons ceci en présentant l'une des expériences proposées pour corroborer cette théorie : le test du tri de cartes (Frye et al. 1995*, Zelazo et al. 1996*).

Le protocole est le suivant : on considère un jeu de cartes sur lesquelles peuvent figurer deux types de formes (par exemple des fleurs ou des voitures) avec deux couleurs différentes (par exemple jaune ou bleu, Figure 21). L'enfant est placé devant une table sur laquelle sont posées deux boîtes, une à sa gauche et une à sa droite. L'expérimentateur convient ensuite avec l'enfant de deux jeux : le jeu des couleurs et le jeu des formes. Le jeu des couleurs consiste à classer les cartes en fonction de leur couleur, en mettant par exemple les cartes bleues dans la boîte de gauche, et les cartes jaunes dans la boîte de droite. Le jeu des formes consiste à classer les cartes en fonction de leur forme, en mettant par exemple les voitures à gauche et les fleurs à droite. Les enfants dès trois ans comprennent ces deux jeux, dont la structure est du type « si *a* alors *c* », et sont capables d'y jouer avec un adulte. Il est facile de voir ce qu'il faudrait pour créer un jeu avec une structure du type « si *s* alors si *a* alors *c* » : il suffit de demander à l'enfant de changer de type de jeu en cours de session (du jeu des couleurs vers le jeu des formes par exemple).

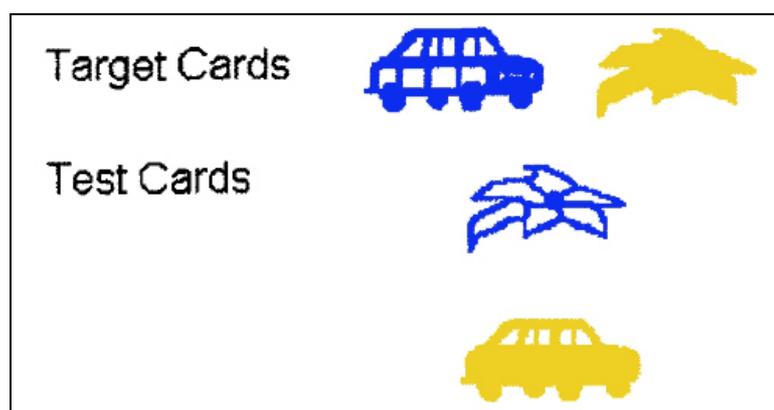


Figure 21 : Exemple de cartes pour l'expérience du tri (Frye et al. 1995). Un exemple typique d'interaction est le suivant. On commence par montrer aux enfants deux cartes cibles et on leur explique l'une des règles. Par exemple, on peut demander aux enfants de trier les cartes par couleurs : « les jaunes vont ici [en pointant le doigt vers une fleur jaune], mais les bleues vont là [en pointant le doigt vers une voiture bleue] ». Alors on donne aux enfants une carte test, comme par exemple une fleur bleue, et on leur demande « ceci est une carte bleue, où va-t-elle dans le jeu des couleurs ? »

Le protocole standard par Frye et al. 1995* et Zelazo et al. 1996* peut être décrit comme suit : les enfants sont entraînés à jouer au jeu des couleurs et au jeu des formes lors de sessions d'entraînement. Ils sont ensuite soumis à une session test qui consiste à trier cinq cartes à la suite suivant l'un des jeux, puis à changer de jeu et à trier cinq autres cartes. Les performances sont mesurées en terme de cartes bien classées, et on étudie la différence de performances entre avant et après le changement des règles du jeu. Ces expériences ont été menées avec des enfants de 3, 4 et 5 ans. Les résultats de ces études peuvent être résumés dans leurs grandes lignes de la façon suivante :

- La majorité des enfants âgés de trois ans n'arrivent pas à changer de règles et continuent à classer les cartes en fonction de la règle initiale (ils ont besoin pour changer de jeu de passer d'abord par une autre activité comme par exemple regarder les images d'un livre),
- la majorité des enfants de 5 ans changent de jeu sans problème.
- Par ailleurs, Frye et ses collègues (1995*) ont montré en faisant passer aux mêmes enfants des tests de tri de cartes et les trois expériences liées à la théorie de l'esprit, que la corrélation entre les performances dans le tri de cartes et les autres tâches de théorie de l'esprit (fausse croyance, apparence-réalité, changement de représentation) était au moins aussi forte que la corrélation entre ces tâches elles-mêmes.

Ce changement de comportement entre trois et cinq ans peut être expliqué soit en termes de fonctions exécutives, soit du point de vue d'un développement de la conscience. Par exemple, en terme de fonction exécutive, on pourrait penser que dans le jeu du tri de cartes, les enfants âgés de trois ans connaissent la règle du second jeu, mais néanmoins ne peuvent pas inhiber une tendance à utiliser la règle du premier jeu (cf.⁴² Diamond, 1991; Konow & Pribram, 1970; Milner, 1963). Une alternative serait de considérer que les enfants de trois ans persévèrent avec la première règle parce qu'ils n'ont pas pu garder la seconde règle présente à

⁴² Diamond, A. (1991). Neuropsychological insights into the meaning of object concept development. In S. Carey & R. Gelman (Eds), *The epigenesis of mind: Essays on biology and cognition* (pp. 67-110). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Konow, A., & Pribram, K.H. (1970). Error recognition and utilization produced by injury to the frontal cortex in man. *Neuropsychologia*, 8, 489-491.

Milner, B. (1963). Effects of different brain lesions on card sorting. *Archives of Neurology*, 90-100.

leur conscience (cf. Goldman-Rakic⁴³, 1990) ou parce que leur connaissance des différentes règles est représentée de manière implicite, et par conséquent est relativement inflexible (cf. Karmiloff-Smith, 1992&1994*).

Zelazo et Frye proposent quant à eux une troisième interprétation qui intègre des aspects de chacune des deux précédentes. Selon eux, les changements de comportement entre trois et cinq ans peuvent être expliqués par l'acquisition d'un système de règles de plus en plus complexe, la complexité étant mesurée par rapport au nombre de niveaux de contrôle que peuvent comporter ces systèmes de règles. Des règles (considérées comme des assertions conditionnelles), permettent de représenter la relation effective entre d'un côté un antécédent, et de l'autre, l'action à exécuter ou l'inférence à produire. De la sorte, des règles de niveau inférieur peuvent être manipulées de manière réflexive par des règles de plus haut niveau, ce qui rend possible une délibération sur le choix des règles intermédiaires. Ainsi, un accroissement de la complexité entre trois et cinq ans, prise dans ce sens, permettrait aux enfants d'utiliser des règles de plus haut niveau, et de déterminer laquelle des deux règles incompatibles de niveau inférieur doit être utilisée. L'interprétation donnée par la théorie CCC des expériences du tri de cartes est alors que les enfants âgés de trois ans connaissent les règles correspondant aux deux jeux différents, mais en absence de règles de plus haut niveau pouvant agir sur elles, ils ne peuvent pas délibérément choisir la règle qui doit être utilisée. Pour cette raison, ils continuent à utiliser la règle qui est la plus fortement associée à la tâche en cours. Des règles de plus haut niveau permettraient à l'enfant de commencer à choisir la dimension pertinente, et ensuite de choisir les règles d'actions compatibles (i.e. « si c'est le jeu des couleurs, alors la carte bleue va ici »).

Zelazo et al. 1996* ont effectué une série d'expériences pour tenter de départager les différentes théories que nous venons d'évoquer. Un bref aperçu de leurs travaux va nous permettre de donner une idée du débat en cours. Avant de poursuivre, il nous faut préciser que les psychologues du développement sont loin d'avoir abouti à une interprétation unique sur ce type d'expériences (voir par exemple Perner 2002*, Towse et al. 2000*), l'interprétation présentée ici est l'un des points de vue possibles.

Zelazo et ses collègues ont mis en place plusieurs protocoles qui leur ont permis de tester les différentes hypothèses, à savoir : incapacité à comprendre les règles, incapacité à inhiber une action, caractère implicite des connaissances, impossibilité d'enchâsser deux règles.

⁴³ Goldman-Rakic, P.S. (1990). The prefrontal contribution to working memory and conscious experience. In J.C. Eccles & O. Creutzfeldt (Eds.), *The principles of design and operation of the brain* (pp. 389-407). New York: Springer-Verlag.

Contentons-nous ici de décrire l'une de leurs expériences qui met en avant les traits les plus remarquables de ce genre d'étude, et dont les résultats sont les plus marqués en faveur de leur approche. Pour vérifier que la persévérance des enfants de trois ans après le changement des règles du jeu (i.e. du jeu des couleurs vers le jeu des formes ou l'inverse) n'était pas due à la méconnaissance de ces règles, ni à un éventuel caractère implicite de celles-ci, mais plutôt à leur incapacité de changer de perspective, Zelazo et ses collègues (Zelazo et al. 1996*, d'expérience n°4) ont élaboré un protocole consistant à poser verbalement des questions aux enfants sur les différents jeux avant qu'ils aient à jouer effectivement. Ils ont de plus considéré deux sortes de tri : l'un verbal, l'enfant devant nommer la boîte dans laquelle doit être rangée la carte qu'on lui présente ; l'autre manuel, l'enfant devant lui-même mettre la carte dans la boîte qu'il estime être la bonne. Les cartes représentaient un bateau ou un lapin pouvant être rouge ou bleu. Les boîtes étaient nommées « boîte d'Ernie » et « boîte du grand oiseau ». Leurs résultats sont que :

- 1) la plupart des enfants (plus de 91 %) trient correctement⁴⁴ les cartes lors des cinq premiers essais avec la première règle du jeu, aussi bien dans la condition de tri verbal que dans celle de tri manuel ;
- 2) la grande majorité des enfants répondent correctement aux questions concernant le jeu lui-même dans la seconde phase de test avec la seconde règle du jeu,
- 3) la grande majorité des enfants de 3 ans continuent néanmoins sous les deux conditions à utiliser la règle du premier jeu.

Voici un exemple typique d'échange entre l'expérimentateur (E) et un enfant de 3 ans (C) dans le cadre du tri verbal (le premier jeu était le jeu des couleurs, le jeu en cours étant le jeu des formes) :

E: Dans quelle boîte va le lapin dans le jeu des formes ?

C: Dans la boîte d'Ernie

E: Et dans quelle boîte va le bateau ?

C: Dans la boîte du grand oiseau.

E: [en montrant à l'enfant une carte ou figure un bateau bleu]. O.K., maintenant jouons au jeu des formes. Voici un bateau bleu. Où doit-il aller ?

C: Dans la boîte d'Ernie.

⁴⁴ Les auteurs ont considéré qu'un enfant triait correctement lorsqu'il y avait au moins quatre réponses bonnes sur les cinq.

Cette dissociation, pour le moins étrange, entre la connaissance d'une règle et son utilisation a été désignée par les auteurs sous le nom de *abulic dissociation*. Selon eux, ce genre de phénomène apparaît lorsque l'enfant est incapable d'intégrer deux règles contradictoires dans un même système de règles plus général, autrement dit, de les conditionner par une métarègle. Les changements de comportement du type de ceux observés entre trois et cinq ans dans les expériences de tri de cartes pourraient ainsi être la conséquence de changements dans la capacité qu'ont les enfants à réfléchir sur les règles qu'ils utilisent et à les choisir de manière délibérée :

[...] Increases in complexity such as the one occurring between 3 and 5 years of age correspond to increases in metacognition and reflection and result in increased control over thought and action. These increases in control have widespread consequences for children's reasoning in social and nonsocial domains (Frye, Zelazo, & Palfai, 1995*)⁴⁵.

Deux aspects de ces études sont importants étant données nos préoccupations. Le premier est qu'elles nous montrent de manière extrêmement précise le type d'organisation hiérarchique nécessaire au raisonnement et à la prise de décision, même dans les situations les plus simples, ce que nous pourrions avoir tendance à oublier tant nous en avons l'usage.

La deuxième est qu'elles mettent l'accent sur la différence entre la connaissance et l'utilisation de cette connaissance, l'articulation se faisant par le biais de la réflexivité. Cette dernière, en faisant émerger des niveaux méta-cognitifs, nous permet de considérer un même problème sous différentes perspectives et d'envisager pour le résoudre, des détours qui seraient impossibles à un niveau moins élevé d'abstraction. C'est peut-être là, comme le propose le célèbre neurologue Antonio Damasio (1995) l'origine de la spécificité de la cognition humaine :

It is our capacity for ever higher levels of meta-reflection that distinguish our selves from the more rudimentary biological selves (or vegetative souls) of other species⁴⁶.

⁴⁵ “[...] L'accroissement de complexité tel que celui qui intervient entre trois et cinq ans correspond à un accroissement des capacités méta-cognitives et de réflexion et ont pour conséquence un accroissement du contrôle de la pensée et de l'action. Les conséquences de ce phénomène sont très importantes pour les types de raisonnement que peut effectuer l'enfant, aussi bien dans le domaine social que non social. »

⁴⁶ « C'est notre capacité de toujours pouvoir envisager des niveaux supplémentaires méta-réflexifs qui distingue notre être des êtres biologiques plus rudimentaires (ou d'esprits végétatifs) des autres espèces ». Il faut noter que les neurologues font la distinction entre le mot *reflective*, qui correspond à une opération de sélection des buts, et le mot *reflexive* qui correspond au contrôle de l'action une fois les buts formulées (cf. Lengfelder & Gollwitzer 2001*, Lieberman 2003*, Lieberman et al. 2003*). C'est la raison pour laquelle nous avons traduit *meta-reflective* en méta-réflexif. Nous n'avons malheureusement pas pu développer ici ces distinctions ainsi que les résultats en neurologie qui les accompagnent, bien que ceci soit étroitement lié à nos préoccupations.

Résumé du chapitre II.2

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux travaux en psychologie du développement concernant l'imitation chez l'enfant. Cet intérêt n'est pas fortuit. Il est couramment admis que l'ontogenèse d'une espèce (le développement des individus de cette espèce depuis l'embryon jusqu'à l'âge adulte) porte en elle des indices sur la phylogenèse (forme de l'arbre de l'évolution). Ainsi, les études en psychologie du développement sont à même de nous donner des indices importants sur la source des spécificités de la cognition humaine, celles-ci pouvant s'avérer n'être que les conséquences d'adaptations plus profondes.

Dans l'état actuel des connaissances en psychologie, l'imitation est déjà présente chez le nouveau-né sous une forme très élémentaire, son caractère se développant dans une large mesure pendant toute la période de l'enfance en devenant moins automatique et plus délibéré. Le caractère graduel du développement de l'imitation est inévitable. En effet, un acte d'imitation présuppose une représentation préalable, même partielle, de ce qui est imité, qui doit être sélectionné parmi la multitude d'éléments perçus. Le développement de l'imitation est donc assujéti à un processus de complexification des représentations. L'imitation, telle qu'elle nous apparaît chez l'adulte, est donc le résultat d'une complexification progressive des actes d'imitation et des représentations qui les sous-tendent.

Parmi les processus avancés pour rendre compte de cette complexification, certains psychologues ont proposé l'imitation elle-même comme source de la production de représentations par un processus de *re-présentation* et d'internalisation. Ceci est rendu possible grâce à des capacités réflexives permettant de transformer de manière interne les représentations par un processus d'appropriations et de distanciations successives. Cette théorie est corroborée par une série d'expériences traçant un lien direct entre le développement des capacités réflexives et méta-cognitives chez l'enfant, et celui de ses capacités à raisonner dans des contextes sociaux ou non sociaux.

Enfin, nous avons vu que cette approche de l'imitation était susceptible d'apporter des éléments au débat entre théorie de la simulation et théorie de la théorie en proposant des modalités de transition de l'une à l'autre.

II.3 La réflexivité dans la cognition humaine

La complexification de l'imitation différée au cours du développement, qui indique une complexification des représentations associées, nous suggère qu'une compréhension de la spécificité de l'imitation humaine, et de son rôle dans le développement, passe nécessairement par une théorisation de la manière dont les représentations sont construites, puis redéfinies de manière dynamique en fonction à la fois d'un apprentissage individuel, qui peut dans certains cas se faire mentalement, sans référence au monde extérieur, et d'un apprentissage en situations d'interactions sociales. Nous venons de voir comment certains chercheurs ont pu élaborer des théories établissant un lien entre réflexivité et imitation à travers une théorie de la représentation. Avec la méta-cognition, que nous avons abordée dans la section II.1.A, la réflexivité est une des propriétés régulièrement associées à la cognition humaine. L'étude du rôle de la réflexivité dans la cognition humaine est un sujet très vaste qui dépasse largement le cadre de cet ouvrage. Ce court chapitre est destiné à donner un aperçu, nécessairement partiel et incomplet, de quelques travaux sur le sujet.

Les processus réflexifs sont souvent définis par les psychologues comme des processus au cours desquels des éléments déjà présents dans l'ensemble des capacités d'un individu à appréhender ou à interagir avec le monde, sont modifiés par la pensée (voir par exemple Mounoud 1995*, Piaget⁴⁷ 1967/1971). Une autre approche, similaire, considère la réflexivité comme la capacité d'un individu à réfléchir sur ses propres représentations, c'est à dire à effectuer une distanciation à partir de certaines de ses connaissances en prenant une partie de ses connaissances comme contenu d'une activité de connaissance (Zelazo 2003*, Zelazo et al. 1996*). En nous plaçant dans une perspective non dualiste de la relation corps/esprit, les processus réflexifs que nous venons de mentionner peuvent donc être vus comme des processus visant à la modification des structures cognitives à partir de représentations existantes, ces représentations étant elles-mêmes modifiables à plus ou moins long terme en tant qu'éléments de ces structures cognitives. Les processus cognitifs réflexifs sont donc des processus pour lesquels les représentations peuvent jouer à la fois les rôles d'objet et d'outil, sans que ceux-ci se confondent.

⁴⁷ Piaget, J. (1967). *Biologie et connaissance*. Paris: Gallimard. [Translation: *Biology and knowledge: An essay on the relations between organic regulations and cognitive processes* (B. Walsh, Trans.), Chicago, London: University of Chicago Press, 1971]

II.3.A Les processus de représentation et redescription

L'effet des processus réflexifs est de continuellement réarranger les structures cognitives afin de construire des représentations de plus en plus abstraites et de plus en plus flexibles. Cette capacité d'auto-modification à partir d'éléments internes est pour Karmiloff-Smith (1992, 1994*) la marque de la cognition humaine :

My claim is that specifically human way to gain knowledge is for the mind to exploit internally the information it has already stored (both innate and acquired), by redescribing its representations or, more precisely, by iteratively re-presenting in different representational formats what its internal representations represent⁴⁸.

Ainsi, Karmiloff-Smith distingue quatre niveaux de connaissance et de compréhension dont il n'est nécessaire ici de distinguer que deux grandes catégories. La première est la forme de connaissance que les humains partagent avec les autres animaux, bien que chaque espèce ait sans aucun doute sa propre version. Cette connaissance est implicite et procédurale. Elle est initialement élaborée à partir de caractères innés, puis se développe sur des données externes pour s'adapter au mieux à l'environnement dans des domaines particuliers. Par exemple, l'apprentissage d'un morceau de piano peut dans un premier temps être constitué de la mémorisation d'un acte sensorimoteur pur, qui englobe la performance comme un tout indivisible. À ce stade, le musicien n'a pas accès aux détails de la pièce et ne peut par exemple pas reprendre le morceau au milieu après une interruption. La connaissance est à ce stade purement procédurale.

La deuxième forme de connaissance dérive de la redescription des connaissances au niveau procédural et aboutit à une connaissance explicite et consciente qui peut également être accessible verbalement. Par exemple, une fois un morceau maîtrisé du point de vue de l'exécution mécanique, le musicien peut s'intéresser à produire des nuances dans le jeu, étudier l'harmonie et prendre possession de manière plus fine des différentes parties du morceau. Ainsi, après avoir acquis une certaine maîtrise de la tâche sur laquelle porte la connaissance, une personne peut commencer à réfléchir sur les raisons de cette maîtrise et isoler les éléments sur lesquels la connaissance peut être approfondie. Le point défendu par l'auteur est que ce processus de réécriture, qui émerge d'une activité réflexive fondée sur l'observation de soi, constitue précisément le processus que nous appelons pensée.

⁴⁸ « Je soutiens qu'une des manières spécifiquement humaines d'accroître ses connaissances est pour le cerveau d'exploiter de manière interne l'information qu'il a déjà stockée (de manière innée ou de manière acquise), par un processus de redescription de ces représentations ou, plus précisément, en re-présentant sous différents formats de manière itérée ce que ces représentations internes représentent. » Karmiloff-Smith 1992&1994*.

Le résultat de ce processus est la construction d'un système cognitif qui devient de plus en plus efficace et abstrait à mesure que se déroule l'ontogenèse.

The process of representational redescription is posited to occur spontaneously as part of an internal drive towards the creation of intra-domain and inter-domain relationship. Although I stress the endogenous nature of representational redescription, clearly the process may at times be triggered by external influences.⁴⁹

Ce processus est facilité par l'acquisition du langage qui permet à l'enfant d'internaliser le discours que les adultes portent sur lui, et de l'utiliser ensuite lors d'un processus réflexif d'autorégulation, s'observant lui-mêmes comme une entité extérieure dans une sorte de méta-dialogue.

L'approche de Karmiloff-Smith, tout comme l'approche de Zelazo, sont caractéristiques d'un courant de la psychologie du développement qui se positionne entre un constructivisme à la Piaget, pour lequel tout est développement à l'exception de structures innées inter-domaines, et le nativisme, pour lequel tout est inné, thèse reprise ces dernières années par la théorie modulaire de Fodor et la théorie de Chomsky. D'autres théories se sont ainsi inscrites entre ces deux courants extrêmes, se différenciant par le statut qu'elles donnent aux différents types de connaissance, et plus particulièrement, sur l'articulation qu'elles font entre connaissance de soi et les autres types de connaissance.

II.3.B Connaissance directe et connaissance réflexive

Un autre exemple de ce type d'approche est la position du psychologue Pierre Mounoud (cf. Mounoud 1995*), qui propose une théorie du développement consistant en une alternance de connaissance directe et de connaissance réflexive. Celui-ci qualifie la connaissance de directe lorsque celle-ci est adaptée à une certaine dimension de l'environnement ou lorsque les structures de connaissance sont adaptées aux catégories de problèmes rencontrés. Lorsque la connaissance est directe (ou lorsque les processus sont automatisés) le sujet n'a pas besoin de penser ou de réfléchir avant d'agir. Il y a un couplage direct entre le sujet et son environnement. En revanche, lorsque le sujet est confronté à un problème nouveau, celui-ci se

⁴⁹ « L'hypothèse est que ce processus de redescription des représentations se produit spontanément au sein d'une dynamique interne de création de relations inter et un intra-domaines. Bien qu'il faille souligner le caractère endogène de cette redescription des représentations, ce processus peut bien évidemment de temps à autre être orienté par des influences externes. », Karmiloff-Smith 1992/1994.

trouve dans un état de déséquilibre. Il doit alors modifier ses structures ou ses réseaux (au sens neurologique du terme) pour en élaborer de nouveaux :

During the elaboration of new structures to the new category of problems (or to similar problems but processed by new structures) subjects are in a state of disequilibrium. In humans these phases of disequilibrium manifest themselves by searching behaviors or exploratory activities which are associated with (what is usually called) "thought", "reflection", "explicitation processes" as well as by various states of consciousness and intentionality. The relationship between subject and environment becomes (in a certain way) "undirect" or "mediated". In these cases I will suggest to qualify knowledge as reflexive. From my point of view reflexive knowledge is a transitory phenomenon. It is necessary as long as the subject is elaborating new structures or networks⁵⁰.

Ainsi, Mounoud, tout comme Karmiloff-Smith, place l'activité de connaissance réflexive au centre de l'élaboration du système de connaissance. Alors que Karmiloff-Smith 1992 se concentre sur les processus d'explicitation des représentations, tout en reconnaissant l'importance du mouvement contraire de « procéduralisation » voire de « modularisation », Mounoud insiste sur la transformation continue d'un savoir-faire (éventuellement inconscient) en un savoir-faire plus complexe au cours de phases de réorganisation réflexive pendant lesquelles le savoir-faire initial est explicité et manipulé. Ce savoir-faire plus complexe peut alors lui-même redevenir non explicite.

Dans les deux cas, nous voyons que la réflexivité est le moteur d'une complexification croissante des représentations ou des savoirs-faire manipulés par les individus au cours de leur développement.

⁵⁰ "Durant l'élaboration de nouvelles structures concernant de nouvelles catégories de problèmes (ou concernant des problèmes similaires mais traités par de nouvelles structures) le sujet est dans un état de déséquilibre. Dans le cas des humains, ces phases de déséquilibre se manifestent par des comportements de recherche ou des activités d'exploration qui sont associées avec (ce que l'on appelle usuellement) « pensée », « réflexion », « processus d'explicitation », tout comme divers degrés de conscience et d'intentionnalité. La relation entre le sujet et son environnement devient alors (d'une certaine manière) « indirecte » ou « médiatisée ». Dans ces cas-là, je suggérerais de qualifier cette connaissance de réflexive. De mon point de vue, la connaissance réflexive est un phénomène transitoire. Elle est nécessaire aussi longtemps que le sujet élabore de nouvelles structures ou de nouveaux réseaux. », Mounoud, 1995.

II.3.C L'auto-régulation hiérarchique des signes

Nous terminerons ce chapitre en mentionnant les travaux du psychologue Jaan Valsiner qui a souligné l'importance d'un système de représentations hiérarchique dans l'autorégulation de la pensée humaine (Valsiner 2004*) à travers ce qu'il appelle une médiation sémiotique. Selon lui, l'esprit humain est régulé par une hiérarchie dynamique de signes de types de plus en plus abstraits, qui se contraignent mutuellement et qui sont le résultat de processus d'abstraction (hiérarchie ascendante) et de contextualisation (hiérarchie descendante) à partir des représentations existantes. Ces structures permettent ainsi à l'individu de réguler ses relations avec son environnement immédiat en donnant du sens aux actions qu'il effectue dans l'environnement, ainsi qu'à celles qui, de façon interne, changent son point de vue sur le monde.

The perspective outlined here builds on the cultural-historical perspective through a focus on of semiotic autoregulation of the mind. The human mind is regulated through a dynamic hierarchy of semiotic mechanisms of increasingly generalized kind, which involves mutual constraining between levels of the hierarchy.

[...] For all human sciences, understanding of how the mind works requires a new theory that starts from the assumption of potential infinite variability of human symbolic forms. These forms are socially constructed by the person who moves through an endless variety of unique encounters with the world.

L'auteur reste cependant assez flou sur la manière dont les différents niveaux s'articulent et se contraignent mutuellement car il ne précise pas la manière dont un signe peut influencer un autre signe⁵¹. Un des points importants de son approche est cependant que *l'invariant* dans la structure cognitive qu'il envisage n'est pas un signe particulier ou un contenu particulier, mais le type de relations qu'entretiennent les différents niveaux entre eux et la manière dont ils peuvent se modifier (ce qui rejoint parfaitement les approches des différents psychologues que nous venons de citer). Ainsi, c'est la structure globale des représentations qui s'auto-modifie au fil des interactions avec l'environnement, induisant un changement constant de l'identité de l'individu : « *The maker becomes the made and moves on to be the maker for the something new.* »

⁵¹ Au cours du séminaire « Formes symboliques » à l'ENS, je lui ai fait remarquer que la plupart de ses exemples de hiérarchies de signes étaient en fait des exemples de hiérarchies de règles, ce qu'il a volontiers admis.

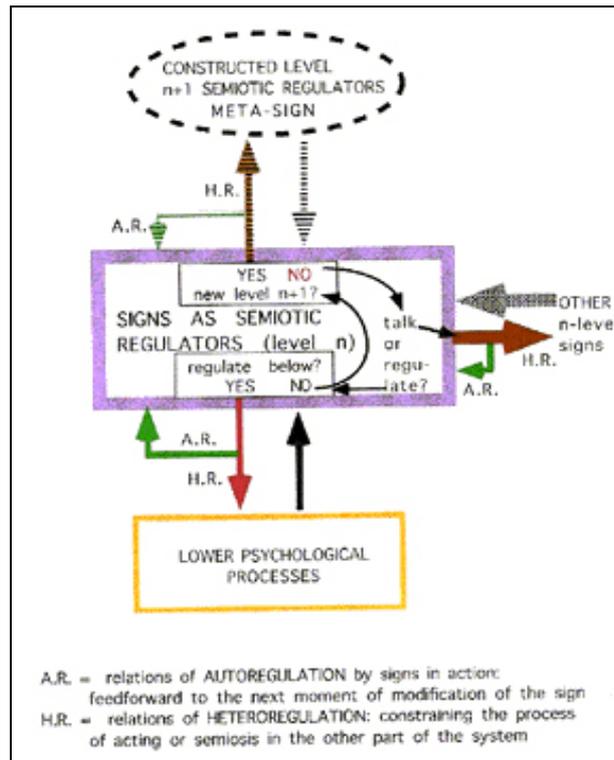


Figure 22 : Eléments d'un système sémiotique auto-régulé selon Jaan Valsiner (2004*).

Résumé du chapitre II.3

Ce court chapitre est destiné à donner un aperçu de travaux actuels en psychologie qui mettent l'accent sur l'importance de la réflexivité dans la cognition humaine. Le point commun de toutes ces approches est d'insister sur la nécessité d'une réorganisation dynamique et constante du système des représentations qui se fait par l'intermédiaire d'une distanciation réflexive par rapport aux représentations manipulées.

En nous plaçant dans une perspective non dualiste de la relation corps/esprit, les processus réflexifs peuvent alors être vus comme des processus visant à la modification des structures cognitives, à partir de représentations existantes, ces représentations faisant elles-mêmes partie des structures cognitives, et donc éventuellement modifiables à plus ou moins long terme. La réflexivité peut alors être définie comme la capacité à prendre comme objet de traitement cognitif, les processus cognitifs eux-mêmes.

De ce point de vue, l'invariant dans une structure cognitive n'est pas une représentation particulière ou un contenu particulier, mais le type de relation qu'entretient, par l'intermédiaire de la réflexivité, les représentations aux différents niveaux méta-cognitifs.

II.4. Entre Métacognition et Réflexivité

Nous avons tenté dans cette partie de donner un aperçu de certaines avancées en éthologie et en psychologie posant la question de la spécificité de la cognition humaine. Loin de donner un point de vue exhaustif sur le sujet ou d'y apporter une contribution théorique, l'objectif était d'évoquer quelques thèmes généraux de réflexion sur ce vaste thème et de proposer quelques entrées bibliographiques concernant cette question.

Les deux thèmes que nous avons dégagés sont l'importance de la méta-cognition (capacité à raisonner sur des représentations structurées de manière hiérarchique) et la réflexivité (capacité de modifier ces structures et de créer de nouvelles représentations). Comme en témoignent plusieurs approches en psychologie, le rôle de la réflexivité est essentiel chez l'enfant comme chez l'adulte, autant dans la création de nouvelles représentations que dans l'organisation de ces représentations au sein d'une structure hiérarchique. En particulier, en ce qui concerne la pensée symbolique, la réflexivité nous permet de modifier dynamiquement la structure hiérarchique des systèmes de règles et métarègles que nous utilisons pour résoudre des problèmes. Une métarègle peut alors être interprétée comme un cadre local de référence, qui fixe le niveau d'abstraction auquel s'effectue un raisonnement, comme cela a été illustré au *II.2.B.b*.

De manière générale, si nous définissons la réflexivité comme le fait de pouvoir prendre comme objet de traitement cognitif, les traitements cognitifs eux-mêmes, il est possible d'envisager la réflexivité comme un principe à la fois d'élaboration des représentations, et de leur organisation en des structures cognitives de plus en plus complexes.

Au niveau le plus bas de traitement cognitif, la réflexivité nous permettrait de détourner une partie de nos perceptions immédiates afin de les remplacer par des percepts mémorisés ou imaginés et d'appréhender sous forme sensationnelle les situations dont nous sommes témoins ou que nous imaginons. Ainsi, les facultés naturelles (ou qui le sont devenues) pour l'empathie peuvent être généralisées en simulant l'état que l'on aurait dans telle ou telle situation (ce qui implique de remplacer une partie des perceptions courantes par des perceptions fictives), et en l'évaluant à travers les sensations éprouvées dans cet état provoqué. Cette approche du 'faire-semblant' est notamment une des deux grandes théories dans l'étude des capacités humaines de mentalisation, et a été appelée « théorie de la simulation ». Elle est par ailleurs appuyée par un certain nombre d'études en neurologie qui

mettent en évidence la capacité du cerveau à simuler des états déterminés⁵². Par exemple, avant de choisir un cadeau pour quelqu'un, vous pouvez essayer d'éprouver le plaisir que vous auriez à le recevoir et choisir en conséquence. Cette utilisation de la réflexivité peut nous permettre de comprendre les états mentaux des autres, d'anticiper leurs réactions ou de planifier nos propres actions en simulant l'état que provoqueraient en nous leurs conséquences.

Mais à mesure que nous apprenons à utiliser nos représentations, elles deviennent également manipulables en tant qu'objets cognitifs à part entière et peuvent être agencées dans des structures hiérarchiques. Par exemple, il se peut que le destinataire du cadeau soit d'une autre génération, un jeune enfant par exemple. Nous sommes alors capables de raisonner sur ce qui pourrait faire plaisir à cette personne à partir de connaissances sur les goûts de cette tranche d'âge. La réflexivité sert alors à fixer un cadre de référence pour le raisonnement en limitant l'espace des possibles à un sous-ensemble pertinent. Dans des cas plus complexes, elle créera de manière dynamique une hiérarchie de cadres de références pour la prise de décision qui nous permettra de faire des détours pour atteindre nos fins. Elle est, en ce sens le processus qui nous permet de nous impliquer de manière flexible dans des tâches méta-cognitives, alors que pour les autres animaux, la méta-cognition, lorsqu'elle existe, semble intervenir de manière rigide dans des tâches spécifiques.

⁵² Antonio Damasio en propose une interprétation en termes neurologiques dans « l'erreur de Descartes », (p 253, 1995), à propos de sa théorie des marques somatiques : « [...] il n'y a pas qu'un seul mécanisme sous-tendant le phénomène des marqueurs somatiques, mais deux. Dans le cadre du mécanisme fondamental, le cortex frontal et l'amygdale déterminent un profil particulier de l'état du corps, lequel engendre à son tour des signaux qui sont acheminés jusqu'au cortex somatosensoriel, pour passer ensuite dans le champ de l'attention et de la conscience. Dans le cadre du mécanisme alternatif, le corps est court-circuité et le cortex préfrontal et l'amygdale ne font que pousser le cortex somatosensoriel à reproduire les types d'activités neuronales qu'il aurait eues, si le corps avait été placé dans un état déterminé et s'il avait envoyé les signaux correspondants. Le cortex somatosensoriel fonctionne comme s'il recevait les signaux relatifs à un certain état du corps, et bien que cette activité de simulation ne soit sans doute pas exactement la même que l'activité qui serait engendrée par un état du corps réel, elle peut néanmoins être prise en compte dans le mécanisme de prise de décision.

Les mécanismes de simulation sont mis en place au cours du développement. Lors des processus d'«ajustement» à la société, que nous avons subis durant la petite enfance et l'enfance, il est probable que la plupart de nos prises de décision ont été façonnées par des états somatiques liés à des punitions et à des récompenses. Mais à mesure que nous avons grandi, et que nous avons pu classer les situations se répétant dans des catégories, nous avons eu de moins en moins besoin de nous fonder sur des états somatiques réels pour chaque cas de prise de décision (ce qui a représenté une certaine économie). Autrement dit les processus de prise de décisions ont commencé à dépendre en partie des « mécanismes de simulations » des états somatiques. Une importante question pratique est de savoir dans quelle mesure, à l'âge adulte, nous recourons aux mécanismes de simulation plutôt qu'aux mécanismes reposant sur les états du corps réel. Je crois que cela varie d'une personne à l'autre, et d'un problème à l'autre. Le recours au mécanisme de simulation peut être avantageux ou nuisible, selon les sujets et les circonstances. »

* *
*
*

En ce qui concerne l'imitation nous pouvons imaginer que la réflexivité et la méta-cognition interviennent à deux niveaux. Du fait de la structure hiérarchique du système de représentations, qui est appréhendée comme telle par les individus aussi bien de manière interne que dans leur vision des autres, l'imitation peut opérer sélectivement à différents niveaux de cette hiérarchie. Ainsi, nous pouvons adopter les intentions de quelqu'un sans nécessairement avoir recours aux mêmes actions pour les satisfaire ; ou adopter les buts ou les procédures d'une personne comme moyens pour arriver à des fins autres. D'un autre côté, dans le cas de l'imitation d'une action complexe, il devient possible de la décomposer en divers éléments, et de les copier sélectivement en fonction du poids qu'on leur accorde dans la réussite du modèle à effectuer cette action. C'est en effet ce que suggèrent des études neurologiques sur l'imitation (Chaminade et al. 2002*)

Deuxième phénomène important, conséquence de nos capacités réflexives, l'acte d'imitation lui-même est un processus susceptible d'être représenté, devenant ainsi sujet à modifications. Puisque le sujet réflexif se voit en train d'imiter, rien ne s'oppose à ce que cet acte d'imitation soit lui-même un objet de réflexion. Nous verrons dans la partie suivante que cela est fondamental dans la formalisation des processus d'imitation et que cela a des conséquences majeures sur la nature des dynamiques mimétiques.

PARTIE III

Les systèmes métamimétiques

Non mais vraiment, si un beau jour on trouvait, pour de bon, la formule de tous nos caprices et vœux, je veux dire ce dont ils dépendent, selon quelles lois ils prennent naissance, comment au juste ils se propagent, vers quoi ils tendent, dans tel ou tel cas, etc., etc. c'est-à-dire une véritable formule mathématique, mais alors, dans ce cas, ma foi... L'homme cesserait probablement aussitôt de penser, ou même, ma foi... Cesserait certainement de penser. Voyons, quel plaisir y a-t-il à vouloir conformément à une table de calcul?

Notes d'un souterrain, Dostoïevski

Introduction

La cybernétique de second ordre et le paradoxe de l'auto-organisation

Nous abordons maintenant ce qui constitue l'apport scientifique propre de cette thèse. Dans tout ce qui va suivre, nous allons tenter de donner une image aussi précise que possible de ce que pourrait être une théorie formalisée des phénomènes mimétiques au sein des systèmes sociaux, qui inclurait les spécificités de la cognition humaine explicitées dans la partie précédente.

Pour ce faire, nous allons construire une approche qui sera à la fois ascendante (*bottom-up*), de l'individu vers le collectif, et descendante (*top-down*), du collectif vers les individus. Ainsi nous nous intéresserons aux phénomènes émergents et aux phénomènes d'auto-organisation qui pourraient être caractéristiques des systèmes sociaux humains, et à la rétroaction possible des phénomènes émergents sur les comportements individuels. Cette approche a été appelée *individualisme méthodologique complexe*, et nous pouvons tenter de la résumer en une phrase volontairement circulaire : les éléments et le tout sont les parties d'un ensemble qui ne peut être compris que comme un tout. Elle est l'héritière de ce que l'on a appelé « la seconde cybernétique ».

Le terme cybernétique a été introduit dans son sens actuel par Norbert Wiener dans son ouvrage *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* (1948), à propos du courant de pensée qui a vu le jour au cours des années 1940. Sa définition générale est « l'étude des systèmes considérés sous l'angle de la commande et de la communication ». C'est notamment le courant de pensée au sein duquel s'est développée toute la théorie de la programmation et de l'informatique en général, qui a débouché sur les sciences cognitives et l'intelligence artificielle. Mais dès les années 1960, certains scientifiques ont appelé à une « cybernétique du second ordre », «*réflexive, une cybernétique de l'observateur et non plus seulement de l'observé*⁵³ ». Le but était alors d'étudier des systèmes s'auto-contrôlant, s'auto-organisant, qu'il n'est pas possible de comprendre sans en saisir la logique interne ; des systèmes qui évoluent par eux-mêmes et pour eux-mêmes. Les exemples prototypiques de tels systèmes sont la cellule, le cerveau et enfin, les systèmes sociaux.

⁵³ Jean-Pierre Dupuy, session d'ouverture du colloque de Cerisy « *L'auto-organisation, de la physique au politique* », Seuil, 1983.

Mais ces théories de l'auto-organisation se sont vite heurtées au problème de la causalité circulaire que leur définition implique. En effet, l'auto-organisation doit nécessairement reposer sur une règle d'organisation, qui, si l'auto-organisation est véritable, doit être le produit du système lui-même, ceci amenant la question de méta-organisation (Ashby 1962*, voir l'encart n°8) ou de la métarègle (Hofstadter 1979). Nous voyons donc que la problématique que nous avons soulevée dans la première partie de cette thèse, concernant l'origine et la nature de la règle de dernier niveau dans un modèle formel, est en fait l'héritière de cette problématique bien plus générale sur l'origine de l'auto-organisation, si nous envisageons les systèmes économiques et sociaux sous l'angle de l'auto-organisation.

Deux approches ont été proposées pour contourner l'argument d'Ashby. La première, développée par Henri Atlan, propose que le changement d'organisation puisse se produire non pas sous l'effet d'une méta-loi qui régirait le changement de façon constante et prévue à l'avance, mais sous l'effet de perturbations aléatoires (Atlan 1983). Ainsi, Henri Atlan propose que la propriété fondamentale des systèmes auto-organisés soit de pouvoir se structurer et se complexifier sous l'effet du bruit. La deuxième approche, développée par Francisco Varela, est celle des *systèmes autonomes*, dont la propriété est d'être opérationnellement clos : les effets du réseau de processus dynamiques qui les définit se manifestent dans ce même réseau. Varela contraste cette approche avec le point de vue traditionnel de la commande (*control*) adopté par Ashby, pour lequel la dynamique du système est commandée de l'extérieur, à travers les entrées du système (*inputs*).

C'est sur le fond de ces deux approches que notre proposition fera sens. C'est la raison pour laquelle nous allons maintenant présenter le point de vue de Francisco Varela sur cette question, exposé synthétiquement au cours d'un colloque de Cerisy sur l'auto-organisation (1981) qui a marqué une étape importante de la réflexion dans ce domaine.

L'impossibilité d'une auto-organisation forte

Dans son article historique de 1962, *Principles of the Self-Organizing System*, Ross Ashby pose de sérieuses limites à la théorie des systèmes auto-organisés dans le cadre de la cybernétique : il n'y a pas de machine capable de s'auto-organiser. Avant d'exposer l'argument d'Ashby, précisons ce qu'il entend par « machine » et par « auto-organiser ». Ashby définit une « machine » comme un système tel que son état interne et son environnement définissent de manière *unique* ce que son prochain état interne sera. Ainsi, une machine peut être définie par un ensemble d'états internes S , un ensemble d'inputs I ou d'états de l'environnement, et une fonction $f: I \times S \rightarrow S$. L'organisation d'une machine est alors précisément la donnée de cette fonction f . Ashby distingue deux sens possibles du mot auto-organisation. Le premier, que nous désignerons par « fort », est la capacité pour une machine de changer f , le deuxième, « faible », exprime les capacités pour des systèmes initialement indépendants de créer entre eux des liens qui les rendront inter-dépendants, et les feront fonctionner comme un tout. C'est de ce sens fort dont parle Ashby dans sa conjecture d'impossibilité. Venons en maintenant aux arguments proprement dits.

Selon Ashby, cela n'a pas de sens de dire que f est une fonction de l'état du système. L'exemple qu'il prend pour illustrer cette idée est celui des lois de la gravitation de Newton, qui postulent que la force varie comme l'inverse de la distance au carré : $F = M_1 M_2 / d^2$. Proposer $F = M_1 M_2 / d^3$ serait une loi différente. Mais supposons que la loi, et non la force, change avec la distance, de telle sorte que l'exposant ne soit plus 2 mais une certaine fonction de la distance $\varphi(d)$. Cette suggestion est illogique, puisqu'à ce moment-là nous aurions $F = M_1 M_2 / d^{\varphi(d)}$, ce qui ne représente pas une loi changeant avec la distance, mais une loi couvrant *toutes* les distances. Dans ce cas, la loi a tout simplement été re-définie. En toute généralité, si la fonction d'organisation f d'une machine devait être une fonction des états S du système, nous aurions à re-définir notre machine.

Ainsi, supposons que le point de départ est un système défini par un ensemble d'états S et une fonction d'organisation f , et que cette fonction doit être changée pour une autre fonction g . Cela veut dire qu'il y a une variable $\gamma(t)$, fonction du temps, telle que sa première valeur est f , et l'une de ses valeurs ultérieures est g . La *cause* de ce changement ne peut être dans l'ensemble des états S , elle doit donc venir de l'extérieur du système, agissant sur le système S comme un input. Si le système peut être vu dans un certain sens comme « auto-organisé », ce n'est qu'à condition d'élargir « l'auto » à un ensemble plus vaste qui inclut la variable γ , la cause du changement de S devant être dans $(S + \gamma)$. L'apparence d'être « auto-organisée » ne peut donc être réalisée qu'en couplant la machine S avec une autre machine en laquelle réside la cause de son changement.

Référence : W. Ross Ashby, "Principles of the Self-Organizing System" p 255-278; dans Heinz Von Foster & H. Zopf (eds), *Principles of Self-Organization*, New-York Pergamon 1962*

Le couplage par *input*, le couplage par *clôture*

Dans son article « *L'auto-organisation : de l'apparence au mécanisme* » (1983), Francisco Varela propose de donner une idée de ce que pourrait être le couplage entre un système et le monde extérieur, de telle sorte que ce couplage ne soit pas un déterminant du système, mais définisse une relation assez souple pour que l'on puisse parler d'indépendance relative entre les événements propres au système et ceux qui appartiennent à son environnement. C'est ce que Varela appelle *couplage ponctuel*.

La théorie des systèmes fournit un paradigme du couplage ponctuel : une entrée (*input*) transforme la dynamique des états d'un système Σ . Cela peut se décrire formellement de la manière suivante. Soit I l'espace des inputs permis, S l'espace des états du système Σ , et une dynamique f , qui donne le prochain état du système étant donné son état actuel et l'input. Dans le cas d'une dynamique en temps discret, nous pouvons alors écrire (nous reprenons les notations de Varela) :

$$f: I \times S \rightarrow S$$
$$(i, s_t) \rightarrow s_{t+1}$$

L'idée de couplage ponctuel est ici clairement apparente dans le sens où l'ensemble des inputs est prédéterminé par la fonction de transition f , tout comme leur mode d'action spécifique sur S . Le degré d'indépendance du système s'exprime par ailleurs par le fait que la fonction dépend également des états internes du système.

C'est à partir de cette définition que Varela propose, en première approche, une notion d'autonomie caractérisée par le fait qu'il n'est pas possible de donner une description en termes de couplage par input, au sens où « *les points de contact* » entre l'unité et ce qui n'est pas elle, serviraient de fil conducteur pour comprendre l'évolution de la dynamique du système. « *Lorsqu'il est question de systèmes autonomes, c'est l'inverse qui est vrai : les transformations internes sont le fil conducteur qui nous permet de comprendre la dynamique du système, les points de couplage n'interviennent que dans la mesure où certains événements imprévus ou circonstances nous aident à mieux comprendre tel ou tel chemin particulier de transformations* ». C'est à partir de cette remarque que Varela propose de voir les points de couplage comme « *des agents de perturbations, plutôt que comme des inputs* ».

La différence entre ces deux visions est qu'un input spécifie la seule façon dont une transformation d'un état donné du système peut avoir lieu, alors que la perturbation ne spécifie pas le système, elle ne prend en compte que son effet sur la structure de celui-ci. C'est

ce qu'il appelle « *couplage par clôture* ». Ainsi, Varela précise cette idée en proposant de voir la dynamique interne sans considérer d'inputs :

$$f : S \rightarrow S$$

$$s_t \rightarrow s_{t+1}$$

le système fonctionnant sur ce mode de façon continue jusqu'à ce qu'intervienne une perturbation ayant pour effet de déplacer l'état du système *et* la dynamique interne vers une nouvelle configuration :

$$f + \delta f : S \rightarrow S$$

$$s_t + \delta s_t \rightarrow s_{t+1}$$

Ici, « *les perturbations permises sont définies par la structure du système, en ce qu'elles peuvent être n'importe quoi qui conduise à une transformation d'état et/ou de dynamique* ».

Ainsi, nous pouvons définir l'autonomie par la capacité d'un système à résister à une série de perturbations tout en gardant une certaine cohérence interne. Par exemple, notre corps biologique est un tel système puisque son apparence et son fonctionnement sont conservés au cours du temps (du moins si nous ne considérons pas des échelles de temps trop grandes) malgré les multiples perturbations extérieures et transformations qu'il subit en son sein. C'est ainsi que Francisco Varela énonce ce qu'il présente comme le cœur de son argumentation : « *Tout comportement auto-organisé est engendré par la diversité de la cohérence interne d'un système opérationnellement clos.* »

La grande différence entre ces deux approches, couplage par input et couplage par clôture, est que dans le premier cas, ce sont des éléments extérieurs aux systèmes, évoluant dans un espace prédéfini, qui déterminent les changements qualitatifs possibles de la dynamique du système ; dans le deuxième cas, le fonctionnement normal du système est déterminé de manière interne, et c'est la *structure* du système qui peut être modifiée par une perturbation, dans n'importe quelle direction possible dans la limite des contraintes physiques du système.

Dans cette partie, nous allons développer l'idée qu'il est possible de concevoir des collectifs d'entités en interaction tels que, selon que l'on se place au niveau des entités ou du collectif, les dynamiques pertinentes prennent deux aspects distincts, la première se plaçant entre le couplage par input et le couplage par clôture, la deuxième appartenant à une catégorie très particulière de couplage par clôture. Le collectif d'entités pourra alors être vu comme un système auto-organisé au sens « fort » du terme.

Soit S un système, I l'ensemble des espaces possibles d'inputs (compatibles avec la physique de l'environnement) et Φ l'espace des dynamiques possibles sur S (i.e. l'ensemble des fonctions possibles $f: I_f \times S \rightarrow S$ avec $I_f \in I$), nous voudrions définir, moyennant un invariant que nous préciserons, les deux types de dynamique suivants :

Dynamique 1. : Point de vue de l'individu⁵⁴

$$\Phi \times I_f \times S \rightarrow \Phi \times S$$

$$(f, i_t, s_t) \rightarrow (g, s_{t+1}), i_t \in I_f$$

ce qui veut dire que la transition suivante sera du type :

$$\Phi \times I_g \times S \rightarrow \Phi \times S$$

$$(g, j_{t+1}, s_{t+1}) \rightarrow (h, s_{t+2}), j_{t+1} \in I_g$$

Cette dynamique diffère du couplage par input de deux manières. Premièrement, la forme fonctionnelle de la dynamique globale peut changer, le système peut passer *spontanément* et de manière discontinue, d'une dynamique déterminée par une fonction f , à une dynamique déterminée par une fonction g , *sans* l'effet d'une perturbation. Bien sûr, si l'espace des dynamiques possibles est petit, on pourra toujours objecter que cela est équivalent à dire que f et g sont en fait les composantes d'une super fonction qui serait la réelle dynamique du système. Cependant, si l'espace des dynamiques possibles est très grand, voire même ouvert, cette conception ne sera plus possible car cela serait doter le système d'une information quasi-infinie.

Deuxièmement, et c'est une conséquence du premier, l'espace des inputs peut être amené à changer. Cela veut dire qu'il y a des choses qui étaient pertinentes pour le système avant la transition et qui ne le sont plus après, et vice versa. Encore une fois, si l'espace I des espaces d'inputs possibles est limité, il sera toujours possible de dire que le système ne fait qu'ouvrir et fermer certaines entrées au cours d'une transition. En revanche si l'espace I est très grand, comme c'est le cas dans le monde réel, nous ne pourrons plus considérer que les inputs préexistent car cela supposerait que le système contienne une information quasiment infinie. Ainsi, l'idée est ici qu'un système peut construire au cours

⁵⁴ Nous donnerons une formulation plus rigoureuse de ces dynamiques en III.1.C.f.

de son évolution ses propres définitions d'entrées pertinentes (ce qui reste très proche de la conception de l'énaction* que propose Varela).

Cette dynamique diffère du couplage par clôture par le fait que les inputs sont ici bien apparents, et nous verrons qu'ils jouent un rôle déterminant dans la transition du système.

Dynamique 2) : Point de vue du collectif

$$\Phi \times S \rightarrow \Phi \times S$$

$$(f, s_t) \rightarrow (g, s_{t+1}) \text{ avec } f \subset s_t \text{ et } g \subset s_{t+1}$$

Cette dynamique est différente du couplage par input par l'absence d'inputs. Elle est un cas très particulier de couplage par clôture puisque la dynamique du système fait partie de la description de l'état du système : la dynamique du système peut changer sans l'effet de perturbations extérieures. Nous verrons au III.3.C.c.v comment nous pouvons envisager des catégories très distinctes de perturbations pour ce type de dynamique.

* L'énaction : action d'un processus historique qui fait émerger des régularités sans contrainte de finalité arrêtée (Varela 1988)

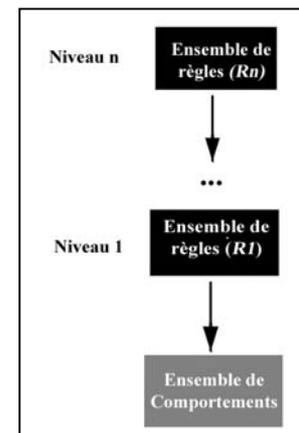
III.1 Une approche formelle des systèmes mimétiques

III.1.A. Être sa propre métarègle

La solution du problème que tu vois dans la vie, c'est une manière de vivre qui fasse disparaître le problème.

Wittgenstein

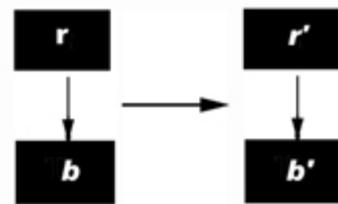
Nous avons vu dans la partie I un type d'organisation systémique assez particulier puisque les entités de ce système peuvent être décrites comme une hiérarchie de règles (voir ci-contre). La question de savoir s'il existe d'autres types d'organisation, bien que très importante, ne sera pas centrale dans notre argumentation et par ailleurs, mériterait plus d'attention que nous pouvons lui accorder ici. Nous la laissons pour de futures réflexions.



Nous limiterons ici l'étude à une certaine classe de systèmes pouvant être vus comme des collectifs de sous-systèmes, dont la dynamique procède par cascades de contrôles successifs. Dans ces sous-systèmes hiérarchisés, chaque niveau sera défini par une règle qui, étant donné l'état du système et un espace d'inputs, détermine une dynamique sur les états possibles du niveau inférieur. Par ailleurs, nous ne traiterons ici que des systèmes décrits par une chaîne unique, pour des raisons de clarté et de simplicité de l'exposé. Nous garderons seulement à l'esprit que les contenus des différents niveaux pourraient tout aussi bien être des ensembles de règles agissant les unes sur les autres.

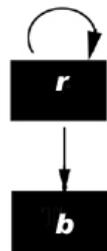
Nous désignerons sous le terme *d'agents* (niveau de l'individu) les sous-systèmes, réservant le terme d'individus aux cas où nous parlerons des systèmes sociaux réels. L'état d'un sous-système, peut être décrit par un n-uplet $s=(b,r_1, \dots r_n) \in S$, où b est un comportement ou une sortie du système et où les r_i sont les règles des différents niveaux, qui ont leurs espaces d'inputs propres. S sera l'espace des états possibles du système. Ceci étant, si nous traduisons dans ces termes la dynamique I décrite à la fin du chapitre précédent, nous voyons qu'il s'agit de formaliser une transition du type : $s=(b,r_1, \dots r_n) \rightarrow s'=(b',r'_1, \dots r'_n)$ où les éléments du deuxième n-uplet peuvent éventuellement être tous différents des éléments du premier.

Le changement d'une règle à un de niveau intermédiaire ne pose pas *a priori* de problème théorique, il peut s'effectuer sous l'action des métarègles du niveau supérieur. Nous en avons rencontré un certain nombre d'exemples dans la partie I. L'essentiel du problème est de formaliser une transition de dernier niveau. Il suffit donc pour notre réflexion de commencer par considérer des systèmes S qui n'ont qu'un niveau de règle et dont la description minimale peut s'écrire (b,r) . Notre tâche est maintenant de donner du sens à une transition de type :



(les flèches verticales indiquent la relation « agit sur »)

avec r' différente r . Étant donné que le niveau des comportements n'est qu'un argument des règles de niveau I, si la règle r a été modifiée, ce ne peut être que sous l'action de r elle-même. Ceci revient donc à essayer d'envisager un schéma du type suivant :



Mais comment imaginer que la règle r se transforme elle-même en une règle r' sans dire que r' était déjà dans la description de r ? C'est nous semble-t-il l'argument principal d'Ashby.

Pour contourner la difficulté, nous pourrions, comme Ashby, recourir à un degré de liberté encore non utilisé : les inputs de r . La question que nous aimerions poser maintenant est : peut-on donner un sens au fait de dire que r' provient des inputs de r , tout en préservant une certaine autonomie de la dynamique du niveau où se trouve r ? En gardant l'idée, contrairement à Ashby, que r est la *cause* de son propre changement.

Dire que r devient r' peut s'interpréter par le fait que notre système s est capable d'identifier dans son environnement quelque chose, r' , à laquelle il prête le même rôle que ce qu'il perçoit chez lui comme étant r , et qu'il est capable de copier et de substituer à r . Si nous

imaginons que l'environnement de notre système s est constitué d'autres systèmes du même type, le comportement que nous venons de décrire s'interprète naturellement en terme d'imitation. Ce phénomène de substitution de certaines propriétés d'un agent par celles d'un agent voisin est d'ailleurs assez proche de ce que nous avons pu voir dans la présentation du modèle de Nowak et May (cf. I.2).

Mais il n'est certainement pas suffisant de dire que nous avons affaire à un processus d'imitation. Imaginons que notre système s soit entouré de dix autres ; dire que s est mimétique ne dit absolument pas comment s va évoluer, car il reste le problème de savoir *quand* s s'engagera dans un processus d'imitation et *lequel* de ses voisins il va choisir d'imiter.

Nous ne pouvons résoudre ce problème en ajoutant un critère supplémentaire de choix, comme par exemple le fait que s choisit un modèle au hasard ou imite en fonction des fréquences. En effet, si cette règle était externe à s , nous pourrions remettre en question l'idée d'une autonomie de s . Par ailleurs, considérer un troisième niveau dans s incluant la description de cette règle est d'emblée exclu puisque (b,r) est la description minimale de notre système.

Cette fois-ci, la seule possibilité que nous ayons pour définir le choix du modèle, est de considérer que celui-ci est déterminé par r elle-même et par conséquent, que r est en fait une règle d'imitation. Ainsi, si r est amenée à changer de nature, cela sera uniquement sous sa propre impulsion et *selon ses propres critères*. En ce sens, r sera la cause de son propre changement. Il nous reste donc à montrer qu'il existe une conception de l'imitation telle que les règles d'imitation aient la possibilité d'être leur propre métarègle. Pour bien comprendre comment cela est possible, il va nous falloir préciser ce que nous appelons règle d'imitation, en tirant parti de ce que nous avons évoqué dans la partie II.

Pour conclure cette section, insistons sur le fait que *nous allons désormais limiter notre étude aux systèmes mimétiques*, dont nous allons tenter de montrer qu'ils sont une approche intéressante de certains phénomènes émergents au sein des systèmes sociaux. Ils ne correspondront néanmoins qu'à une certaine composante, qui devra être associée aux composantes déjà étudiées, telles que l'apprentissage individuel ou les autres formes d'apprentissage social, pour former une théorie générale des systèmes sociaux.

III.1.B. La méta-cognition et la réflexivité dans une définition de l'imitation

III.1.B.a. Le problème du critère d'imitation

Commençons par une définition très intuitive de l'imitation qui va nous servir d'ébauche pour une définition plus précise. Considérons deux agents, *O* (*sujet observant*) et *M* (*modèle*), impliqués dans une même activité, par exemple jouer au tennis. Supposons que *O* observe de manière récurrente que *M* est meilleur que lui, d'après l'idée qu'il se fait de cette activité. Alors *O* cherchera à en connaître la raison, et s'il en arrive à prêter le succès de *M* à un trait *T* que *O* peut s'approprier, comme par exemple suivre un régime alimentaire spécifique ou posséder un certain type de chaussures, il y a de fortes chances pour que *O* imite *M* en cherchant à acquérir cette propriété pour en éprouver les effets. Dans ce cas-là, l'intérêt de *O* pour *T* n'est pas direct, il est suscité par le fait que *M* possède ce trait, d'après le succès que *O* prête à *M* dans sa lecture personnelle des événements du monde. Nous retrouvons ainsi la structure triangulaire typique de l'imitation (Figure 23), Sujet-Modèle-Trait, largement étudiée, quoique avec une approche différente, par René Girard⁵⁵ (1961).

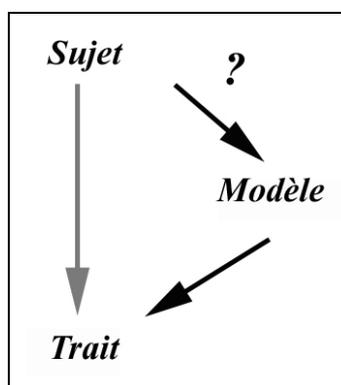


Figure 23 : Le triangle est la figure typique d'un acte d'imitation. L'intérêt d'un sujet pour un trait n'est pas direct mais indirect, il passe par l'intermédiaire d'un modèle. La question est alors : comment le sujet choisit-il son modèle ?

⁵⁵ Dans la terminologie de Girard, ce triangle est appelé Sujet-Médiateur-Objet. Nous avons préféré les termes de modèle et de trait aux termes médiateur et objet, car ce sont ceux les plus couramment utilisés par la littérature de la modélisation de l'imitation. Par ailleurs, comme nous allons le voir, la signification du terme trait ne recoupe que partiellement celle d'objet.

L'imitation procède donc en trois temps⁵⁶ :

- 1) choix d'un modèle, selon un certain critère qui appartient *au sujet*, au cours d'un acte d'observation,
- 2) sélection d'un trait qui appartient *au modèle* et dont le sujet pense qu'il participe à la satisfaction de ce critère,
- 3) tentative de la part du sujet de copier le trait.

Ces trois étapes suggèrent plusieurs caractéristiques de l'imitation. La première est que le choix du modèle n'est pas une fonction du trait particulier qui sera imité, puisque celui-ci n'est pas nécessairement connu à cette étape, mais d'un *critère général* lui permettant d'évaluer les individus, qui reflète les buts ou les intentions du sujet. De plus, le sujet ne s'engagera dans un acte d'imitation que s'il estime que le modèle est meilleur que lui sur l'une des dimensions couvertes par ce critère. Cela nécessite donc une comparaison réflexive du sujet entre le modèle et lui-même, au regard de ce critère.

La seconde caractéristique est que le sujet doit identifier certains traits chez son modèle potentiel et inférer celui ou ceux dont il pense qu'il(s) participe(nt) à son évaluation positive du modèle. Cette étape sera donc favorisée par les capacités du sujet de catégorisation et de réflexion sur ces différentes catégories. Ceci requiert en particulier des capacités méta-cognitives et réflexives.

Enfin, la troisième étape met en jeu les capacités d'apprentissage individuel du sujet à partir d'un modèle.

Les éléments de la première et seconde étape ont été largement étudiés dans la littérature en psychologie sociale et cognition sociale⁵⁷, en ce qui concerne la comparaison de performances (voir par exemple Jager 2000* Ch. 5 ou Butera & Muller 2004 pour une approche générale) ou la catégorisation et les processus d'inférence (voir par exemple l'ouvrage très complet de Fiske et Taylor 1991). La littérature est encore plus fournie du côté de la dernière étape puisque celle-ci recouvre tout aussi bien les sciences sociales que les sciences dites « dures » comme l'intelligence artificielle ou la robotique.

⁵⁶ Un découpage similaire se retrouve par exemple dans Frank 2003 : « Imitation occurs in three steps: (1) an economic agent (the imitator) somehow observes the trait of another agent, (2) the imitator decides that the trait is valuable and worthy of imitation, and (3) the imitator attempts to accurately copy the trait. »

⁵⁷ Au sens des psychologues c'est à dire l'étude de la manière dont les gens voient les autres et se voient eux-mêmes.

Une seule chose n'est que très rarement abordée ou le plus souvent esquivée dans la littérature : la question de l'origine du critère d'évaluation qui définit les buts du sujet. Ainsi par exemple, dans un chapitre prospectif de conclusion, Fiske et Taylor (1991, p 555) insistent sur le fait que la multiplicité des buts possibles des agents sociaux est souvent ignorée :

[..] the social perceiver is viewed primarily as a thinker, motivated to understand and predict the environment fairly efficiently, where possible. Other motives and goals are too often ignored. But people have other goals that differ from sheer understanding for its own sake. For example, what about the moral person? Sometimes the people are motivated to think about the just, the proper, or fair judgment to make rather than the most efficient first approximation. Beside the moral person, there is the public person, who worries about saving face. There is also the amusing person, whose goal is to entertain the self or others [...], there is the altruistic person, who thinks about the others in order to help them, no to understand, predict or control them. And there is the antisocial person, who thinks about others in order to hurt them.

This list could go on, but an exhaustive taxonomy of possible goals simply is not useful. The more important point is that cognition serves many masters, and efficient or accurate understanding is only one of them.

Cette préoccupation est à rapprocher du problème de la prise en compte de l'hétérogénéité des buts des individus dans le cadre de la modélisation des systèmes économiques et sociaux que nous avons rencontré dans la partie I (Ahn et al. 2001, Fehr & Fischbacher 2003, Dal Forno et Merlone 2004, Henrich et al. 2001., Offerman et al. 2001, Sonnemans et al. 1999). Mentionnons brièvement qu'elle se retrouve également chez les neurobiologistes cherchant à rendre compte des processus de décision. Ainsi par exemple, Damasio (1995, p. 235), après avoir dressé un portrait des mécanismes neurologiques de prise de décision en fonction de ce qui est avantageux, reconnaît que ce modèle n'est complet que dans la mesure où les décisions en question portent sur des conditions aux limites du fonctionnement normal de l'individu, celles pour lesquelles le critère a toutes les chances d'être homogène dans la population :

Je sais bien qu'il n'est pas facile de définir ce qui est avantageux et je me rends bien compte que certaines solutions peuvent être considérées comme avantageuses par certains, mais non par d'autres. Par exemple, devenir millionnaire n'est pas nécessairement bon, et on peut en dire autant du fait de gagner des prix. Tout dépend de nos cadres de référence et des buts que nous cherchons. Lorsque je parle d'une décision avantageuse, je vise des données fondamentales dans les domaines personnel et social, tel que la survie de l'individu et sa famille, la possession d'un domicile, la préservation de la santé physique et mentale, la possession d'un emploi et d'un revenu, et la reconnaissance sociale dans un milieu donné.

Le problème de la détermination du critère d'évaluation dans les processus de décision, y compris lorsqu'il s'agit d'imitation, est donc le moins bien traité dans la littérature. A notre connaissance, il n'y a en sciences sociales aucun modèle qui ne considère ce problème comme déjà résolu, hormis les modèles inspirés de l'évolution génétique, qui posent les problèmes évoqués au *I.3.C.c.* Nous nous attacherons désormais à montrer qu'il est possible de proposer un modèle des phénomènes mimétiques, compatible avec les capacités cognitives humaines, qui permet de traiter précisément cette question. Pour cette raison, nous ne chercherons pas à rendre compte des autres aspects de l'imitation (catégorisation, inférence, exécution et apprentissage). Ceux-ci feront l'objet le plus souvent d'*hypothèses par défaut*, dont le caractère insatisfaisant ne fera que souligner la complémentarité de notre proposition avec les théories existantes.

Nous utiliserons par ailleurs sans grande distinction les termes de buts, objectifs ou motivations. Bien que des définitions précises existent les distinguant, les rapports entre celles-ci diffèrent d'une discipline à l'autre. Par ailleurs, nous ne pensons pas que cet abus de langage nuise particulièrement à la compréhension de notre propos. Nous garderons donc volontairement cette sous-catégorisation, en nous excusant auprès de certains lecteurs qui voient dans ces distinctions l'art d'une discipline.

Le modèle que nous allons proposer sera compatible avec l'imitation humaine, ce qui ne veut pas dire qu'il décrit ce qui est effectivement réalisé. Il y a d'ailleurs peu de chances que ce soit le cas. Cependant, comme nous allons le voir, les systèmes mimétiques que nous proposons ont la propriété de clôture opérationnelle et en ce sens, nous pouvons espérer que la classe de modèles à laquelle ils appartiennent possède des propriétés proches de celles que nous pouvons observer au sein des systèmes sociaux humains.

III.1.B.b. Définir les règles d'imitation

Les Allemands étaient particulièrement malheureux, leur politique étant de voter comme les Britanniques pour tout ce qui concerne Israël (les Britanniques, eux, suivent généralement les Etats-Unis). Les Européens de l'Est n'étaient pas moins perplexes. Généralement, ils votent comme l'Europe si celle-ci a une position unique. Dans le cas contraire, ils sont livrés à eux-même ou au téléphone portable qui les relie à leur capitale.
Les Européens, unis, votent le soutien à Arafat, Le Monde du 22 septembre 2003

Nous venons de voir dans la partie II que la méta-cognition et la réflexivité constituent deux caractéristiques de la cognition humaine. Nous tâcherons de montrer dans cette sous-section comment ces deux caractéristiques peuvent nous aider à proposer une définition formelle de l'imitation qui apporte une solution à la détermination du critère d'imitation, tout en répondant aux problèmes que nous nous sommes posés à la fin du chapitre III.1.A. Pour ce faire, nous allons considérer un système constitué de plusieurs agents mimétiques interagissant (le modèle de Nowak et May présenté dans la partie I, est un exemple de tels systèmes).

Commençons par revenir sur la notion de trait que nous avons évoquée précédemment. Nous sommes capables d'imitation parce que nous percevons chez les autres des choses qui les caractérisent et que nous sommes en mesure de nous approprier (au sens large du terme). Les éléments pouvant entrer dans la description d'un individu seront appelés *traits* et leur ensemble sera noté T . Nous allons être amenés à faire la distinction entre ce que nous allons appeler *traits modifiables* et *autres traits*⁵⁸ :

- Les *traits modifiables* de l'individu sont ceux que celui-ci peut changer de sa propre volonté. C'est le cas par exemple des vêtements que l'on porte, de l'attitude amicale ou agressive envers quelqu'un, du parti politique que l'on décide de soutenir, des stratégies de jeu, de la règle d'apprentissage utilisée pour une tâche donnée, etc. Ils se regroupent ainsi en diverses catégories et l'ensemble des traits modifiables d'un agent i peut être représenté par un n -uplet $s_i \in S \subset T$ des choix de i pour les différentes catégories de traits (opinion politique, couleur de chemise, etc..). Cet ensemble est l'équivalent de ce qui est appelé *stratégie* en théorie des jeux, avec, comme nous le verrons, la particularité qu'il n'y a pas de distinction

⁵⁸ Le terme de traits est emprunté à la littérature de modélisation des phénomènes culturels et à une partie de la littérature économique anglo-saxonne.

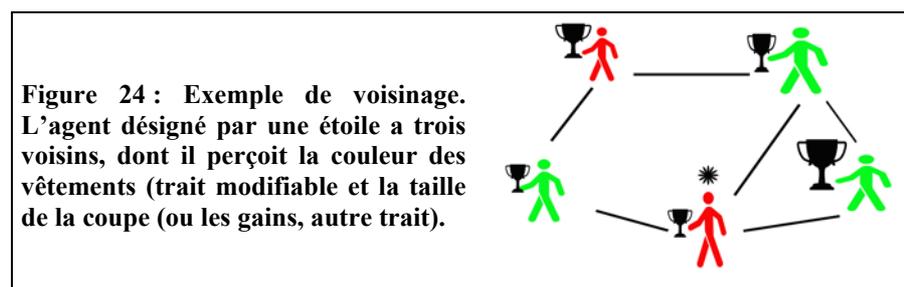
entre stratégie et méta-stratégie. Nous aurons recours à ce second terme lorsque cela sera pertinent.

L'ensemble des stratégies ou des *n-uplet* de traits modifiables sera noté S . Nous noterons $K(S)$ l'ensemble des catégories de traits modifiables. Par exemple, dans la description du jeu du dilemme du prisonnier que nous avons donnée dans la partie I, la stratégie des joueurs (C ou D) est un de leurs traits modifiables (le seul dans le modèle de Nowak et May). L'ensemble des stratégies possibles $\{C, D\} \in K(S)$ est alors une catégorie de traits modifiables.

- Les *autres traits*, à l'inverse, sont ceux qui ne dépendent pas de la seule volonté de l'individu. Ils dépendent de dynamiques plus complexes, voire impliquent d'autres acteurs. C'est le cas par exemple de la position sociale, la fortune, la réputation, l'âge, etc. Par exemple, dans la description du jeu du dilemme du prisonnier que nous avons donnée dans la partie I, le gain g_i d'un joueur est un *autre trait*.

Nous allons donc considérer des agents mimétiques qui seront définis par un *n-uplet* τ dont les premières composantes seront les traits modifiables des agents, que nous désignerons comme étant leur stratégie, et les dernières composantes seront les autres traits de l'agent (ses gains, sa réputation, etc.). Par exemple, dans le modèle de Nowak et May, un agent i est défini par $\tau_i = (s_i, g_i)$ où $s_i \in \{C, D\}$ et où g_i est un réel.

L'imitation nécessite l'observation d'un modèle par un sujet, ce qui suppose un espace physique déterminant des relations de proximité. Nous considérerons donc que les agents prennent connaissance des traits définissant leurs voisins à travers leur environnement et le réseau social dans lequel ils sont insérés. L'ensemble des agents desquels un agent i donné peut inférer une partie des traits sera appelé le *voisinage* de l'agent (I_i) et l'ensemble des traits que i peut percevoir sera appelé *traits perçus* de l'agent et noté $T_{p,i}$ (Figure 24). De même que nous avons fait une distinction entre les traits modifiables et les autres traits, nous allons particulariser dans nos notations, l'ensemble des traits modifiables effectivement perçus par un agent i (qu'il pourra éventuellement chercher à copier).



Nous noterons $\sigma_i = \{s_k, k \in \Gamma_i\}$ l'ensemble des traits modifiables (ou stratégies) que peut observer l'agent i chez ses voisins (dans l'exemple ci-dessus la couleur des vêtements des trois voisins et de l'agent), et $\sigma = (s_1, \dots, s_N)$ l'ensemble des stratégies dans la population. En reprenant les notations de la théorie des jeux, nous noterons s_{-i} le $(N-1)$ -uplet constitué des stratégies de tous les agents, i excepté.

Ainsi, à un moment donné, si $\sigma = (s_1, \dots, s_N)$, $s_{-i} = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_N)$. Ceci permet de reprendre la notation $\sigma = (s_i, s_{-i})$ où (s_i, s_{-i}) est le N -uplet (s_1, \dots, s_N) . Nous pourrions comparer ainsi les valeurs prises par une fonction sur deux états distincts de la population, (s_i, s_{-i}) et (s'_i, s_{-i}) , ce qui reviendra à comparer les valeurs de cette fonction sur $(s_1, \dots, s_{i-1}, s_i, s_{i+1}, \dots, s_N)$ et $(s_1, \dots, s_{i-1}, s'_i, s_{i+1}, \dots, s_N)$.

De la même manière, nous noterons $\tau_i = \{\tau_k, k \in \Gamma_i, k \neq i\}$ l'ensemble des traits que peut observer i chez ses voisins (sur la Figure 24, la couleur des vêtements et la taille des coupes des trois voisins). $(\tau_i, \tau_{-i}) \in T_{p,i}$ sera l'ensemble des traits que perçoit i dans son voisinage.

Par exemple, dans le modèle de Nowak et May les voisinages sont définis comme étant les huit cellules adjacentes d'une cellule donnée, et chaque agent peut percevoir à la fois les gains et les actions de ses voisins tout comme ses propres gains et ses propres actions. L'ensemble des traits perçus par un agent dans ce modèle est un élément de l'ensemble $(\{C, D\} \times \mathcal{R})^9$ et pour un agent i , $\sigma_i \sim \{C, D\}^9$. Par ailleurs, $\sigma \sim \{C, D\}^N$ où N est le nombre de joueurs. De même $\tau_i = (s_i, g_i)$ (la stratégie de l'agent et son gain) et $\tau_i \in (\{C, D\} \times \mathcal{R})^8$

On remarquera que les voisinages peuvent éventuellement être catégorisés en sous-voisinages en fonction de la nature des traits perçus. Par exemple, Boyd et Richerson (1985) considèrent différents types de transmission culturelle en fonction de sous-voisinages indexés sur l'âge et le lien de parenté : transmission verticale de parents à enfants, oblique entre individus non apparentés de générations différentes, horizontale entre individus de même génération.

D'où viennent les critères d'imitation ?

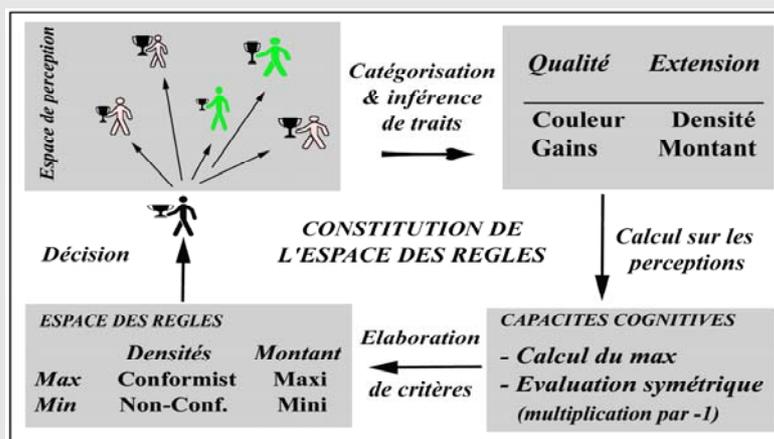
Lors des discussions qui vont suivre, nous nous efforcerons de prendre le point de vue de l'agent, la question étant : comment l'agent donne du sens à ses actions et à ce qu'il perçoit ? Nous envisagerons notamment les comportements sociaux comme le résultat d'une construction de significations à partir d'un ensemble de perceptions. L'ensemble des critères d'imitation (cf. III.1.B.a) devra être le résultat d'une telle construction. Nous commencerons donc par nous donner un espace de perception, c'est-à-dire un ensemble de traits pouvant être utilisés par l'agent lors d'une description du monde. Cet ensemble de traits, que nous considérerons ici comme donné, résulte déjà d'une catégorisation sur les perceptions.

Pour reprendre un exemple proposé par Serge Galam (1998), imaginons un univers très simple où des agents n'interviennent dans le monde qu'à travers le choix de la couleur de leur chemise : rouge ou verte. Imaginons également que ces choix déterminent pour chaque agent, en fonction de la configuration de son voisinage, la valeur d'une quantité qui lui est propre (par exemple des gains). Les états de ce monde élémentaire sont alors décrits par les couleurs de chemises et les gains des agents. Les types d'états physiques du monde que les agents seront capables d'envisager dépendront donc de leurs capacités à inférer, puis à catégoriser ces traits chez leurs voisins.

Faisons, par exemple, l'hypothèse que des agents très simples perçoivent des densités de couleur et les montants des gains de leurs voisins. Pour définir des critères d'imitation, il est nécessaire que les agents puissent effectuer des calculs sur ces perceptions. Ce n'est donc qu'après avoir doté les agents d'un ensemble d'opérateurs sur leurs percepts, que nous pourrons engendrer l'espace des critères possibles pour l'imitation. L'ensemble des critères possibles sera alors le fruit de l'action d'un ensemble d'opérateurs sur un ensemble de percepts.

Remarquons que ces deux ensembles sont nécessairement exogènes dans le cadre d'une modélisation. Les contraintes minimales que nous puissions formuler sont qu'ils soient compatibles avec les capacités cognitives humaines et reflètent une certaine phénoménologie.

Par exemple, dans le cas minimal exposé ci-dessous, des agents sont capables d'inférer les densités de couleurs et les gains dans leur voisinage, pour obtenir des valeurs réelles. Ils peuvent ensuite sur ces valeurs, trouver le *maximum* ou les multiplier par -1 . Ceci engendre de manière exhaustive quatre critères qui serviront à définir des règles d'imitation (voir III.2.C.b pour un exemple), telles que le *conformisme*, l'*anticonformisme*, l'imitation du voisin le plus riche (*maxi*), ou de celui dont les gains sont les plus faibles (*mini*).



Nous concluons par deux remarques. Premièrement, l'activité sémiotique elle-même - extraction de traits pertinents, de construction de critères, puis de procédures d'actions - dans la mesure où les agents sont capables de l'inférer chez les autres, comme c'est le cas pour l'espèce humaine, est susceptible d'enrichir l'espace de perception, et donc l'espace des critères possibles, dans une construction récursive. Deuxièmement, l'adoption d'un critère détermine l'ensemble des choses qui font sens pour un agent, deux agents ayant des critères différents ne s'intéresseront pas aux mêmes percepts, et n'attribueront pas la même signification à un même événement.

Dans ce système constitué d'agents artificiels il va maintenant falloir nous donner une définition opérationnelle d'imitation. Étant donné que nous cherchons à étudier de manière stylisée les phénomènes mimétiques, nous excluons dans notre approche toute forme de décision ne relevant pas de l'imitation. Tout processus de décision sera donc avant tout la donnée d'un critère d'imitation, celui-ci représentant les buts ou les intentions de l'agent (par exemple gagner le plus au jeu, avoir des échanges équitables, avoir du prestige, etc.). En reprenant les trois étapes de l'imitation identifiées en III.1.B.a, nous définirons les règles d'imitation de la façon suivante :

Définition : Règle d'imitation $r : T_{p,i} \rightarrow S$

Une règle d'imitation, appliquée par un agent i , est composée des éléments suivants :

1) Une fonction de valuation : $v_i : T_{p,i} \rightarrow \mathcal{R}^{|\Gamma_i|}$. Celle-ci est le critère en fonction duquel un agent i choisit d'imiter, c'est sa définition de « meilleur ». Cette fonction assigne un gain à chaque agent dans le voisinage Γ_i de i qui détermine le succès que i leur attribue. Lorsqu'il n'y aura pas d'ambiguïté, nous noterons $v_i(s_k, s-k)$ la $k^{\text{ième}}$ composante de v_i , c'est à dire le gain attribué par l'agent i à la stratégie $s_k \in \sigma_i$ de l'agent $k \in \Gamma_i$, lorsque l'état de la population est $\sigma = (s_k, s-k)$ (il y a dans σ des seconds voisins de i , que i ne voit pas mais qui peuvent avoir une influence sur les gains de ses voisins).

2) Une fonction sélection $\Lambda : T_{p,i} \times \mathcal{R}^{|\Gamma_i|} \rightarrow K(S)$. Celle-ci sélectionne parmi les agents de score maximal la catégorie de trait pertinente pour l'imitation. Cette fonction inclut notamment un processus d'inférence qui peut faire l'objet d'un apprentissage (voir également encart II)

3) Une fonction de modification : $M : T_{p,i} \times \mathcal{R}^{|\Gamma_i|} \times K(S) \rightarrow S$. Celle-ci modifie la stratégie s_i de i en changeant son trait modifiable de la catégorie désignée en fonction de ce que l'agent voit chez les voisins qu'il considère comme les meilleurs. Cette fonction peut aller de la simple copie au rapprochement « en direction de » dans le cas de traits définis par une variable continue.

Nous avons $r = M(Id, v_i, \Lambda(Id, v_i))$ où Id désigne l'identité. La règle r utilisée par un agent i s'appliquera aux traits perçus par l'agent i , i.e. $(\tau_i, \tau_{-i}) \in T_{p,i}$. En utilisant les notations précédemment introduite, le résultat de l'application de r sera noté $r(\tau_i, \tau_{-i}) \in S$

Nous noterons R l'ensemble des règles d'imitation.

L'imitation est donc ici un processus qui se produit après une observation et qui, étant donné un critère, un agent et l'ensemble de ses traits perçus (qui sont déjà le fruit de processus d'inférences de la part de l'agent) :

- 1 - sélectionne un (ou plusieurs) modèle(s) dans le voisinage de l'agent,
- 2 - détermine une catégorie de trait modifiable pertinente,
- 3 - opère une modification sur le trait modifiable de l'agent correspondant à cette catégorie.

L'imitation n'est pas nécessairement un processus déterministe. En effet, imaginons que la fonction v_i désigne deux « meilleurs agents » aux stratégies en tout point différentes. La fonction de modification pourra être par exemple : « choisis l'un des meilleurs agents au hasard et modifie le trait pertinent de la catégorie désignée par A ». Le choix du modèle sera alors le résultat d'une variable aléatoire. Dans le cas le plus général, une règle d'imitation sera donc une variable aléatoire indexée par le voisinage de l'agent et à valeur dans l'ensemble des stratégies.

Par exemple, la définition la plus simple du conformisme est d'adopter le comportement de la majorité. La définition la plus simple de l'imitation indexée sur les gains est d'adopter le comportement d'un des agents les plus riches, etc.

Insistons sur le fait que l'imitation telle que nous l'avons définie passe par la sélection d'un modèle sur un critère général, avant la sélection du trait modifiable. Par exemple, si dans un bar un client commande un lait fraise et que, votre soif aiguësée par ce fait, vous faites la même chose, cela n'entrera pas dans le cadre de l'imitation telle qu'elle est définie ici, mais plutôt dans celui des processus d'émulation (cf. encart 6). Par contre, nous parlerons d'imitation si un individu commande un lait fraise parce que c'est la boisson préférée de ce collègue qui a tant de succès auprès des femmes.

Deux éléments importants de l'étude de la partie II doivent être associées à cette définition. D'une part, les êtres humains peuvent réfléchir sur leurs propres buts, intentions ou stratégies et sont capables d'imiter les intentions, les buts ou les stratégies de leurs congénères. En particulier, cette imitation est rendue possible par le fait que les être humains sont capables d'évaluer la situation d'un individu d'après leurs propres critères, en se mettant à sa place de manière contrefactuelle (théorie de la simulation) ; d'autre part les êtres humains ont la

capacité d'intégrer leurs différentes stratégies dans des cadres de raisonnement constitués de hiérarchies dynamiques de règles.

Si nous considérons ces deux éléments dans une perspective de modélisation des phénomènes mimétiques, deux nouveaux phénomènes doivent être pris en compte. Premièrement, les règles d'imitation deviennent elles-mêmes des objets cognitifs, identifiées par leur critère, et modifiables par l'intermédiaire de processus de traitements cognitifs. Elles deviennent donc des *traits modifiables* ($R \in K(S)$). Elles peuvent ainsi s'insérer dans une hiérarchie de règles au sein de laquelle elles modifient certaines règles d'imitation, et sont contrôlées par d'autres règles d'imitation. Pour cette raison, nous appellerons désormais ces règles, *règles métamimétiques*.

Mais le phénomène le plus important, est qu'à partir du moment où les règles d'imitation deviennent des traits modifiables, elles peuvent se révéler être l'élément cible d'un processus d'imitation quelconque. En particulier, *une règle d'imitation peut se trouver être l'élément à modifier de l'acte mimétique qu'elle a elle-même engendré*. Nous dirons dans ce cas, que la règle d'imitation agit de manière réflexive. La possibilité pour une règle d'agir de manière réflexive est la conséquence directe du fait que les règles d'imitation sont devenues des traits modifiables.

Ceci nous amène à définir des systèmes possédant ces deux propriétés :

Définition : *Un système métamimétique est un système tel que les hypothèses suivantes sont vérifiées :*

H1) Les règles d'imitation sont des traits modifiables par application de métarègles (Figure 25-b-2).

H2) Une règle d'imitation peut opérer de manière réflexive en agissant sur elle-même en tant que trait modifiable (Figure 25-c).

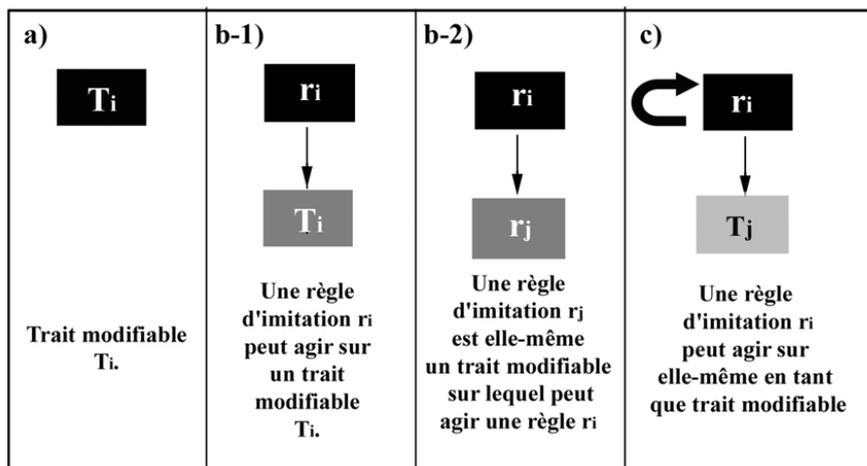
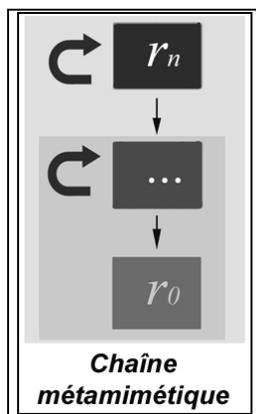


Figure 25 : Eléments et relations de base dans un système métamimétique

Les hypothèses $H1$ et $H2$ nous permettent d'envisager des systèmes mimétiques composés de plusieurs niveaux hiérarchisés (Figure 25-b-2). A un ensemble de traits modifiables donné, nous pouvons alors associer une *chaîne métamimétique* contrôlant leur expression. Ce type d'organisation hiérarchique est très courant en modélisation, nous en avons vu un certain nombre d'exemples en *I.3*. Cela nous amène à la définition suivante :

Définition : chaîne métamimétique



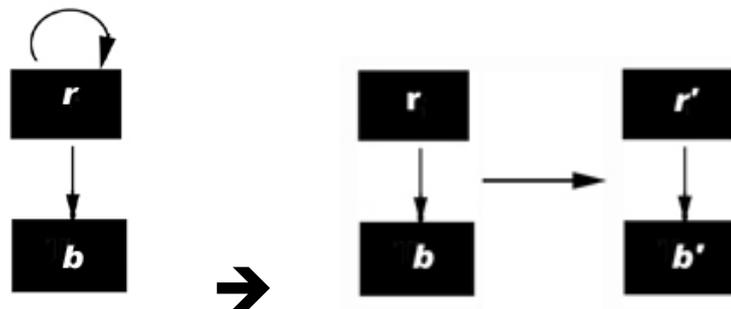
Une chaîne métamimétique est un ensemble de règles d'imitation $r_i, i > 0$ organisé de manière hiérarchique à partir d'un comportement r_0 , tel qu'une règle de niveau n est un trait modifiable pour les règles de niveau n ou supérieurs. Une chaîne métamimétique à n niveaux sera notée $s = (r_0, \dots, r_n)$ où $r_i, i > 0$ est une règle d'imitation.

Nous dirons que la sous chaîne de taille k de s est la chaîne métamimétique constituée des k premiers niveaux de s : (r_0, \dots, r_k) .

Dans le vocabulaire de la théorie des jeux, nous pourrions dire qu'une chaîne métamimétique est une stratégie organisée de manière hiérarchique. L'agent est susceptible d'en modifier certains éléments sans avoir à en modifier la totalité. Pour prendre un exemple, nous pourrions imaginer un agent économique qui, pour optimiser la rentabilité de ses investissements sur les marchés financiers (r_3 =optimisation des gains), en est arrivé à la conclusion qu'il faut suivre la tendance dominante (r_2 =conformisme), et qui, sachant que la majorité des investisseurs suivent les initiatives de Soros, imite temporairement Soros (r_1 =Imiter Soros) en investissant dans certains placements (r_0). Si Soros perd de son

prestige, l'agent changera r_1 pour un autre comportement collectif, et si l'agent en arrive à se convaincre qu'il faut au contraire éviter d'investir là où tout le monde investit, comme le modélisent par exemple ceux qui étudient le jeu de la minorité, il changera r_2 et reverra l'ensemble des traits modifiables de niveau inférieur.

Cette approche de l'imitation nous permet par exemple de donner un sens plus précis au type de transition proposé en III.1.A., et de donner ainsi la réplique à Ashby. Reprenons notre exemple, si r est une règle d'imitation, r peut se transformer en r' si au cours d'un processus d'imitation initié par r s'il s'avère que le trait modifiable qui doit être modifié est r elle-même et que r' est le trait modifiable sélectionné :



Ainsi, la nouvelle règle r' provient bien des inputs, comme le préconise Ashby, mais la cause du changement est bien r elle-même. L'agent change sous l'influence du social, mais d'après ses propres critères.

D'autre part, il est tout à fait envisageable que deux agents différents soient considérés comme des modèles équivalents. Par exemple, une imitation conformiste dont le critère est d'être comme tout le monde choisira indifféremment entre deux traits adoptés par des populations majoritaires de même taille. Ceci sort du cadre de la «machine» telle qu'elle est définie par Ashby, toujours est-il qu'il devient illogique de parler d'une fonction $\gamma(t)$ qui déterminerait les valeurs de r et r' (ou de f et g , pour reprendre les notations d'Ashby). Une telle description des changements de métarègles se construit au cours de l'histoire du système et ne peut être établie qu'a posteriori. Le prochain chapitre développera plus en détails cette idée. En particulier, nous nous poserons au III.1.C.d. la question de savoir si le principe d'imitation est lui-même une métarègle.

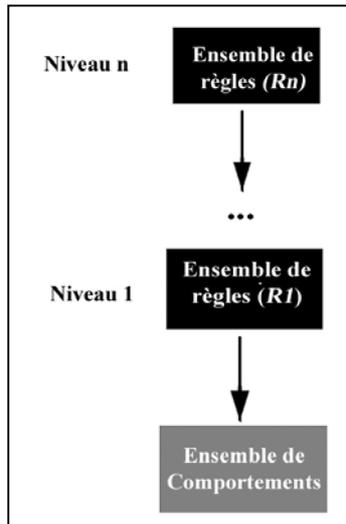
III.1.C. Le jeu métamimétique

Faisons un point sur l'état de nos réflexions :

- nous avons proposé une définition formelle de l'imitation,
- cette définition schématise certains traits spécifiques de la cognition humaine : *méta-cognition* et *réflexivité*,
- celle-ci est compatible avec les capacités cognitives humaines dans le sens où nous nous sommes capables volontairement d'imiter de la sorte,
- avec une telle définition, les règles d'imitation deviennent des traits modifiables et peuvent s'intégrer dans un ensemble de règles organisé de manière hiérarchique : une *chaîne métamimétique*,
- avec une telle définition, les règles d'imitation sont susceptibles d'être *leur propre métarègle*.

Nous seront bientôt en mesure de donner un exemple de chacune des dynamiques dont nous avons parlé en introduction (dynamique 1 et dynamique 2) en fournissant la description d'un système tel que le fonctionnement global soit régi par la dynamique 2, et le fonctionnement de ses sous-unités soit régi par la dynamique 1. Pour cela, nous allons être amenés à définir une classe de systèmes métamimétiques : *les jeux métamimétiques*.

III.1.C.a Définition du jeu



Considérons une architecture d'agent décrite par une hiérarchie de règles d'imitation (une chaîne métamimétique). Le but de notre entreprise étant de proposer des schémas pour penser les systèmes sociaux, cette architecture doit être compatible avec les capacités cognitives humaines. En conséquence, une contrainte s'impose naturellement : *les chaînes métamimétiques doivent être bornées en taille en raison des capacités cognitives limitées des êtres humains*. Fixons donc une borne arbitraire B_c limitant le nombre de règles que sont capables d'enchâsser les agents. Cette borne sera appelée la borne cognitive des agents.

La valeur précise de cette borne n'a pas d'importance. Les principaux phénomènes sont l'effet de son existence. Dans le cadre d'une application, la valeur de cette borne pourrait être choisie en fonction d'une étude visant à déterminer expérimentalement la moyenne du nombre maximal de règles que des sujets humains sont capables d'enchâsser. Elle devrait être de l'ordre de trois ou quatre. Nous avons par ailleurs vu au II.2.B.b que la capacité de raisonner sur des règles enchâssées progresse tout au long du développement de l'enfant. Nous pourrions donc également envisager la borne cognitive comme une fonction de l'âge de l'agent.

Au niveau le plus élevé d'une chaîne, deux alternatives sont possibles. Soit nous postulons l'existence de règles fixes exogènes ou de mécanismes de régulation de type génétique, ce qui placerait les règles de dernier niveau dans la catégorie *autres traits*. C'est l'option choisie par la théorie des jeux et la théorie des jeux évolutionnistes. Cette formalisation rencontre les objections mentionnées en I.3. L'alternative est de postuler que les règles de dernier niveau peuvent changer au cours de la vie de l'individu. L'une des manières de modéliser un tel changement est de faire l'hypothèse que ces règles de dernier niveau sont des traits modifiables et par conséquent peuvent s'auto-modifier de manière réflexive. Nous reviendrons sur cette question au c).

Ceci nous amène à proposer trois hypothèses cognitives qui vont définir une sous-classe de systèmes métamimétiques : les jeux métamimétiques.

Définition : Jeu métamimétique

Un jeu métamimétique est un jeu à N joueurs dont les stratégies sont définies par des chaînes métamimétiques. Par ailleurs, les trois conditions suivantes doivent être vérifiées :

*P1 – **Rationalité limitée** : Le nombre de méta-niveaux qu'est susceptible de considérer un joueur est borné (borne cognitive de l'agent).*

*P2 - **Méta-cognition** : A tous les niveaux, les règles d'imitation sont des traits modifiables.*

*P3 – **Réflexivité** : Une règle métamimétique est un trait modifiable pour elle-même. En cas de modification réflexive d'une règle, celle-ci est conservée dans la mesure où le changement de structure nécessaire est compatible avec la borne cognitive de l'agent. Dans le cas contraire, la règle est remplacée.*

Par rapport à ce que nous avons déjà vu, la condition *P3* nécessite quelques précisions. Pour fixer les idées, nous allons prendre pour exemple au cours de notre discussion une ébauche de ce que pourrait être un dilemme du prisonnier métamimétique (voir l'encart 10).

DILEMME DU PRISONNIER MÉTAMIMÉTIQUE

Considérons N agents jouant à un dilemme du prisonnier avec chacun de leurs voisins, en leur opposant l'un des deux comportements : coopérer (C) ou faire défection (D). Le comportement d'un agent est le même, à une période donnée, envers chacun de ses voisins bien qu'il puisse en changer d'une période à l'autre. Lorsque deux agents jouent ensemble, ils reçoivent un gain de R (*récompense*) si tous deux ont coopéré, et de P (punition) si tous deux ont fait défection. Dans le cas où les stratégies sont différentes, le défecteur reçoit T (*trahison*), alors que le coopérateur reçoit S (*sucker*). Rappelons que les conditions pour que la matrice ci-dessous représente un dilemme du prisonnier sont : $S < P < R < T$ et $S + T < 2R$.

$\begin{array}{c} \text{Agent B } \rightarrow \\ \downarrow \text{Agent A} \end{array}$	C	D
C	(R,R)	(S,T)
D	(T,S)	(P,P)

Matrice de jeu d'un dilemme du prisonnier

Considérons maintenant des agents métamimétiques. Les règles étant elles-mêmes des traits modifiables, il y a dans ce jeu deux types de traits modifiables : l'action et les métarègles ; et un autre trait : le gain. Si nous supposons que chacun des agents voit les traits de tous ses voisins, nous pouvons alors introduire des critères d'imitation indexés sur des densités de comportements ou sur les gains. Si nous considérons les fonctions de valuation les plus simples, nous obtenons les règles métamimétiques suivantes :

- 1 – *Maxi* : « Copie le plus riche de tes voisins ».
- 2 – *Mini* : « Copie le plus pauvre de tes voisins ».
- 3 – *Conformisme* : « Copie la majorité »
- 4 – *Anti-conformisme* : « Copie la minorité »

Un agent conformiste pourra par exemple se dire « la plupart de mes voisins ont joué C , donc je vais désormais jouer C car je veux faire comme tout le monde » mais aussi « la plupart de mes voisins sont maximisateurs, donc je vais désormais être maximisateur pour être comme tout le monde ». De même, un agent maximisateur pourra se dire « Puisque les conformistes sont ceux qui gagnent le plus, je vais désormais faire comme tous le monde », etc. Nous allons voir que la capacité d'un agent à garder en arrière plan son but premier tout en adoptant un but temporaire (comme par exemple faire comme tout le monde *parce que* c'est un bon moyen de gagner) est liée à sa borne cognitive.

Dans la perspective d'une comparaison avec la théorie des jeux, il est important de remarquer que, dans un dilemme du prisonnier métamimétique, les agents ont des points de vue différents sur la même activité. Ils jouent donc à des jeux différents. La matrice ci-dessus est une matrice des conséquences et non une matrice des utilités.

III.1.C.b Mise à jour des traits modifiables



Le Canard Enchaîné, n°4329 15/10/03

Commençons par remarquer que d'après notre définition de l'imitation, les agents ne s'engagent dans un processus d'imitation que si, après avoir observé leurs voisins, ils constatent qu'ils ne sont pas les meilleurs d'après les critères qu'ils se sont donnés. De ce fait, sous certaines conditions, il est possible que les agents n'imitent que très rarement. Dans ces cas-là, le comportement le plus fréquent dans un jeu métamimétique ne sera pas l'imitation mais la reconduction tacite des règles de comportement.

La mise à jour d'un trait modifiable n'apporte aucune nouveauté par rapport à ce qui est connu, tant que la règle d'imitation à l'origine de cette modification n'est pas au même niveau que le trait modifiable considéré. Après s'être engagé dans un processus mimétique défini par une règle de niveau k et avoir repéré un voisin strictement meilleur que lui selon ses critères, un agent peut en arriver à la conclusion qu'un trait modifiable de niveau intermédiaire $k' < k$ est à l'origine de cette différence. Il décidera alors de le changer (Figure 26).

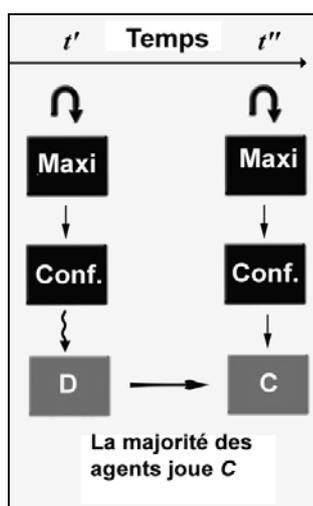


Figure 26 : Exemple de modification d'un trait modifiable de niveau intermédiaire. Un agent conformiste se rend compte que le comportement (D) qu'il a adopté n'est pas majoritaire dans la population. Il le change pour le comportement majoritaire (C).

En revanche, au cours d'une mise à jour réflexive, la situation est bien différente. Prenons pour fixer les idées un agent maximisateur (qui cherche à optimiser ses gains) dans un dilemme du prisonnier métamimétique (cf. encart n°10). Celui-ci est décrit par son comportement, par exemple D , et sa métarègle, $maxi$. Supposons qu'après s'être comparé à ses voisins, il constate que sa stratégie (i.e. $(D, maxi)$) n'est pas la plus performante. Après réflexion, il infère (cf. encart 11) que cette différence met en cause sa métarègle (par exemple, son comportement a toujours été le même que celui de son voisin, ce qui l'amène à penser que c'est peut-être la manière dont celui-ci s'adapte à son voisinage qui le rend plus performant). Supposons que le voisin qu'il considère comme étant le meilleur soit conformiste. La condition $P3$ exprime que, si l'agent en a les capacités cognitives, celui-ci gardera en arrière-plan son but de maximisation des gains tout en indexant temporairement son comportement sur une règle conformiste (cas a. - Figure 27). Ceci se traduit par le passage d'une chaîne métamimétique à deux niveaux $(D, maxi)$ à une chaîne à trois niveaux $(D, conformiste, maxi)$. En revanche, si la valeur de la borne cognitive de l'agent est égale à un, celui-ci substituera la règle $maxi$ à la règle $conformiste$ (cas b - Figure 28).

De manière générale, si un agent, après avoir pris le point de vue de sa règle de niveau n , infère qu'il serait bon pour lui d'adopter la sous-chaîne de taille k de l'un de ses voisins, trois cas de figure se présentent selon qu'il a ou qu'il n'a pas la possibilité d'absorber cette sous-chaîne tout en gardant ses buts initiaux :

a) **Conservation de la règle initiale** (Figure 27), $Bc(i) - (|s_i(t)| - n) > k$: la borne cognitive de l'agent lui permet de conserver la règle à l'origine du changement de manière à ce qu'elle puisse contrôler une structure similaire à celle identifiée chez l'agent j . La taille de sa chaîne mimétique devient alors $|s_i(t+1)| = |s_i(t)| - n + k$. Les objectifs définis par la règle de départ sont conservés, mais les moyens de les satisfaire sont modifiés. Ce type de mise à jour fait varier de manière endogène la taille des chaînes métamimétiques des agents.

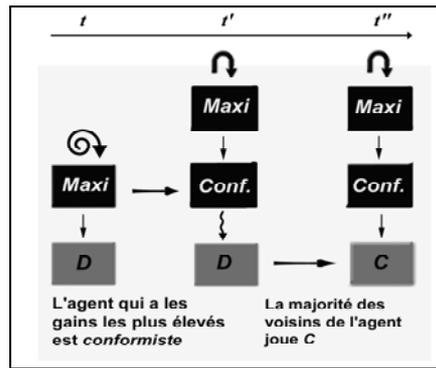


Figure 27 : Exemple d'une mise à jour avec conservation de la règle. Au temps t , un agent *Maxi* de borne cognitive supérieure à 2 s'aperçoit qu'un autre agent *conformiste* gagne strictement plus que tous ses voisins. Il décide donc de l'imiter au temps t' en prenant comme règle de comportement de niveau 1 la règle métamimétique conformiste. Il garde cependant la règle *maxi* comme règle de plus haut niveau, celle-ci passant au niveau 2. Ce changement l'amène également à revoir son comportement (de D à C) à un temps ultérieur t'' .

b) **Mise à jour totale** $Bc(i) - (|s_i(t)| - n) = k$ (Figure 28) : la borne cognitive de l'agent est atteinte. Pour pouvoir adopter la sous-chaîne métamimétique visée, il lui est nécessaire de changer intégralement sa sous-chaîne métamimétique de taille n .

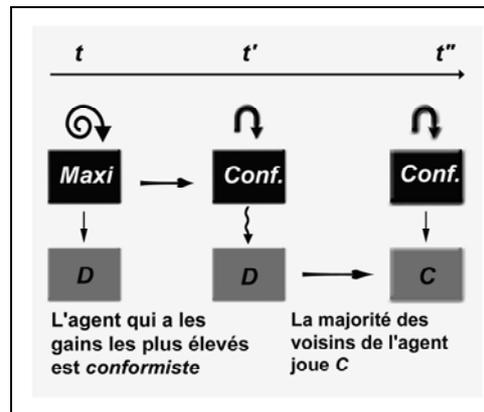


Figure 28 : Exemple de mise à jour totale. Même situation que pour la Figure 27 mais ici, la borne cognitive de l'agent est égale à un. L'agent doit donc changer totalement l'ensemble de ses buts et devenir *conformiste*.

Il reste enfin une dernière possibilité. Il se peut en effet que la stratégie utilisée par le modèle soit trop complexe pour pouvoir être copiée par l'agent. La borne cognitive de l'agent ne permet pas de copier la stratégie du meilleur agent en entier. Dans ce cas, l'agent ne copiera qu'une partie de sa chaîne métamimétique (cas c – Figure 29).

c) **Mise à jour totale avec absorption partielle** $Bc(i) - (|s_i(t)| - n) < k$ (Figure 29) : La borne cognitive de l'agent ne lui permet pas d'adopter l'ensemble de la sous-chaîne métamimétique de l'agent visé. Il doit se contenter d'en adopter les premiers niveaux.

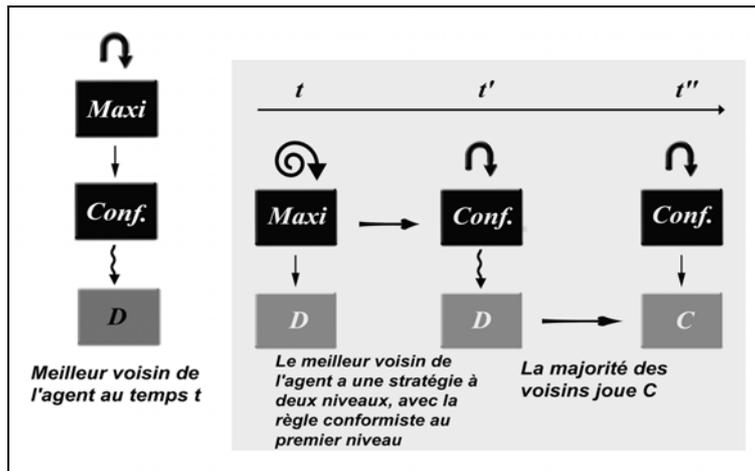


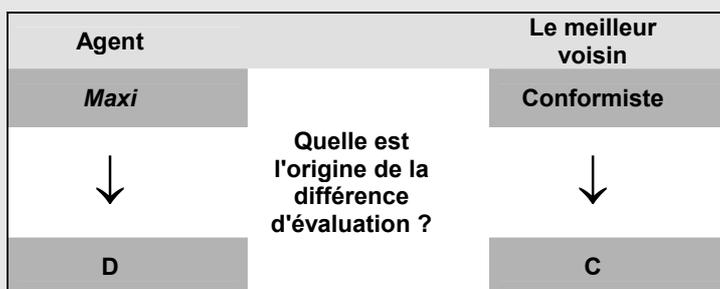
Figure 29 : Mise à jour totale avec absorption partielle. Un agent de borne cognitive *I* cherche au temps *t* à imiter un agent qui emploie une stratégie à deux niveaux (chaîne de gauche). Il doit se contenter d’imiter sa règle de premier niveau et l’utiliser ensuite pour modifier les niveaux inférieurs.

Ces trois types de transition sont importants sous deux aspects. Premièrement ils définissent une variation endogène de la longueur de la chaîne métamimétique. Celle-ci est modifiée si, à un moment donné, l'agent considère qu'une stratégie plus complexe que celle qu'il suit est plus performante.

Deuxièmement, et c'est le point le plus important, dans le cas d'une mise à jour de la règle métamimétique de plus haut niveau, cette règle peut être amenée à changer si la borne cognitive est atteinte (cf. Figure 28 et Figure 29).

La question de l'inférence des traits

Nous avons annoncé au *III.1.B.a* que nous ne traiterons pas le problème de l'inférence pour nous concentrer sur le problème du critère d'imitation. Il est cependant nécessaire de donner quelques précisions de manière à mettre en évidence les choix par défaut qui seront faits par la suite. Considérons par exemple des agents de borne cognitive égale à un.



Ces agents, décrits par la donnée de leur comportement et de leur règle, peuvent tenter d'inférer ces deux éléments chez leurs voisins. Lors des applications, nous ferons dans un premier temps (*III.2.B*) l'hypothèse simplificatrice que ce processus s'effectue de manière parfaite : les agents voient les traits de leurs voisins. Nous ne chercherons pas à rendre plus réaliste ce processus d'inférence, sauf à le rendre bruité (*III.2.C*). L'essentiel est que de tels processus, même s'ils sont peu fiables, existent et puissent être appris. Par exemple, pour savoir si un individu est conformiste, un agent pourra regarder si, sur les n derniers coups, cet individu a agi comme la majorité de leurs voisins communs.

Une fois inférés les traits du meilleur voisin, l'agent doit déterminer quel(s) trait(s) est (sont) responsable(s) de ce succès (fonction de sélection). Là encore, il y a une multiplicité de règles d'inférence possibles. Citons-en trois pour l'exemple minimal ci-dessus :

- 1 **Remettre en cause de manière indépendante chacun des traits** avec une certaine probabilité (« je copie le comportement de mon modèle avec une probabilité θ et sa règle avec une probabilité α . Lorsque je change ma règle, je réexamine mon comportement au vu de la nouvelle règle »).
- 2 **Remettre en cause la règle en priorité** (« je vais adopter la règle de mon voisin, je réexaminerai mon comportement avec cette nouvelle règle »).
- 3 **Remettre en cause l'action en priorité** (« je vais commencer par adopter le comportement de mon voisin, si cela ne marche pas j'adopterai sa règle »).

Lors des applications, nous prendrons par défaut la règle 1, qui coïncide avec la règle 2 lorsque θ et α sont égaux à 1.

Il est important de remarquer que ces différentes règles d'inférences, si elles étaient introduites, ne seraient pas des paramètres supplémentaires car elles font partie de la description des règles métamimétiques. Cela ne ferait qu'augmenter la taille de l'espace des règles. Par exemple, si nous avons deux types de règles *maxi*, l'une utilisant la règle 2, l'autre la règle 3, leurs proportions évolueront alors sous les dynamiques métamimétiques. Les processus d'inférence les plus performants et les plus stables, relativement au critère qu'ils desservent, seront alors « sélectionnés ».

III.1.C.c Interprétation de la condition P3 : réflexivité et auto-cohérence des règles

La condition *P3* peut sembler surprenante, d'autant plus qu'elle s'applique également aux buts ultimes de l'agent, décrits par sa règle de dernier niveau. En cas de mise à jour totale, le processus d'imitation aura pour résultat la modification des buts de plus haut niveau de l'agent. Commentons donc la condition *P3* autour de ce cas limite, en rappelant que la stratégie d'un agent est définie comme l'ensemble de ses traits modifiables.

La condition *P3* peut alors s'exprimer sous la forme suivante :

Condition P3 :

L'agent change toujours une stratégie pour une stratégie plus performante au sens de ses buts de plus haut niveau (principe de rationalité)

En utilisant les notions introduites dans la partie II, ceci s'interprète dans les termes de la théorie de la simulation et de la théorie de la théorie : *Si, en se mettant contrefactuellement à la place de ses voisins, relativement à leurs situations, un agent peut s'imaginer mieux qu'il n'est (théorie de la simulation), alors il adoptera la métarègle de celui qu'il estime être le meilleur (théorie de la théorie), quand bien même cela l'obligerait à abandonner ses propres métarègles.*

Du point de vue de l'agent, cela correspond à une stabilité contrefactuelle. Du point de vue des règles, cela correspond à un critère d'auto-cohérence : *les actions qu'elles prescrivent ne sont pas en contradiction avec le fait de les posséder.* L'auto-cohérence et la stabilité contrefactuelle ne sont pas des propriétés de la règle ou de l'agent, mais des propriétés de la *relation* entre l'agent qui possède cette règle et son environnement. Cette exigence d'auto-cohérence des règles découle directement du fait qu'à tous les niveaux, les règles d'imitation sont des traits modifiables. Les règles de plus haut niveau sont donc perçues par l'agent comme faisant partie de la stratégie qui vise à les satisfaire. Il n'y a de ce point de vue aucune différence entre règles et métarègles, elles peuvent être aussi bien moyens et fins.

Cette vision des choses peut sembler assez paradoxale pour ceux qui ont l'habitude de considérer que les moyens sont au service des fins. Dans une perspective de modélisation des systèmes sociaux, il nous faut montrer que cette hypothèse est raisonnable du point de vue d'un processus de schématisation du réel.

Revenons donc aux systèmes sociaux réels. La première objection que nous pourrions faire est que les buts ultimes des individus ne sont pas des traits modifiables, qu'ils ne

dépendent pas de leur volonté, qu'ils sont transcendants. Cela revient à nier la proposition *P2*. Cette position est un parti pris ontologique. Quand bien même il serait possible de départager les positions *P2* et *non-P2*, une critique rigoureuse de *non-P2* nécessiterait de mettre en défaut son auto-cohérence, ce qui nous mènerait bien au-delà des développements que nous pouvons accorder à cette question dans le cadre de cette étude.

La deuxième objection possible serait de considérer que bien que les individus sachent qu'ils peuvent agir sur leurs buts ultimes, ils se refusent à le faire. Cela correspond à la condition suivante :

Condition P3' :

- a) L'agent se refuse à changer ses buts de plus haut niveau,
- b) L'agent ne change sa stratégie pour une stratégie plus performante que si cela n'est pas contradictoire avec le principe *a*.

La comparaison des conditions *P3* et *P3'* révèle alors une asymétrie par rapport au temps. En ce qui concerne la condition *P3*, une situation de conflit, qui est analogue à ce que l'on appelle *dissonance cognitive*, est résolue par la décision de l'agent ou tout du moins, est remplacée par une situation conflictuelle différente. En revanche, sous la condition *P3'*, la situation de conflit est reconduite et ne peut être dissoute que par des événements indépendants de la volonté de l'agent. Le respect de la condition *P3'* est donc plus difficile que celui de *P3* puisque la volonté de la respecter doit être affirmée à chaque instant. *P3'* nécessite que l'agent se convainc à chaque instant, et pour une durée indéterminée, que les buts qu'il s'est fixés sont les bons, malgré une contradiction récurrente avec ses observations.

Par ailleurs, quelle que soit l'option choisie *P3* ou *P3'*, elle ne sera qu'une approximation arbitraire d'un ensemble de situations qui, sans aucun doute, sont loin d'être recouvertes par ces deux seules catégories. Fort heureusement, nous ne sommes pas des automates, et, admettons qu'une personne puisse être plus encline psychologiquement à respecter la condition *P3*, elle serait néanmoins capable de résister temporairement au détournement de ses buts initiaux ; tout comme une personne qui serait mieux décrite par la condition *P3'*, se laisserait aller de temps à autre à une résolution facile de conflit. La question est donc de savoir ce que l'on perd en restreignant les comportements possibles à l'une de ces deux catégories. La réponse que nous suggérons est la suivante : si nous admettons la condition *P3'*, le fait de ne pas considérer que les agents puissent changer leurs buts de plus haut niveau nous fait perdre de vue le fait que ces buts évoluent de façon dynamique, et exclut de fait, tout un ensemble de dynamiques possibles ; alors que si nous admettons la condition *P3*, nous surestimons certainement la propension des agents à changer d'objectifs, mais nous

conservons le caractère dynamique du dernier niveau qui est, nous semble-t-il, le trait qualitatif le plus intéressant dans le cadre d'une modélisation. Ainsi, même si des individus ne changent que très rarement leurs buts de plus haut niveau, les modalités de mise à jour ont toutes les chances d'être d'une grande importance si l'on veut modéliser l'émergence de structures au sein des réseaux sociaux, c'est-à-dire, la corrélation entre les comportements et les métarègles des individus.

Nous pourrions résumer ceci en disant que le phénomène qui cherche à être saisi dans la condition *P3* est qu'un individu n'adopte consciemment de nouveaux buts que dans la mesure où leur adoption est cohérente avec les buts et les principes qu'il s'est déjà donnés, ce qui correspond précisément à ce que Tarde (1890) appelait « imitation logique » :

« [...] les causes sociales sont de deux sortes : logiques ou non logiques. Cette distinction a la plus grande importance. Les causes logiques agissent quand l'innovation choisie par un homme l'est parce qu'elle est jugée par lui plus utile et plus vraie que les autres, c'est à dire plus d'accord que celles-ci avec les buts et les principes déjà établis en lui (par imitation toujours). »

Remarquons le « *par imitation toujours* », que Tarde glisse au passage entre parenthèses, et qui est au cœur de notre problématique.

Enfin, un dernier argument justifie le choix de *P3* contre *P3'*, dans la mesure où on admet *P2*. Le caractère trop bien réglé de la substitution réflexive telle qu'elle est décrite ne doit pas nous tromper. Elle n'est que l'approximation sous forme d'un processus instantané d'un phénomène qui peut avoir une certaine épaisseur temporelle. Les êtres humains n'ont pas une borne cognitive physique au-delà de laquelle toute volonté est effacée, mais plutôt un ensemble d'objectifs qu'ils peuvent garder plus ou moins présents à leur mémoire. Pour obtenir quelque chose, nous sommes capables d'effectuer des détours extrêmement longs qui passent par l'adoption de buts intermédiaires. Nous gardons dans ce cas-là en arrière plan, les buts initiaux qui nous servent à donner sens à notre action. Quelqu'un peut temporairement décider de s'engager dans une activité chronophage, comme par exemple monter une start-up, avec l'idée de gagner assez d'argent pour pouvoir par la suite passer une large partie de son temps auprès de ses proches. Pour prendre un autre exemple (Dupuy et Robert 1976), un individu peut décider de mettre en oeuvre tous les moyens nécessaires pour acquérir le véhicule qui lui permettra de gagner du temps dans ses déplacements.

Le danger pour le but initial est d'être oublié en cours de route. Le nouveau chef d'entreprise peut prendre goût à ses nouvelles activités, voir à l'horizon des profits

considérables qui le poussent à toujours reporter la vente de son entreprise, être obligé de prendre des engagements sur le long terme pour préserver son investissement initial, etc., sacrifiant ses proches à une vie frénétique. La voiture tant désirée pour sa vitesse, peut avoir nécessité tant d'heures de travail pour son acquisition qu'elle en dessert l'objectif initial⁵⁹, sa possession n'ayant désormais de sens que si elle est une fin en soi. Ainsi, il est très courant que le détour se révèle être un détour d'objectifs plutôt qu'un détour de moyens. Si nous contractons par la pensée le temps de cette opération, nous obtenons de façon stylisée la mise à jour réflexive que nous avons décrite.

Tout ceci nous amène à penser que, dans une tentative de formalisation nécessairement simplificatrice des dynamiques sociales, l'hypothèse *P3* est plus à même que l'hypothèse *P3'* de nous garantir que les dynamiques intéressantes seront conservées dans l'opération.

III.1.C.d L'imitation est-elle une métarègle ?

L'imitation est-elle une métarègle ? Ce point délicat mérite un paragraphe. Peut-on dire que nos agents ont pour méta-métarègle l'imitation en vertu du fait que, quoi qu'ils fassent, ils restent mimétiques ?

Dans tout système dynamique, il existe un invariant, mais est-ce pour autant que cet invariant doit être considéré comme une métarègle ? Dans ce que nous proposons, l'invariant est clairement un principe d'imitation : « imite la stratégie de l'agent que tu estimes être le meilleur ». Il nous semble cependant difficile de dire que ce principe est une métarègle sur la stratégie étant donné qu'ici, « meilleur » n'est pas défini, c'est une variable muette. Considérons la phrase suivante : « imite la stratégie de l'agent que tu estimes être *X* ». Personne n'admettrait cela comme règle, sauf à considérer que *X* ne peut prendre qu'une seule valeur et que par conséquent, ce n'est pas une variable muette. Quand bien même nous remplacerions cette phrase par « imite la stratégie de l'agent que tu auras choisi suivant tes propres critères » nous ne serions pas plus avancés.

Ce principe d'imitation doit être comparé au principe invariant d'éduction de la théorie des jeux : « choisis la stratégie dont tu prédis qu'elle sera la meilleure » (*cf.* encart 12). Ici comme là, il n'y a pas de notion de meilleur prédéfinie, mais seulement un ensemble de

⁵⁹ Ainsi Dupuy et Robert rapportent dans leur ouvrage le calcul « bizarre » suivant: si l'on additionne toutes les heures que consacre le Français moyen à sa voiture entre ses déplacements, tous types confondus, le temps passé à l'entretenir et le temps passé à travailler pour pouvoir l'acquérir, et que l'on rapporte cela au nombre de kilomètres parcourus, tous types de trajets confondus, on trouve que le Français moyen se déplace en fin de compte plus lentement que s'il roulait à vélo.

notions formulables par l'agent, délimité par le pouvoir d'expression de son langage. Ces principes doivent donc avoir à nos yeux un caractère ontologique, ils définissent la nature des agents, la physique du système au sein de laquelle pourront être écrites les règles d'organisation. Un retour historique nous permettra de mieux comprendre ce point. Une distinction importante sur laquelle insiste Ashby (1962) est celle entre l'espace-produit (*product space*), qui est l'ensemble des possibles, et le sous-ensemble de cet espace constitué des points qui sont actualisés, et qui représentent le « monde réel ». La présence d'une « organisation » est alors équivalente à l'existence d'une contrainte (*constraint*) au sein de cet espace-produit. La caractéristique principale de cet espace-produit est de contenir plus que ce qui existe effectivement dans le monde réel, ce dernier étant le sous-ensemble délimité par les contraintes. Le choix de l'espace-produit pertinent exprime une certaine liberté du modélisateur :

The real world gives the subset of what *is*; the product space represents the uncertainty of the *observer*. The product space may therefore change if the observer changes; and two observers may legitimately use different product spaces within which to record the same subset of actual events in some actual thing. The “constraint” is thus a *relation* between the observer and thing; the properties of any particular constraint will depend on both the real thing and on *the observer*. It follows that a substantial part of the theory of organization will be concerned with *properties that are not intrinsic to the thing but are relational between observer and thing*⁶⁰.

Dans le cadre d'une théorie de l'auto-organisation, notre hypothèse est que l'espace-produit doit également inclure *un ensemble de règles d'organisation possibles*. Le principe d'imitation ou le principe de maximisation de l'utilité espérée ne sont pas des méta-métarègles, ce sont des éléments participants à des descriptions d'espaces produit différents, qui sont des choix de modélisation. Nous pouvons d'ailleurs raisonnablement penser que le monde réel est contenu dans un espace-produit bien plus large, qui contient au moins le produit de ces deux espaces-produits, raison pour laquelle nous avons souvent insisté sur le fait que ce que nous considérons ici n'est que la projection de cet espace-produit plus grand sur celui plus restreint que décrit le principe d'imitation.

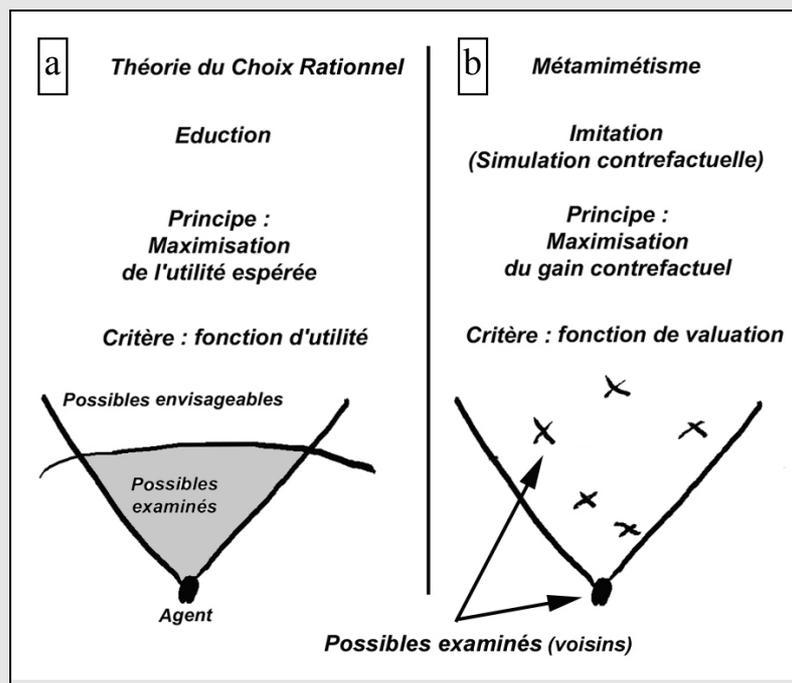
⁶⁰ « Le monde réel donne le sous-ensemble de ce qui *est* ; l'espace-produit représente l'incertitude de l'*observateur*. Par conséquent, l'espace-produit peut changer si l'*observateur* change ; et deux observateurs peuvent légitimement avoir recours à des espaces-produits différents au sein desquels ils enregistreront le même sous-ensemble de faits réels concernant un objet réel. La « contrainte » est donc une *relation* entre l'*observateur* et l'*objet* ; la propriété d'une quelconque contrainte particulière dépendra à la fois de l'*objet* réel et de l'*observateur*. Il s'ensuit qu'une part substantielle de la théorie de l'organisation aura à s'intéresser à *des propriétés qui ne sont pas intrinsèques à l'objet mais qui sont relationnelles entre l'observateur et l'objet*. », Ashby 1962*, italiques de l'auteur.

En ces termes, notre démarche actuelle consiste à démontrer que dans un espace-produit qui inclut le principe d'imitation, il peut y avoir effectivement auto-organisation au sens d'émergence spontanée d'un sous-ensemble contraint. Cette contrainte s'exprime par une distribution endogène des règles de comportements qu'adoptent les entités qui constituent le système étudié (*cf. I.3.B.c*). Une autre manière de voir les choses est de dire que nous avons une auto-organisation à partir d'un substrat dont les éléments partagent la propriété d'être des règles d'imitation. De ce point de vue, il n'y a pas besoin d'ajouter une règle d'organisation à ce substrat, les éléments de ce substrat modifiant d'eux-mêmes leur structure interne au contact les uns des autres.

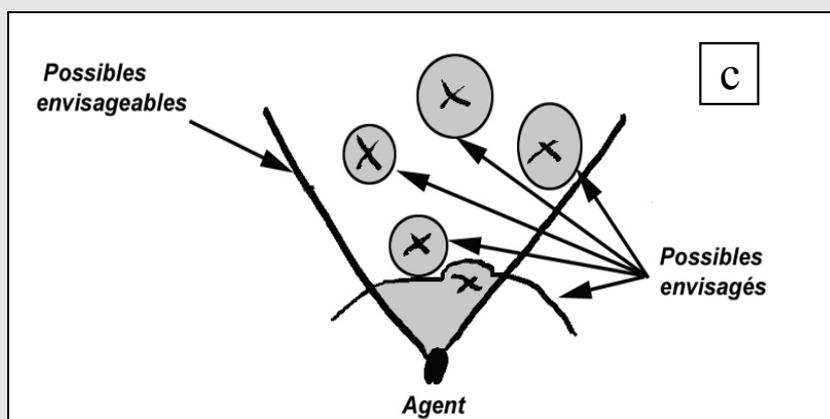
L'imitation et l'éduction : deux principes de la prise de décision

Pour comprendre en quoi l'imitation peut être vue comme un principe et non comme une métarègle, nous pouvons la comparer à un autre grand principe utilisé dans les théories de la décision, la *maximisation de l'utilité espérée* : « choisis la stratégie dont tu prédis qu'elle sera la meilleure ». La maximisation de l'utilité espérée s'appuie sur l'éduction, tout comme le principe d'imitation s'appuie sur la simulation contrefactuelle. Dans son expression formelle, la fonction de valuation est alors l'analogue de la fonction d'utilité. Cette analogie permet de formuler assez précisément la différence entre l'imitation et l'éduction.

- Lors d'une prise de décision éductive (figure a), un agent a devant lui l'ensemble des possibles qu'il est susceptible d'envisager. Cet ensemble dépend des connaissances de l'agent et de la richesse des concepts qu'il est susceptible de manipuler (résultant d'un apprentissage). Si l'on respecte les contraintes de rationalité limitée proposées par Herbert Simon, un agent ne considèrera qu'un sous-ensemble limité de ces possibles envisageables. Il choisira alors parmi ces possibles envisagés, l'action qui maximise son utilité.
- Lors d'un processus d'imitation (figure b), un agent a devant lui un ensemble de modèles potentiels. Les descriptions de ceux-ci sont le résultat d'un processus d'inférence (*cf.* encarts 11), et en ce sens, elles sont également contraintes par l'ensemble des possibles que l'agent est susceptible d'envisager. Il choisit alors d'imiter la stratégie qui maximise son gain contrefactuel.



Ces deux modèles de prise de décision ne sont, bien entendu, que des schématisations de processus bien plus complexes. Ils ne sont d'ailleurs pas fondamentalement distincts ; nous pourrions très bien penser la maximisation de l'utilité espérée comme une simulation sur des possibles imaginés. Ceci nous amènerait à considérer que l'ensemble des possibles examinés par un agent dans un processus éductif, contient les possibles suggérés par ses voisins. L'imitation propose donc des points d'ancrage pour l'exploration des possibles dans un processus éductif (figure c).



Cette comparaison nous permet d'envisager l'imitation comme *un principe*, au même titre que la maximisation de l'utilité espérée. Ce n'est donc pas une métarègle.

Profitons également de ce rapprochement pour souligner qu'en ce qui concerne les processus d'imitation décrits ici, la fonction de valuation, et plus généralement la définition formelle de l'imitation que nous avons proposée, n'est qu'une des représentations possibles de ces processus. Le rapprochement que nous faisons entre fonction d'utilité et fonction de valuation ne signifie pas que nous modélisons les comportements humains comme des comportements d'optimisation, mais qu'il est possible de représenter formellement une procédure de choix quelconque en prenant comme intermédiaire la maximisation d'une fonction bien choisie.

Par exemple, du point de vue de l'agent, il est absurde de dire qu'un individu conformiste cherche à maximiser une certaine fonction. En revanche, du point de vue du modélisateur, le conformisme peut être représenté comme l'adoption du trait qui a la plus forte densité dans la population. Le recours à des objets tels que la fonction de valuation n'est qu'un codage particulier pour représenter certains phénomènes. Mais ce n'est pas pour autant que les phénomènes que nous représentons par ce codage héritent nécessairement de la sémantique qui lui est généralement associée. Pour prendre une analogie, il est possible de coder *La Flûte Enchantée* sur un disque compact. Ce n'est pas pour autant que cette œuvre devient une suite de 0 et de 1.

III.1.C.e L'espace des états du système

La description de l'espace-produit, qui est l'espace des états possibles d'un système, doit faire l'objet d'une attention particulière. Nous nous placerons pour cette description au niveau individuel, l'agent en tant que système présente une particularité remarquable : l'espace de ses états et l'espace des dynamiques sur ces états sont confondus du fait qu'en un certain endroit, une règle est sa propre métarègle. Formulé dans les termes de la théorie des jeux, nous pouvons dire qu'il y a coalescence des stratégies et des méta-stratégies. La détermination de l'espace des stratégies possibles est donc le point le plus important dans une perspective d'approche des systèmes sociaux par la modélisation, car il détermine également l'espace des dynamiques possibles au niveau de l'agent. Nous proposons ici quelques principes généraux sur la forme de l'espace des états du système, naturellement suggérés par la définition que nous avons adoptée de l'imitation.

Commençons par un exemple. Les trois règles les plus couramment utilisées dans les premiers modèles de l'émergence de la coopération sont *défecteur inconditionnel*, *coopérateur inconditionnel*, *Tit-for-Tat* et *Chicken*⁶¹. Puis sont venus des ensembles de stratégies plus complexes, définis par l'ensemble des stratégies possibles avec une mémoire à 1 coup (Nowak & Sigmund 1993a), ou l'ensemble des stratégies pouvant être définies par un automate de taille finie (voir par exemple Lindgren & Johansson 2002). Le principe général qui se dégage de ces exemples est que l'ensemble des stratégies considéré doit présenter une certaine symétrie : pour une stratégie d'une complexité donnée appartenant à l'ensemble, toutes les stratégies d'une complexité équivalente doivent également appartenir à l'ensemble. En effet, si par exemple ces stratégies représentent de façon stylisée des comportements humains, il n'y a pas de raison pour qu'un individu puisse suivre une certaine stratégie mais ne soit pas capable de suivre une stratégie de complexité équivalente. Si donc une stratégie doit être éliminée, la cause doit en être la dynamique du système et non un *a priori* du modélisateur⁶².

Nous prendrons également ce principe dans la plupart des exemples de systèmes métamimétiques que nous allons étudier, ceci se traduira par le fait qu'un espace de règles pourra être décrit comme l'espace engendré par un certain ensemble de capacités cognitives

⁶¹ Chicken est la règle symétrique de Tit-for-Tat : elle coopère lorsque le partenaire a fait défection au coup précédent, et fait défection dans le cas contraire. Cette stratégie est vite éliminée dans le cadre d'une dynamique des répliqueurs et ne présente donc qu'un intérêt limité. C'est la raison pour laquelle elle est peu évoquée.

⁶² Cela n'aurait pas de sens, par exemple, d'expliquer la coopération par le fait que les coopérateurs sont plus intelligents que les défecteurs et peuvent se reconnaître entre eux.

(voir également encart 9). De même que la grammaire et la syntaxe définissent un ensemble de phrases possibles, certains principes générateurs ou capacités cognitives formelles définiront un ensemble de règles possibles.

Ceci est important car il est très différent de décrire un espace par la liste de ses éléments ou par des principes générateurs. Dans le premier cas, la liste est nécessairement finie, dans le deuxième cas, l'ensemble engendré peut être infini. Dans le premier cas, l'ensemble n'est pas structuré, dans le deuxième cas, il est caractérisé par des invariants. Pour des raisons de clarté et de contraintes de programmation, les espaces de règles que nous allons considérer dans nos exemples seront extrêmement simples et finis. Il ne faudra pas cependant oublier que ces espaces ne sont pas des listes. De même qu'il est absurde de dire qu'un individu connaît toutes les phrases possibles parce qu'il connaît la grammaire et la syntaxe, cela n'aurait pas de sens d'envisager que les fonctions de transition qu'adopte un agent au cours de son évolution sont déjà contenues dans la fonction initiale. Cela serait confondre comprendre et connaître.

Pour prendre un exemple, lorsque nous avons envisagé la transition entre une règle *maxi* et une règle *conformiste* (III.1.C.d), la règle *conformiste* pouvait effectivement être une règle totalement nouvelle pour l'agent, jamais envisagée, mais qu'il avait cependant pu inférer à partir du comportement de ses voisins. En ce sens, il y a réellement eu du point de vue de l'agent une transformation discontinue d'une dynamique déterminée par certaine fonction f en une dynamique déterminée par une certaine fonction g .

III.1.C.f Entre couplage par input et couplage par clôture

D'après ce qui précède, nous allons voir que les dynamiques des jeux métamimétiques sont des exemples des dynamiques évoquées dans l'introduction à cette partie. Examinons par exemple, le cas d'un jeu métamimétique entre des agents de borne cognitive égale à I déterminés par un comportement b et une règle d'imitation r . Etant donné un ensemble d'états S , nous noterons ici Φ l'ensemble des dynamiques possibles sur S .

Dynamique I. : Point de vue de l'individu

$$\Phi \times I_f \times S \rightarrow \Phi \times S$$

$$(f, i_t, s_t) \rightarrow (g, s_{t+1}), i_t \in I_f$$

Considérons un système défini par une chaîne métamimétique (un agent). L'état du système est la donnée des traits modifiables aux différents niveaux, les inputs étant les traits perçus par l'agent. La dynamique I est alors une description de l'évolution de la chaîne métamimétique de l'agent. Ce type de transition est en effet ce que nous rencontrons lorsque, par exemple, un agent maximisateur de borne cognitive I devient conformiste après avoir observé que c'est la métarègle la plus performante du point de vue des gains. La règle *maxi* (f) et la règle *conformiste* (g) ont des formes fonctionnelles très différentes et des espaces d'input distincts puisque la règle *conformiste* ne considère pas les gains comme pertinents, alors que ceux-ci sont fondamentaux pour la règle *maxi*. En ce sens, les agents *conformistes* et *maxi* vivent dans des mondes radicalement différents. De plus, la transition entre les deux types de dynamiques ne s'effectue ni au hasard ni suivant des critères externes mais bien selon des critères déterminés par f . Enfin, l'espace des inputs est très important puisque c'est de là que vient, par imitation, la nouvelle forme fonctionnelle.

Nous pouvons alors réécrire la dynamique de manière plus rigoureuse en introduisant la fonction *Apply*, A , telle que $A(f,x)=f(x)$, et le projecteur P_{-I} qui à une chaîne métamimétique $s=(b,r)$ associe la règle r .

Dynamique I. : Point de vue de l'individu

$$\xi: I_r \times S \rightarrow S$$

$$(i_t, s_t) \rightarrow A(P_{-I}(s_t), (i_t)) = s_{t+1}, \text{ avec } r = P_{-I}(s_t) \text{ et } i_t \in I_r \text{ (input de } r)$$

L'invariant de la dynamique est donc la composition d'un *Apply* avec un projecteur. Du point de vue du système, une nouvelle dynamique n'est adoptée que si elle est plus cohérente que la dynamique courante, du point de vue de la dynamique courante.

Pour conclure nous mettrons en relation cette approche de la dynamique individuelle avec la notion d'autonomie que Cornelius Castoriadis (1983) envisageait comme «*un état où « quelqu'un » - sujet singulier ou collectivité - est auteur de sa propre loi explicitement et, tant que faire se peut, lucidement (non pas « aveuglement »). Cela implique [...] qu'il instaure un rapport nouveau avec sa « loi », signifiant, entre autres, qu'il peut la modifier sachant qu'il le fait*». Notons que Castoriadis a également utilisé en ce sens le terme d'auto-constitution, ceci afin d'éviter la confusion avec une notion d'autonomie plus proche de la conception de Varela, qui envisage un système autonome comme une unité fonctionnant sur elle-même et pour elle-même. Le passage suivant est encore plus éclairant :

L'autonomie, ce n'est pas la clôture, mais l'ouverture ; ouverture ontologique, possibilité de dépasser la clôture informationnelle, cognitive et organisationnelle qui caractérise les êtres auto-constituants, mais *hétéronomes*. Ouverture ontologique, puisque dépasser cette clôture signifie altérer le «système» cognitif et organisationnel déjà existant, *donc* constituer son monde et soi selon des lois *autres, donc* créer un nouvel *eidos* ontologique, un soi autre dans un monde autre.

Cette possibilité n'apparaît, que je sache, qu'avec l'humain. Elle apparaît comme possibilité de remettre en cause, non pas aléatoirement ou aveuglement, mais sachant qu'on le fait, sa propre loi, sa propre institution lorsqu'il s'agit de la société.

Même si les concepts employés ici méritent de plus amples commentaires, comment ne pas suggérer à la suite d'une simple lecture, que les principes d'organisation que nous avons évoqués, qui permettent à un agent d'emprunter une nouvelle dynamique à un « extérieur » du moment qu'elle fait sens pour lui, puissent être un cas particulier de ce qu'envisage Castoriadis ?

Dynamique 2) : Point de vue du collectif

$$\Phi \times \mathcal{S}^N \rightarrow \Phi \times \mathcal{S}^N$$

$$(f, \sigma_t) \rightarrow (g, \sigma_{t+1}) \text{ avec } f \subset \sigma_t \text{ et } g \subset \sigma_{t+1}$$

Ce type de dynamique est obtenu lorsque nous considérons comme système l'ensemble composé de tous les agents. L'état du système est alors défini par la donnée des traits modifiables de tous les agents et des relations de voisinage qu'ils établissent, c'est-à-dire la description des inputs pour chacun des sous-systèmes que constituent les agents en termes de traits modifiables observés chez les autres agents. La dynamique f du système est alors la donnée de l'ensemble des traits modifiables qui ont le statut de règle d'imitation, et des relations de voisinage qu'ils établissent. f n'a pas d'input, à moins de considérer que la topologie de l'espace est un input.

Si nous considérons la topologie définie par Γ comme une donnée (Γ constante), Γ_i étant l'ensemble des voisins de l'agent i , la seule donnée de Γ et de l'état du système σ nous permet de déterminer pour chaque agent i l'ensemble des traits perçus $(\tau_i, \tau_{\cdot i})$. Pour alléger les notations, nous noterons par extension $\Gamma(s_i) = (\tau_i, \tau_{\cdot i}) = \{\tau_k, k \in \Gamma_i\} \in T_{p,i}$. Dans cette notation, la fonction Γ reconstitue donc les traits perçus par les agents à partir de l'état du système.

Nous pouvons alors réécrire de manière plus rigoureuse cette dynamique en introduisant les projecteurs $P_i : \mathcal{S}^N \rightarrow \mathcal{S}$, $\sigma \rightarrow s_i$ et en notant P_{-i} le projecteur permettant d'obtenir la règle à partir d'une stratégie $s = (b, r)$ (i.e. $P_{-i}((b, r)) = r$).

Dynamique 2) : Point de vue du collectif :

$$\mathcal{E} : \mathcal{S}^N \rightarrow \mathcal{S}^N$$

$$(\sigma_t) \rightarrow (A(P_{-1}(P_1(\sigma_t)), \Gamma(P_1(\sigma_t))), \dots, A(P_{-N}(P_N(\sigma_t)), \Gamma(P_N(\sigma_t))))$$

L'invariant de la dynamique est donc encore la composition de la fonction *Apply* avec des projecteurs qui constitue ce que nous pourrions appeler un *Apply* spatialisé.

Nous voyons ici que ce type de dynamique est un couplage par clôture très particulier puisque la dynamique du système est une partie de l'état du système, qui est donc amenée à changer spontanément, *sans l'effet de perturbations extérieures*. En ce sens, le passage de f à g peut-être interprété comme un calcul topologique.

Soulignons enfin la différence avec des systèmes du type automates cellulaires, tels ceux que nous avons vus dans Nowak et May : dans ce cas-là, si l'on considère l'ensemble des automates comme un seul système, nous éliminons effectivement les inputs, mais la dynamique n'est pas pour autant un état du système dans la mesure où elle ne change pas (les agents sont maximisateurs relativement aux gains et ils le restent).

Il nous faut relever ici le caractère enchevêtré des dynamiques 1 et 2. La dynamique au niveau de l'individu n'a aucun sens si l'on ne tient pas compte du collectif dans lequel il est plongé, qui est susceptible de lui apporter de nouvelles règles de transition. Par ailleurs, la moindre décision individuelle - et cela est dû au fait que nous avons isolé les comportements mimétiques d'autres types de prise de décision - nécessite la prise en compte des comportements des voisins. Un individu ne cessera d'imiter que si à chaque fois qu'il se met contrefactuellement à la place de l'un de ses voisins, la situation de ce dernier est ressentie comme moins bonne que la sienne. Les variations des comportements d'un individu ne peuvent donc être comprises qu'en tenant compte du collectif auquel il appartient.

D'un autre côté, la dynamique collective est une structure spatio-temporelle qui reflète l'auto-cohérence des règles d'imitation du point de vue des individus. L'évolution d'un sous-ensemble de règles au niveau de la population ne peut être comprise qu'en revenant au niveau des individus et en examinant le degré de cohérence des nouvelles règles du point de vue de leurs propres règles. Ce degré de cohérence n'a pas de sens prédéfini, il est construit par le système au cours de son évolution. Ainsi, nous ne pouvons pas dire, comme c'est le cas pour la dynamique des réplicateurs, qu'une stratégie envahira le système pour autant que sa fitness soit suffisamment élevée, car la notion de fitness n'est pas définie à l'avance. Par exemple, dans un dilemme du prisonnier métamimétique où la métarègle *maxi* est dominante, une stratégie pourra se répandre si elle est assez performante au jeu, ce sera l'inverse si la règle d'imitation dominante est la règle *mini*, et la situation sera encore différente si la population est conformiste dans son ensemble. Tout cela ne veut pas dire que l'évolution d'un système métamimétique est imprédictible, nous allons voir des exemples où il est possible de prédire l'évolution du système, simplement cette évolution ne sera pas prédite par l'optimisation d'une grandeur définie indépendamment de l'espace des métarègles.

III.1.D Les métadynamiques

Pour conclure ce chapitre, nous développons les concepts de stabilité pertinents pour les systèmes métamimétiques. Ceci nous permettra par la suite d'étudier la dynamique des systèmes métamimétiques.

Nous dirons qu'un agent est insatisfait s'il se trouve dans une situation où l'un de ses voisins est meilleur que lui suivant l'un des critères qu'il s'est donnés. Ainsi, en cherchant l'origine de cette différence et en essayant d'imiter ce meilleur voisin suivant la dimension pertinente, l'agent cherche à réduire son insatisfaction engendrée par sa situation courante. Mais cette insatisfaction n'est pas intrinsèque à son état, elle est le résultat d'une comparaison avec un autre.

Cette minimisation de l'insatisfaction est en quelque sorte la notion miroir de la maximisation de la satisfaction ou des gains en théorie des jeux. Dans le premier cas, l'agent prend une décision après avoir observé les conséquences de toute une série d'événements pour sortir ainsi d'une situation qui ne lui convient pas, dans le deuxième cas, l'agent prend des décisions d'après des anticipations sur les événements futurs et afin d'atteindre l'état qui lui convient le mieux. L'imitation est suscitée par ce qui existe, l'éducation est attisée par ce qui n'existe pas encore. L'imitation cherche à corriger le passé - « j'aurais dû être comme lui et je vais le devenir » - l'éducation cherche à infléchir le futur.

Ces deux processus de décision sont bien entendu complémentaires et sont utilisés en parallèle par tout un chacun. Notre emphase sur les phénomènes mimétiques ne doit pas nous faire oublier qu'elle n'est qu'au service de la clarté d'une démonstration, l'autre volant de la décision individuelle, l'éducation, étant tout aussi important pour la compréhension des dynamiques sociales. De même que la théorie économique et la théorie des jeux s'appuient sur une notion d'optimisation des gains pour écrire les équations de leurs dynamiques, nous allons développer à des fins similaires la notion d'insatisfaction. Contrairement à la notion de gains, le critère d'insatisfaction n'est pas prédéfini mais évolue dynamiquement.

III.1.D.a L'insatisfaction



On vit une époque formidable, Jean-Marc Reiser - Editions Albin Michel

Comme nous allons le voir, la notion d'insatisfaction va nous permettre d'aborder naturellement les jeux métamimétiques sous l'angle des systèmes dynamiques. Toutes les définitions que nous allons proposer envisagent les jeux métamimétiques dans leur aspect dynamique. Nous considérerons des populations discrètes évoluant en temps discret. Commençons par définir formellement l'insatisfaction.

Définitions :

Insatisfaction : Soit $s_i(t) = (r_0, r_1, \dots, r_k)$ la chaîne métamimétique d'un agent i au temps t , r_k étant le trait modifiable de niveau k , nous dirons que i est *insatisfait* au temps t si l'un de ses voisins j , possédant une chaîne $s_j \neq s_i$ est évalué par i comme strictement meilleur que i , c'est à dire $v_i(s_j, s_j) > v_i(s_i, s_i)$, v_i étant la fonction de valuation de i et $\sigma = (s_i, s_i) = (s_j, s_j)$ décrivant l'état de la population au temps considéré.

L'*insatisfaction* $F_s^t(s')$ d'une chaîne métamimétique s par comparaison avec une chaîne s' est la probabilité pour qu'un agent ayant adopté la chaîne s se retrouve insatisfait par comparaison avec un agent utilisant la chaîne s' au temps t , et change sa règle pour s' .

Nous pouvons alors définir l'insatisfaction d'une chaîne s :

$$F_s^t = \sum_{s' \neq s} F_s^t(s')$$

probabilité pour qu'un agent possédant la chaîne s soit insatisfait après une comparaison avec l'un de ses voisins, et change de règle.

Par extension, nous définirons de la même manière l'insatisfaction d'une tête de chaîne métamimétique s comme la probabilité pour que la partie supérieure d'une chaîne métamimétique finissant par s soit modifiée (i.e. s désigne les buts de plus haut niveau). Nous pourrions parler par exemple de l'insatisfaction d'un agent ($maxi, D$) tout comme de l'insatisfaction de la règle $maxi$.

Insatisfaction relative : L'insatisfaction est une donnée locale. Pour comprendre la dynamique de manière globale, nous avons besoin de pouvoir comparer les insatisfactions des différentes populations de chaînes métamimétiques en tenant compte de leurs proportions. L'idée est qu'une distribution de chaînes métamimétiques de type c sera en équilibre si en moyenne, il y a autant de nouveaux agents qui adoptent s , que d'agents qui abandonnent s pour une autre chaîne métamimétique. Nous dirons alors que l'insatisfaction relative de s est nulle. En notant p_s^t la proportion de chaînes de type s au temps t , nous obtenons alors la définition :

$$\hat{F}_s^t = p_s^t \cdot F_s^t - \sum_{s' \neq s} p_{s'}^t \cdot F_{s'}^t(s)$$

Ce qui peut s'écrire sous la forme d'une équation d'évolution :

$$\Delta p_s^t = p_s^t \cdot F_s^t - \sum_{s' \neq s} p_{s'}^t \cdot F_{s'}^t(s)$$

Cette équation est l'équation pilote des systèmes métamimétiques. Elle concerne des *processus dynamiques en temps discret sur des populations discrètes*. Elle a la forme classique d'une équation-bilan et n'acquiert tout son sens qu'en considérant la notion d'insatisfaction.

En première approche, nous pouvons dire que cette dynamique rentre dans le cadre général des processus de Markov, l'espace des états pouvant être très grand puisque, lorsque les voisinages sont tous différents, celui-ci est de taille $|S|^N$ (nombre de stratégies possibles à la puissance du nombre d'agents). Dans la plupart des cas, il ne sera bien entendu pas question d'écrire la matrice de transition du processus de Markov associé étant donné que le nombre d'états possibles dépasse très vite le nombre d'atomes dans l'univers ($\sim 10^{80}$). Nous allons voir cependant que le fait d'envisager les dynamiques métamimétiques comme des

processus de Markov va nous permettre de formaliser de façon assez précise la relation entre la dynamique interne d'un système métamimétique et les perturbations.

Pour des raisons de clarté, nous n'avons pas fait intervenir les configurations spatiales dans l'équation précédente. Cependant, l'insatisfaction étant largement dépendante de ces configurations spatiales, il est bien entendu que *l'espace est toujours implicite dans ces équations*. Il peut être nécessaire de le faire intervenir en catégorisant les différentes configurations que rencontrent les agents possédant un même type de chaîne. Pour cette raison, ces équations ont un aspect théorique plus que pratique, la connaissance de la structure spatiale de la population étant souvent trop partielle. Nous verrons cependant au III.2.C que des approximations de ces équations peuvent caractériser de manière assez précise les dynamiques.

Dans le cas de jeux bruités, cette équation sera modifiée par l'ajout d'un terme stochastique $\eta \in [0, 1]$ vérifiant $\sum_s \eta^t(s) = 0$:

$$\Delta p_s^t = -p_s^t \cdot F_s^t + \sum_{s' \neq s} p_{s'}^t \cdot F_{s'}^t(s) + \eta^t(s)$$

Nous aurons alors un processus de Markov perturbé.

III.1.D.b La réplication par imitation

Les processus dynamiques que ces équations définissent appartiennent à la catégorie des réplifications par imitation (Weibull 1995). Ils ne correspondent cependant à aucune des catégories d'imitation proposées, et nous allons voir que contrairement aux types d'imitation déjà étudiés, ils ne sont pas assimilables aux dynamiques de type de réplicateurs déjà proposées.

Weibull (1995) donne une description très générale des modèles mimétiques en théorie des jeux évolutionnistes. Le type de modèle le plus proche des jeux métamimétiques sont les jeux à populations multiples. Dans ce type de modèle, la population totale est divisée en n populations jouant à un jeu à n -joueurs. Au sein d'une population i , les agents peuvent adopter des stratégies différentes dans un ensemble S_i . A chaque stratégie $s \in S_i$, l'ensemble σ des stratégies dans la population étant fixé, chaque agent associé à un joueur utilisant la stratégie s_k un gain $u_i(s_k, s_{-k})$, qui dépend de la population i à laquelle il appartient. u_i est donc l'équivalent de ce que nous avons appelé fonction de valuation v et le gain $u_i(s_k, s_{-k})$ est

l'équivalent du gain $v_i(s_k, s_{-k})$. La différence réside dans le fait que chez Weibull, l'indice i désigne la population à laquelle appartient l'agent alors que dans notre notation, cet indice désigne l'agent lui-même. Cependant, dans les processus de réplication par imitation, les agents n'ont pas la possibilité de changer de population et ne s'imitent qu'entre agents d'une même population, alors que dans ce que nous proposons, la forme fonctionnelle de v_i peut être modifiée au cours du temps ce qui est l'analogie d'un changement de population. Ainsi, les modèles standards de réplication par imitation travaillent à taille de populations constante. Les agents ne changent pas de point de vue, ils ne peuvent pas changer leur définition de *meilleur*.

La différence entre approche métamimétique et théorie des jeux évolutionnistes dans sa forme actuelle apparaît clairement dans la classification générale des classes de dynamiques de sélection qu'établit Weibull. La plus large classe qu'il présente est celle des dynamiques régulières de sélection (*regular selection dynamics*) qui se décompose en quatre sous-classes distinctes : *payoff-monotonic*, *payoff-positive*, *payoff-linear* et *weakly-payoff-positive*. Comme le révèle le préfixe *payoff* devant les noms de ces classes, et qu'une étude plus approfondie confirme, tous ces types de dynamiques considèrent qu'une fonction exogène de gain est donnée de manière définitive aux agents, leur vie ne consistant plus qu'à optimiser d'une manière ou d'une autre cette fonction. Malgré la présence de processus mimétiques, il n'y a donc pas dans les modèles évolutionnistes présentées par Weibull de construction sociale de points de vue.

III.1.D.c La dynamique des réplicateurs

Le modèle le plus répandu parmi les jeux évolutionnistes est la donnée d'un jeu répété où des agents, de complexité cognitive variable, ont une durée de vie finie et sont remplacés au cours du jeu. Dans ce type de jeu, chaque agent se voit attribuer un score que l'on appelle *fitness*, qui détermine son taux de reproduction à chaque période. La *fitness* de chaque individu est donnée par une fonction globale, la fonction de *fitness*, qui prend en argument l'état du système. Ce type de dynamique s'appelle dynamique des réplicateurs (Hofbauer & Sigmund 1988). Comme le montre Weibull, il existe un lien fort entre les dynamiques de réplication par imitation qui ont été proposées jusqu'alors et la dynamique des réplicateurs, les premières étant d'une certaine manière réductibles à cette dernière. Or il est facile de montrer que les dynamiques métamimétiques ne sont pas en général réductibles à une

dynamique de réplicateurs standard. Plus précisément, nous avons la proposition (preuve en annexe) :

Proposition : *La dynamique des réplicateurs discrète correspond au cas particulier d'un jeu métamimétique avec une seule métarègle sur un graphe complet.*

Autrement dit, il n'est pas possible d'exprimer les dynamiques métamimétiques dans les formalismes proposés actuellement par la théorie des jeux évolutionnistes.

Ceci étant, nous pouvons établir une première comparaison entre les dynamiques métamimétiques et la dynamique des réplicateurs :

- 1) La dynamique des réplicateurs standard est un cas particulier de dynamique métamimétique.
- 2) Cette dynamique n'est pas représentative du cas général puisqu'elle correspond à un système métamimétique avec une unique métarègle. D'une certaine manière, nous pouvons parler de dynamique des réplicateurs mono-critère.

Notamment, la dynamique des réplicateurs mono-critère ne permet pas de prendre en compte une diversité endogène de points de vue, et la plupart des dynamiques métamimétiques ne sont pas réductibles à une dynamique des réplicateurs monocritère.

Quelques concepts de stabilité

L'équilibre de Nash

L'équilibre de Nash est l'un des concepts les plus importants de la théorie des jeux, c'est un type d'équilibre très recherché par les modélisateurs. L'équilibre de Nash est un état tel qu'aucun des joueurs ne peut changer de stratégie de manière à obtenir plus que ce qu'il n'a, étant donné la stratégie des autres joueurs. Formellement, cela se traduit de la manière suivante :

Soit S_i l'espace des stratégies du joueur i , $\sigma=(s_1, \dots, s_n)$ le n -uplet caractérisant l'ensemble des stratégies utilisées par les différents joueurs et $u_i(s_i, s_{-i})$ le gain du joueur i dans l'état $\sigma=(s_i, s_{-i})$; $\sigma^*=(s_1^*, \dots, s_n^*)$ est un équilibre de Nash si et seulement si : $\forall i, \forall s_i \in S_i, u_i(s_i, s_{-i}^*) \leq u_i(s_i^*, s_{-i}^*)$.

Le théorème fondamental démontré par Nash (1950) est que lorsque chaque S_i est compacte, il existe toujours un équilibre de Nash en stratégie mixte.

Les stratégies évolutionnairement stables

(ESS, *evolutionary stable strategy*)

Le concept jumeau de l'équilibre de Nash dans le cadre de la théorie des jeux évolutionnaires est l'état évolutionnairement stable (ESS, voir Hofbauer et Sigmund 1988). Dans ce cas, nous n'avons plus affaire à des joueurs qui choisissent une stratégie de manière éductive, mais à un ensemble d'agents caractérisés par une stratégie fixe, dont les populations évoluent en fonction d'une dynamique prédéfinie, le plus souvent du type dynamique des répliqueurs. En notant $u(x,y)$ le gain de la stratégie x lorsqu'elle est jouée contre la stratégie y , et en considérant que les agents se rencontrent au hasard, dans une population constituée d'une proportion $(1-\varepsilon)$ d'agents utilisant la stratégie x , et ε d'agents utilisant la stratégie y , le gain moyen d'une stratégie w sera $u(w, (1-\varepsilon).x + \varepsilon.y)$. Une population constituée entièrement de la stratégie x pourra résister à une invasion par un mutant utilisant la stratégie y si, dans une population de composition $(1-\varepsilon).x + \varepsilon.y$, le gain moyen de la stratégie x est supérieur au gain moyen de la stratégie y , pour ε assez petit. Cela se traduit par la condition :

$$\forall y \neq x, \exists \varepsilon_y > 0, \forall \varepsilon < \varepsilon_y, u(x, (1-\varepsilon).x + \varepsilon.y) > u(y, (1-\varepsilon).x + \varepsilon.y)$$

En particulier, il est facile de montrer que dans le cas où u définit un jeu symétrique entre deux populations, les ESS sont des équilibres de Nash.

Les équilibres stochastiquement stables

(SSE, *stochastically stable equilibrium*)

Les équilibres stochastiquement stables ont été introduits par Foster et Young (1990*). L'idée est de donner un concept d'équilibre dans le cas de dynamiques bruitées. Grosso modo, un état d'un système est un équilibre stochastiquement stable si sur le long terme, il est presque certain que le système restera à l'intérieur de tout voisinage de cet état lorsque le niveau de bruit tend vers zéro. Plus généralement, l'ensemble stochastiquement stable (SSS, *stochastically stable set*) est l'ensemble E des états tels que, sur le long terme, le système reste de manière

presque sûre à l'intérieur de tout voisinage ouvert contenant E lorsque le niveau de bruit tend vers zéro. Cette notion s'étend au cas où le niveau de bruit est fixé à une valeur non nulle. Dans ce cas, l'étude doit s'attacher au comportement de la distribution limite des états du système lorsque le temps tend vers l'infini. Cette distribution, lorsque le niveau de bruit tend vers zéro se concentre sur le SSS.

De manière plus rigoureuse, considérons un système constitué de N agents pouvant adopter des stratégies dans un ensemble fini S . Soit $\sigma(t)$ le vecteur des stratégies des agents à t qui définit l'état du système, et P^0 le processus de Markov non perturbé tel que $P^0_{\sigma\sigma'}$ est la probabilité pour que le système passe de l'état σ à l'état σ' . Modélisons les perturbations en supposant que chaque agent a une probabilité ε de choisir une stratégie au hasard dans S au lieu de suivre la dynamique P^0 . Ceci définit un processus de Markov perturbé P^ε qui est irréductible (car $\varepsilon > 0$) et récurrent (car le nombre d'états possibles est fini). D'après le théorème ergodique, P^ε admet une unique distribution stationnaire μ_ε . Le **théorème fondamental** concernant les SSS (voir Young 1993*, qui le démontre pour une classe de perturbations plus large) prouve que :

$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \mu_\varepsilon$ existe et converge vers une distribution μ_0 , qui est l'une des distributions stationnaires du processus P^0 (P^0 n'étant pas nécessairement irréductible, il peut y avoir plusieurs distributions stationnaires).

Il y a donc *sélection* d'une distribution stationnaire parmi toutes les distributions stationnaires compatibles avec le processus P^0 .

Un état σ est stochastiquement stable relativement au processus P^ε si et seulement si $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \mu_\varepsilon(\sigma) = \mu_0(\sigma) > 0$. L'ensemble stochastiquement stable (SSS) est alors l'ensemble des états formant le support de μ_0 .

Il n'y a pas pour le moment de formule simple pour trouver le SSS. Cependant, Young (1993*) montre qu'un état appartient au SSS si et seulement si il minimise un certain potentiel stochastique, et il propose un algorithme qui permettant de déterminer ce potentiel lorsque le système n'est pas trop complexe. Ce potentiel stochastique dépend de la *structure* des perturbations.

Ces résultats sont fondamentaux car ils déterminent le type de relation entre un processus structuré non perturbé P^0 et la forme des perturbations extérieures. Ainsi, étant donné un type de perturbation, le comportement du système en terme de fréquences de visite de ses états est déterminé sur le long terme de manière unique lorsque la force de ces perturbations tend vers 0. Le système visite un ensemble fixé d'états, chacun avec une fréquence bien déterminée, *cette fréquence étant le résultat du couplage entre la dynamique interne du système P^0 et la structure des perturbations*. Le comportement du système sur le long terme est alors *indépendant* des conditions initiales.

S'il peut ne pas y avoir de SSE, il y a toujours un SSS. Foster et Young (1990*) montrent par ailleurs, sur des exemples simples, qu'un ESS, même s'il est unique, n'est pas toujours un SSE ; et qu'il peut y avoir un SSS qui ne contienne pas l'unique équilibre de Nash de la dynamique non perturbée.

III.1.D.d Concepts de stabilité pour les jeux métamimétiques

Les définitions précédentes vont nous permettre de préciser les notions d'équilibre qui nous seront utiles par la suite. Nous devons distinguer la dynamique non bruitée, dont nous verrons un exemple au III.2.B, de la dynamique perturbée, dont nous verrons un exemple au III.2.C, les notions de stabilité dynamique étant très différentes dans chacun des cas.

III.1.D.d.i) Les dynamiques non bruitées

Dans le cas des dynamiques non bruitées, le concept intéressant de stabilité est très proche de la notion d'équilibre de Nash en théorie des jeux. Si nous regardons au niveau individuel, un agent sera dit *contrefactuellement stable* s'il ne peut pas s'imaginer être mieux qu'il n'est en se mettant contrefactuellement à la place de l'un de ses voisins (théorie de la simulation). Pour un agent i , cela se traduit par :

$$\forall j \in \Gamma_i, s_j \neq s_i \Rightarrow v_i(s_j, s_{-j}) \leq v_i(s_i, s_{-i}) \text{ avec } \sigma=(s_i, s_{-i}) = (s_j, s_{-j})$$

Pour tout voisin j de i , lorsque l'on prend le point de vue v_i de i , le gain contrefactuel associé à la stratégie s_j de j est inférieur ou égal au gain contrefactuel associé à la stratégie s_i de i , lorsque l'état du système est $\sigma=(s_i, s_{-i}) = (s_j, s_{-j})$.

Du point de vue des stratégies, le concept de stabilité contrefactuelle d'une stratégie s_i est l'analogie du concept de meilleure réponse (*best reply*) en théorie des jeux.

Au niveau de la population, nous dirons que nous avons un équilibre métamimétique si chaque agent est *contrefactuellement stable* :

$$\forall i, \forall j \in \Gamma_i, s_j \neq s_i \Rightarrow v_i(s_j, s_{-j}) \leq v_i(s_i, s_{-i}) \text{ avec } \sigma=(s_i, s_{-i}) = (s_j, s_{-j})$$

Traduit dans les notations précédentes cela correspond au cas où l'insatisfaction des chaînes métamimétiques est nulle :

$$\forall s \in S, \hat{F}_s^t = 0$$

Notamment, toute population homogène est un équilibre métamimétique puisqu'il n'y a pas de différence entre les agents qui puisse donner lieu à imitation. Nous verrons au chapitre III.2.B qu'il y a généralement beaucoup d'équilibres métamimétiques. Cependant, lorsque l'on considère l'évolution d'un système métamimétique, la notion d'équilibre n'est pas assez générale, car dans la plupart des évolutions, bien que la majorité de la population soit satisfaite, il reste quelques agents insatisfaits qui oscillent entre quelques états possibles.

Exemple fondamental**14****Exemple minimal d'un jeu métamimétique**

Pour illustrer les concepts proposés ici, considérons un exemple de jeu métamimétique minimal : deux joueurs de borne cognitive égale à un ne peuvent penser que de deux manières, maximisation des gains ("copie la stratégie de l'autre si son gain est strictement supérieur au tien"), et *conformisme* ("copie la stratégie de l'autre"). Ils ne peuvent agir dans le monde que de deux manières : jouer *C* ou jouer *D*. Les gains associés à chacune des actions sont déterminés par une matrice d'un dilemme du prisonnier (matrice des conséquences). Le jeu est répété. A chaque pas de temps, les joueurs revoient leur règle d'imitation puis leur comportement en fonction des gains et des observations de la période précédente (cf. règle d'inférence n°2 encart 11, avec mise à jour parallèle). Les agents sont sans mémoire.

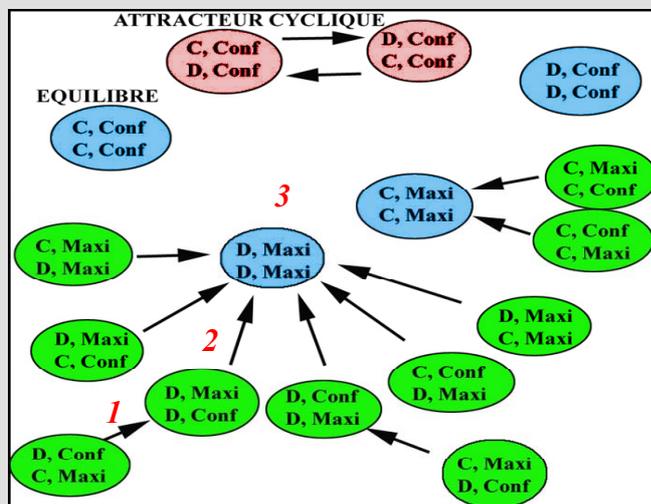
L'état du jeu est donc entièrement déterminé à un instant donné par le comportement et la règle de chacun des joueurs, et il y a 16 états du jeu possibles. Si par exemple, l'état du système à la période 1 est (cf. ci-dessous) : [joueur 1 : (D,conf); joueur 2 : (C,maxi)], le joueur 1 aura les gains les plus élevés. Les joueurs feront alors les raisonnements suivants :

- *Joueur 1* : « L'autre joueur est *maxi*, je vais donc devenir *maxi* pour être comme lui. Etant *maxi*, *D* est l'action qui a rapporté les gains les plus élevés, je vais donc jouer *D* ».
- *Joueur 2* : « Le joueur qui a le gain le plus élevé est conformiste, je vais donc faire comme lui à partir de maintenant. L'autre a joué *D* au dernier coup, je vais donc jouer *D* ».

Le nouvel état du système sera donc à la période 2 :

[joueur 1 : (D,maxi) ; joueur 2 : (D,conf)] .

Le système se stabilisera à la période 3 sur l'équilibre métamimétique où chaque joueur est (D,maxi).



Sur la figure ci-dessus sont représentés les 16 états possibles du système, les flèches indiquant les transitions définies par sa dynamique interne. Nous pouvons distinguer trois types d'états : les états transitoires, les équilibres et les attracteurs métamimétiques. Les attracteurs sont les sous-chaînes irréductibles du processus de Markov.

Cet exemple n'a d'autre intérêt que de mettre en évidence les différents types d'état, et de montrer en quoi consiste la dynamique interne. **Le point fondamental est que la dynamique du système (les flèches entre les états) est entièrement déterminée par l'ensemble des règles que les agents sont susceptibles d'imaginer (maxi et conformiste).** Il n'est pas nécessaire de considérer une règle au statut particulier, comme par exemple une dynamique des répliqueurs, pour obtenir une dynamique sur l'ensemble des états possibles.

Ces agents oscillants seront dits *frustrés* (voir l'encart 14 pour une illustration), il n'y a pour eux aucune manière d'être satisfait, ils ont toujours en vue un modèle qu'ils estiment meilleur qu'eux et qu'ils veulent imiter. La trajectoire du système métamimétique se retrouve alors confinée dans un petit nombre d'états possibles mais ne se stabilise jamais. Nous avons alors un *attracteur métamimétique*. L'ensemble des états initiaux à partir desquels la dynamique est susceptible de converger vers un attracteur donné est appelé *bassin d'attraction*.

Étant donné que les processus d'imitation ont de grandes chances d'être soumis à des erreurs, celles-ci entraînant des perturbations dans la dynamique métamimétique, les concepts intéressants de stabilité devront être empruntés à la théorie des processus de Markov perturbés.

III.1.D.d.ii) Les dynamiques bruitées

Le concept le plus populaire dans l'étude des jeux évolutionnistes est celui de *stratégie évolutionnairement stable* (ESS pour *evolutionary stable strategy*, cf. encart 13). L'idée essentielle de l'ESS est qu'une population d'agents utilisant une même stratégie est « stable » si elle ne peut pas être envahie par un petit nombre d'individus caractérisés par une stratégie différente. De petites déviations par rapport à l'équilibre sont toujours corrigées par la dynamique du système, qui retourne à l'équilibre en un temps fini.

Cependant, comme le soulignent Foster et Young (1990*), ce concept de stabilité n'est pas satisfaisant dans le cadre de systèmes soumis à des perturbations car il est nécessaire de voir l'évolution des fréquences de populations comme un système dynamique. Dans ce cadre, l'ESS n'est qu'un type particulier d'état limite de la population qui se réalise avec une fréquence plus ou moins grande au cours de l'évolution du système. La principale objection que font Foster et Young à la notion d'ESS, est qu'elle traite chaque perturbation comme si elle était isolée. En réalité, dans le cas de systèmes stochastiques, les systèmes sont la plupart du temps soumis *continuellement* à des perturbations, et il n'est pas garanti que le système ait le temps de retourner à l'équilibre entre deux perturbations. Sur le long terme, il est possible qu'une succession de perturbations amène, par accumulation, le système loin du voisinage immédiat d'un ESS. Le temps de retour à cet ESS particulier va alors dépendre de la structure globale de la dynamique et des perturbations. Dans le cas des systèmes bruités, la condition de l'ESS n'est donc pas une condition satisfaisante de stabilité car c'est un concept essentiellement local.

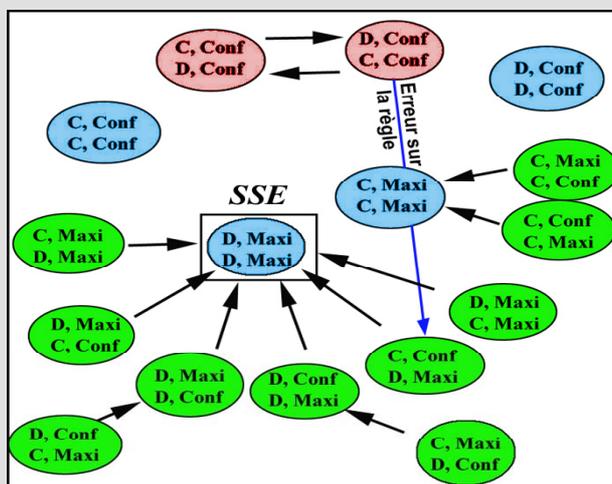
Exemple fondamental

15

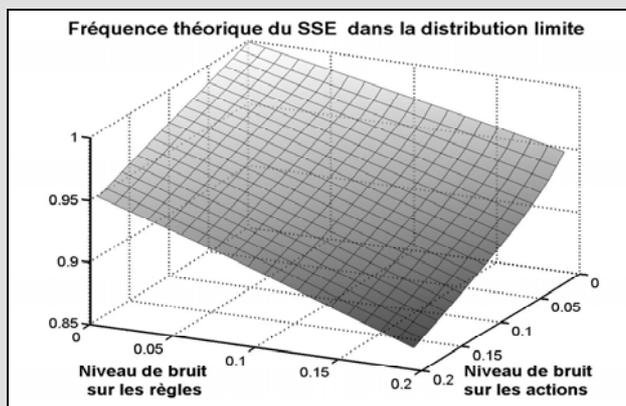
Exemple minimal d'un jeu métamimétique perturbé

Pour illustrer l'effet des perturbations sur la dynamique interne d'un jeu métamimétique, reprenons l'exemple précédent (encart 14) et perturbons le système : avec une probabilité $\epsilon_r > 0$ un agent adopte une règle au hasard au lieu de prendre celle que lui prescrit sa règle ; avec une probabilité $\epsilon_a > 0$, un agent adopte une action au hasard au lieu de prendre celle que lui prescrit sa règle.

Par exemple, si l'état du jeu est [joueur 1 : (D,conf.); joueur 2 : (C,conf)], il est possible que le joueur 2 adopte de manière contingente la règle *maxi* (par exemple parce qu'il a inféré par erreur que l'autre joueur était *maxi*). Révisant son comportement à partir de cette règle, il jouera l'action qui a obtenu les gains les plus élevés à la période précédente : *D*. Le joueur 1 quant à lui, deviendra (C,conf) pour être comme l'autre. Le système sera donc amené dans l'état [joueur 1 : (C,conf.); joueur 2 : (D,maxi)]. La dynamique interne amènera ensuite le système dans l'état contrefactuellement stable où chacun joue (D,maxi), jusqu'à ce qu'une nouvelle perturbation amène le système à changer d'attracteur.



Dans le cas de cet exemple minimal, il est facile de calculer le SSS en utilisant la méthode proposée par Young 1993*, qui se trouve être réduit à l'état où chacun joue (D,maxi). C'est un SSE. Il y a donc eu sélection parmi les cinq attracteurs possibles. Le niveau de bruit étant fixé, la fréquence théorique du SSE dans la distribution limite se calcule explicitement comme une fonction du niveau de bruit, en trouvant la distribution stationnaire de la chaîne de Markov irréductible associée (graphe ci-dessous). Nous pouvons voir ci-dessous que le SSE est effectivement l'état sélectionné par la dynamique, même en présence d'un fort niveau de bruit.



En particulier, lorsque nous traiterons des systèmes métamimétiques perturbés, l'intuition est que le niveau de bruit devra être relativement élevé pour être réaliste. Un acte d'imitation implique un certain nombre d'étapes, qui toutes sont sujettes à des erreurs : inférence des traits des voisins, détermination du voisin le meilleur, inférence du trait à l'origine de cette performance, et enfin reproduction de ce trait. À toutes ces étapes il est possible que l'agent se trompe et adopte, en fin de compte, une règle d'imitation ou un comportement bien différents de celui qui serait conforme à ses objectifs. Les hommes ne sont pas des machines, leur taux d'erreur, quelle que soit l'activité, n'est jamais négligeable devant I . Nous devons donc nous attendre à ce que les systèmes sociaux soient caractérisés par des niveaux de perturbation relativement élevés. Dans le cadre d'une formalisation, le concept de stabilité le plus approprié est alors celui d'*ensemble stochastiquement stable* (SSS pour *stochastically stable set*, cf. encart 13) proposé par Foster et Young (1990*) (voir également Young 1993* & 2001), défini comme l'ensemble tel que, sur le long terme, il est presque certain que le système reste dans tout voisinage contenant cet ensemble lorsque le niveau de bruit tend vers zéro. Lorsque le niveau de bruit est non nul, le système peut alors être caractérisé par une distribution limite des états du système, cette distribution se concentrant sur certains attracteurs du processus non perturbé. Nous appellerons *états stochastiquement contrefactuellement stables* les attracteurs métamimétiques ainsi sélectionnés par une dynamique bruitée.

III.1.D.e La co-détermination des métadynamiques et de l'espace des stratégies

La méthode actuelle proposée pour trouver l'SSS est difficilement applicable, pour des raisons de complexité, aux exemples que nous allons proposer. Cependant, ce concept de stabilité nous permet déjà de penser de manière très précise la relation entre la dynamique interne d'un système métamimétique et les perturbations. Nous le formalisons ici pour des systèmes métamimétiques où les agents ont tous une borne cognitive égale à I , ce qui veut dire que les stratégies s_i sont de la forme $s_i=(b,r)$, où b est un comportement et r une règle métamimétique.

Commençons par formaliser les dynamiques métamimétiques en termes de chaînes de Markov pour des agents sans mémoire, de borne cognitive égale à I . Cela va nous obliger à manipuler des notations lourdes, mais cela nous amènera à une expression synthétique de la matrice de transition. Supposons que nous ayons un certain ensemble R de règles et un certain ensemble B de comportements qui déterminent un ensemble fini $S=B \times R$ de stratégies

possibles. Soit un système composé de N agents. Un état $\sigma \in S^N$ du système est alors un vecteur de S^N donnant pour chaque agent i la stratégie choisie $s_i \in S$. $\sigma = (s_1, \dots, s_N)$. Le cardinal de l'ensemble des états du système est donc $|S|^N$. Pour exprimer $P^0_{\sigma\sigma'}$ en termes de révision de règles avec $\sigma' = (s'_1, \dots, s'_N)$ il va nous falloir écrire quelque chose comme :

$$P^0_{\sigma\sigma'} = \prod_{k=1..N} P(s_k \rightarrow s'_k)$$

La fonction Γ définit les voisinages de chaque agent, Γ_i étant l'ensemble des voisins de l'agent. Etant donné Γ et l'état du système σ , nous pouvons déterminer les gains et donc reconstituer⁶³ pour chaque agent i l'ensemble de ses traits τ_i ; puis l'ensemble des traits qu'il perçoit (τ_i, τ_{-i}) et qu'il pourra prendre en compte dans ses décisions. Pour alléger les notations, nous noterons par extension $\Gamma(s_i) = (\tau_i, \tau_{-i}) = \{\tau_k, k \in \Gamma_i\} \in T_{p,i}$ et $\Gamma(\sigma) = (\Gamma(s_1), \dots, \Gamma(s_N))$. Dans cette notation, la fonction Γ reconstitue donc les traits perçus par chacun des agents à partir de l'état du système.

Γ ne dépend que de la topologie du réseau social.

Rappelons qu'une règle d'imitation r dans le cas le plus général est une variable aléatoire sur S indexée par le voisinage de l'agent (cf. III.1.B.b.). Notons $p_r^{\Gamma(s_i)}$ la distribution de probabilité correspondante sur S lorsque le voisinage de l'agent est $\Gamma(s_i)$. La probabilité pour qu'un agent utilisant la stratégie $s_i = (b, r)$ adopte la stratégie $s' \in S$ est alors $p_r^{\Gamma(s_i)}(s')$. Pour définir la probabilité de transition $P^0_{\sigma\sigma'}$ il nous reste à considérer la fonction F dont les composantes $F_i : T_{p,i} \times S \rightarrow \mathcal{R}$ sont données par :

$$F_i(\Gamma(s_i), s') = P(r(\Gamma(s_i)) = s') = p_r^{\Gamma(s_i)}(s') ;$$

avec $\Gamma(s_i) = (\tau_i, \tau_{-i})$ et par exemple $\tau_i = (b, r, g)$, (comportement, règle et gains de l'agent i)

F ne dépend que de l'espace des stratégies considéré.

Nous avons alors :

$$P^0_{\sigma\sigma'} = \prod_{i=1..N} F_i(\Gamma(s_i), s'_i)$$

Nous pouvons lire sur cette expression que dans le cas des agents sans mémoire, P^0 est *uniquement déterminée* par F et Γ . La dynamique définie par la matrice de transition P^0 est *une propriété intrinsèque de l'espace des stratégies S et de la topologie du réseau Γ .*

P^0 est un exemple de la dynamique 2 proposée dans l'introduction, et correspond à la *dynamique interne du système constitué de l'ensemble des agents*. Elle reflète la structure de

⁶³ La stratégie d'un agent ne suffit pas à elle seule à déterminer tous les traits de l'agent puisque certains traits, comme par exemple les gains, dépendent des stratégies des autres joueurs

l'espace des règles métamimétiques (nous verrons comment il serait possible d'endogénéiser Γ au chapitre III.3.C). Les distributions stationnaires associées à P^0 sont les attracteurs métamimétiques. Etant donné un état initial, le système ira vers l'un des attracteurs métamimétiques dont le bassin d'attraction contient cet état. Mentionnons au passage que cette description s'étend naturellement au cas où les agents ont une mémoire de taille bornée par un nombre m . Il suffit alors de considérer que l'espace d'états du système est la concaténation des m derniers vecteurs σ (voir Young 1993 pour un exemple de tel modèle).

Considérons maintenant P^ε un processus de Markov perturbé où, à chaque pas de temps, chaque agent a une certaine probabilité de commettre des erreurs sur le choix de ses actions et de ses métarègles, ε mesurant de manière générale le niveau de bruit par rapport au processus original ($\forall \sigma, \sigma', \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} P^\varepsilon_{\sigma \sigma'} = P^0$). Le théorème proposé par Young (1993*, cf. encart 13) nous dit que si la forme du bruit respecte certaines conditions⁶⁴, la distribution stationnaire de P^ε convergera vers une distribution particulière μ_0 , sélectionnant ainsi l'une des distributions stationnaires du processus P^0 , c'est-à-dire, une distribution *particulière* sur les attracteurs métamimétiques, qui constitueront dans leur ensemble, par définition, le SSS du système. *Quel que soit l'état initial* σ , pour tout $\sigma' \in S$, la probabilité pour que le système soit dans l'état σ' au temps t , sera égale à $\mu_0(\sigma')$ lorsque t tend vers l'infini. Dans le cas où ε est fixé, l'unique distribution stationnaire μ_ε du processus perturbé P^ε sera alors d'autant plus concentrée autour du support de μ_0 que ε sera petit.

Nous pouvons maintenant aborder à nouveau les systèmes métamimétiques sous l'angle de la clôture opérationnelle. Soit Σ un système de N agents métamimétiques pouvant concevoir un espace de règle R . Sur l'espace-produit définissant toutes les dynamiques possibles sur l'ensemble des états possibles de Σ (cf. III.1.C.d), une première contrainte est imposée par la cohérence interne du système, qui se traduit en termes d'auto-cohérence des métarègles. Celle-ci définit un processus de Markov P^0 sur l'ensemble des états possibles de Σ . La particularité des systèmes métamimétiques est alors que la description des états possibles du système (l'ensemble des agents et l'ensemble des règles que peut adopter chaque agent) définit *de fait* une dynamique sur ces états, quelle que soit la taille de l'espace R . *Il y a auto-organisation au sens où la description des entités composant le système définit une*

⁶⁴ Les conditions générales sont que P^ε est la matrice de transition d'une chaîne de Markov X , où ε est un scalaire qui définit le niveau général de bruit et qui prend ses valeurs dans un certain intervalle $[0, a]$, et où pour tout $x, y \in X$: **1)** P^ε est irréductible et apériodique pour tout $\varepsilon \in [0, a]$; **2)** $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} P^\varepsilon_{xy} = P^0_{xy}$; **3)** $\exists \varepsilon, P^\varepsilon_{xy} > 0 \Rightarrow \exists r \geq 0, \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\varepsilon^{-r} P^\varepsilon_{xy}) < \infty$.

distribution endogène sur les métarègles d'évolution de ces entités. En l'absence de bruit, Σ atteindra alors, suivant ses conditions initiales, différents régimes dynamiques, qui seront caractéristiques d'un attracteur métamimétique particulier.

Lorsque le système est soumis à des perturbations, à cette première contrainte s'en ajoute une deuxième liée à la structure des perturbations, ce couplage déterminant un *unique régime dynamique* P^e pour le système, qui lui fait parcourir de manière stochastique l'ensemble de ses états avec une distribution de probabilité concentrée autour de *certaines* attracteurs métamimétiques. La dynamique sur le long terme devient alors *indépendante de l'état initial du système*. Mais ce n'est pas cette indépendance qui est remarquable ici. Ce phénomène est en effet assez classique pour des chaînes de Markov. Le phénomène important est la sélection par le bruit d'attracteurs métamimétiques privilégiés parmi un ensemble d'attracteurs *engendré par l'espace des stratégies*. Le couplage conduit donc à une *structuration du système par le bruit*.

Ceci nous permet d'avancer deux propositions concernant la manière de voir dans le cadre de *l'individualisme méthodologique complexe*, la relation entre l'individu et le collectif dans une population métamimétique :

Thèse 1 : La sélection des distributions de comportements sociaux, en l'absence de perturbation, est entièrement déterminée par la classe de règles que les individus peuvent envisager et par le réseau social qu'ils forment.

Thèse 2 : En présence de perturbations aux différents niveaux des interactions sociales, la sélection de la distribution de comportements sociaux se concentre autour des états stochastiquement stables de la dynamique non perturbée. Cette distribution dépend de la structure des perturbations, de la classe de règles que les individus peuvent envisager, et du réseau social qu'ils forment.

Enfin, nous pouvons mentionner une troisième thèse que nous ne pourrions évoquer que brièvement à la fin de cet ouvrage (cf. III.3.C) :

Thèse 3 : Etant données des contraintes topologiques environnementales, et une structure de perturbations, la distribution des réseaux sociaux susceptibles de se former est entièrement déterminée par la classe de règles que les individus peuvent envisager.

Nous pouvons maintenant définir plus précisément les termes de notre titre dans le cadre d'une population métamimétique :

- **Culture** : Ensemble des traits modifiables des agents, considéré comme un tout.
- **Cognition Sociale** : Ensemble des règles métamimétiques des agents, prises comme un tout. C'est la composante procédurale de la culture (vecteur σ)
- **Métadynamiques** : Dynamiques définies par P^0 (ou P^e selon les cas).

III.1.D.f Bruit et nouveauté dans les jeux métamimétiques

Le cadre de la théorie des jeux stochastiques va maintenant nous permettre de faire une distinction fondamentale entre deux types de perturbation : le bruit et la nouveauté. Nous pouvons dire de manière générale qu'il y a perturbation lorsqu'un agent change un de ses traits modifiables en dehors de la stricte application des règles qu'il s'est données.

Ce genre de perturbation peut avoir deux types de conséquences très différentes. Pour les apprécier, il faut rappeler que dans les processus mimétiques non perturbés, il n'y a pas apparition de traits qualitativement nouveaux. Tout ce qui est modifié est une combinaison de ce qui existait déjà dans le voisinage de l'agent. En revanche, une perturbation peut avoir pour effet de remplacer un trait par un autre déjà existant dans le système ou de créer un trait totalement nouveau. Le deuxième cas est analogue à ce qui arrive lorsque par exemple, une idée nouvelle jaillit d'un malentendu au cours d'une discussion. Il y a alors création de nouveauté. Nous verrons au III.2.C.c.iv une illustration des différences qualitatives de ces deux types d'erreur.

Le premier type de perturbation peut être appelé *bruit*. C'est ce qui est modélisé lorsque l'on passe d'un processus de Markov défini par une matrice de transition P^0 au processus de Markov perturbé P^e . Celui-ci peut avoir une origine endogène, c'est la part d'aléatoire dans le compromis exploration/exploitation effectué par les agents, ou exogène. Le deuxième type de perturbation peut être interprété comme une modification de la matrice P^0 (invention de nouvelles règles), qui permet au système d'accéder à de nouveaux états. Nous avons alors un *changement d'espace des phases du système*⁶⁵.

Enfin, il peut y avoir perturbation du système lorsque que la topologie de l'espace est elle-même modifiée, modifiant ainsi les voisinages des agents. Ceci peut être vu comme l'analogie d'une innovation technologique. Ainsi, la presse écrite, la radio, la télévision et Internet ont radicalement changé la nature des voisinages dans l'espace et dans le temps, changeant la structure des influences sociales (Bandura 1977), et certaines institutions, comme par exemple l'INSEE, ont proposé de nouveaux modes d'accès à ces voisinages en présentant les valeurs agrégées de certains traits. Il n'est certainement pas anodin que les sondages soient interdits dans la semaine qui précède les élections, et celles-ci seraient sans doute bien différentes s'il n'y avait pas de sondages du tout.

⁶⁵ Je remercie Guiseppe Longo d'avoir attiré mon attention sur cette formulation.

Résumé du chapitre III.1

Ce chapitre a commencé par une question relative à la théorie de l'auto-organisation : *comment peut-on concevoir un système qui élabore sa propre métarègle d'évolution ?* Cette question est la généralisation de la problématique soulevée dans la partie I où il était question de rendre endogène une distribution sur différents types de comportements sociaux.

Fidèles à notre intuition de la partie I, et en tirant parti des suggestions de la partie II, nous nous sommes intéressés aux dynamiques mimétiques. Nous avons proposé une définition formelle de l'imitation telle que les règles d'imitation puissent être leur propre métarègle, contournant ainsi l'argument avancé par d'Ashby (1962) affirmant l'impossibilité d'une auto-organisation « forte ». Nous avons alors montré que ceci permet de concevoir des systèmes dynamiques ayant la propriété de *clôture opérationnelle* : les *jeux métamimétiques*. Ceux-ci sont constitués d'agents mimétiques dont les métarègles, caractérisées notamment par ce *qu'ils* considèrent comme bon, évoluent de façon *spontanée* au cours de leurs interactions avec d'autres agents, lorsque leurs métarègles témoignent d'un défaut *d'auto-cohérence*.

Les jeux métamimétiques sont donc construits autour d'un principe d'imitation, qui n'a pas de contenu en soi, et un ensemble de significations possibles, de définitions possibles de meilleur, qui s'organise sous ce principe. La définition particulière de meilleur adoptée par un agent évolue alors sous l'influence de la dynamique métamimétique elle-même, qui définit la *métadynamique* de la *cognition sociale*. Les dynamiques de ces jeux sont décrites par des équations appartenant à la classe des répliquations par imitation, dont nous pouvons montrer que, contrairement à ce qui a déjà été proposé, elles ne sont pas réductibles en général à des dynamiques de répliqueurs mono-critère. Pour les étudier, il faut considérer le cadre plus général des processus de Markov, dont le concept de stabilité adéquat, dans le cas de dynamiques perturbées, est la notion *d'ensemble stochastiquement stable*.

Dans le cas non perturbé, un jeu métamimétique peut atteindre *un équilibre métamimétique*, *i.e.* une configuration stable où les agents cessent d'imiter, aucun d'entre eux ne pouvant s'imaginer être mieux qu'il n'est en se mettant *contrefactuellement* à la place de ses voisins ; ou une classe de configurations plus générale, où certains agents sont frustrés et ne cessent d'imiter : un *attracteur métamimétique*.

Les concepts des jeux évolutionnistes stochastiques nous permettent alors de concevoir de manière assez précise les systèmes métamimétiques perturbés sous l'angle des systèmes opérationnellement clos. La double contrainte de leur cohérence interne et de la forme des perturbations détermine de manière *unique* le régime dynamique du système, lui faisant parcourir de manière stochastique l'ensemble de ses états avec une distribution de probabilité concentrée autour de *certaines* attracteurs métamimétiques. Cette dynamique, et donc la distribution des règles d'imitation sur le long terme, est alors *indépendante* des conditions initiales. Cette approche nous a permis également de faire la distinction entre *nouveauté* et *bruit*, la première modifiant la structure interne du jeu métamimétique, le second sélectionnant dans cette structure certains aspects qui seront exprimés.

Enfin, nous avons pu donner une définition précise des termes *culture*, *cognition sociale* et *métadynamiques*.

Ceci étant, il reste à voir en pratique quels types de propriétés sont susceptibles de présenter de tels systèmes, ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

III.2 Premiers exemples de systèmes métamimétiques autour du dilemme du prisonnier

Nous allons maintenant illustrer les idées avancées dans le chapitre précédent en les appliquant à l'étude de l'émergence et de la stabilité de la coopération dans un dilemme du prisonnier métamimétique. Pour le moment, rien ne nous garantit que les dynamiques métamimétiques soient intéressantes du point de vue de la modélisation. Il se peut très bien qu'elles n'offrent finalement que très peu de régularités. Nous allons donc étudier les types de régularités que peuvent éventuellement présenter ces dynamiques.

Notre objectif sera double, suivant ainsi la double orientation que nous nous sommes fixée, autour des systèmes auto-organisés et de la modélisation des systèmes sociaux. Le premier objectif sera de donner des exemples concrets d'auto-organisation dans un jeu métamimétique, de donner des exemples de structures émergentes, d'étudier la relation entre dynamiques individuelles et dynamiques collectives et de voir de quelle manière les perturbations peuvent permettre au système de sélectionner une dynamique particulière parmi l'ensemble des dynamiques compatibles avec sa structure interne. Le deuxième objectif sera de proposer une approche nouvelle des phénomènes de coopération, dans les cas où les gains ne sont pas directement reliés à un succès reproductif, comme cela est le cas en général pour l'évolution culturelle humaine.

Nous allons, dans un premier temps, (*III.2.B*) étudier les dynamiques métamimétiques non perturbées (processus de Markov P^0), et mettre en évidence les dynamiques que nous avons proposées au *III.1.C.f*, ainsi que les équilibres et attracteurs métamimétiques dont nous avons parlé à la fin du chapitre précédent. Nous regarderons ensuite (*III.2.C*) le couplage entre la dynamique interne d'un jeu métamimétique et un ensemble de perturbations. Ceci définira un processus de Markov P^ε dont nous étudierons les propriétés statistiques de la distribution stationnaire μ_ε (cf. *III.1.D.d*).

Nous allons donc commencer par fixer la structure du jeu métamimétique qui va nous servir d'exemple tout au long de notre discussion.

III.2.A Le dilemme du prisonnier métamimétique spatialisé

Nous avons déjà donné au III.1.C.a une ébauche de ce que pourrait être la généralisation dans le cadre métamimétique du dilemme du prisonnier spatial que nous avons vu au I.2. Pour approcher ces systèmes dans le cadre d'une étude computationnelle, nous allons préciser le modèle du dilemme du prisonnier spatial métamimétique et en fournir un exemple particulier. Comme nous l'avons déjà évoqué au III.1.B.a, notre objectif n'étant pas à ce stade de proposer un modèle fidèle des processus de décision humains mais d'étudier tout particulièrement l'effet sur la dynamique globale d'une dynamique au niveau des buts des agents. Dans cette perspective, certains aspects de l'agent, qui dans d'autres modèles sont fondamentaux, comme les processus d'inférence, les processus d'apprentissage ou les processus éductifs, feront l'objet d'hypothèses par défaut. Nous laisserons une modélisation plus réaliste de ces aspects pour de futurs travaux.

Dans tout ce qui va suivre, nous allons nous placer dans le cadre des *processus dynamiques en temps discret*.

III.2.A.a Description du jeu

Nous reprenons ici l'essentiel du modèle de Nowak et May que nous avons présenté en I.2 pour l'étendre au cadre métamimétique. Nous allons cependant considérer comme matrice de jeu la matrice du dilemme du prisonnier, qui est bien plus problématique au regard de l'émergence de la coopération que le jeu étudié par Nowak et May. Une étude similaire réalisée à partir de leur matrice a révélé des résultats analogues à ceux présentés ici. Comme dans le modèle original, nous considérerons que les joueurs doivent avoir le même comportement envers tous leurs voisins. Comme nous l'avons vu en I.2., ceci est une manière générale de modéliser les interactions qui trouvent une médiation à travers l'environnement, comme par exemple les situations de partage de ressources renouvelables ou les problèmes de gestion de biens publics.

Considérons N^2 d'agents disposés aux nœuds d'une grille torique bidimensionnelle, chacun jouant un dilemme du prisonnier avec chacun de ses huit voisins, en lui opposant l'un des deux comportements : coopérer (C) ou faire défection (D). Le comportement d'un agent est le même, à une période donnée, envers chacun de ses voisins, bien qu'il puisse en changer

d'une période sur l'autre. Le voisinage d'un agent est constitué des agents occupant les huit nœuds adjacents (appelé voisinage de Von Neumann). Lorsque deux agents jouent ensemble, ils reçoivent un gain de R si tous deux ont coopéré et de P si tous deux ont fait défection. Dans le cas où les comportements sont différents, celui qui a fait défection reçoit T , alors que l'autre reçoit S . Nous imposerons $T > R > P > S$ et $T + S < 2.R$ de telle sorte que la matrice de jeu soit celle d'un dilemme du prisonnier. Lorsque cela ne sera pas précisé, les valeurs de ces paramètres seront celles utilisées dans Axelrod 1984, c'est-à-dire $T = 5, R = 3, P = 1, S = 0$.

Agent B →		

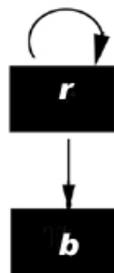
↓ Agent A		
C	(3,3)	(0,5)
D	(5,0)	(1,1)
La matrice de jeu		

Le gain d'un agent i à la fin d'une période est donc :

- S'il a joué C : $G_i(C) = \sum_{j \in \Gamma \wedge b_j = C} R + \sum_{j \in \Gamma \wedge b_j = D} S$
- S'il a joué D : $G_i(D) = \sum_{j \in \Gamma \wedge b_j = C} T + \sum_{j \in \Gamma \wedge b_j = D} P$

Nous avons donc bien comme pour un dilemme du prisonnier à deux joueurs $G_i(C) < G_i(D)$ quelle que soit la composition du voisinage.

Pour effectuer le plongement du modèle du dilemme du prisonnier spatial dans le cadre métamimétique il nous faut commencer par définir une structure d'agent. Nous considérerons la structure la plus simple, celle qui correspond à des agents de borne cognitive égale à un :



Nous n'étudierons pas dans cet ouvrage des agents de borne cognitive plus élevée, les principales caractéristiques des dynamiques métamimétiques étant déjà représentées dans les jeux entre agents de borne cognitive égale à 1. Mentionnons simplement que le fait de pouvoir accroître la taille de sa chaîne métamimétique peut permettre à un agent de réduire son

insatisfaction et donc de sortir de certaines situations de frustration. Nous devons donc nous attendre à ce qu'il y ait moins de frustration, toutes choses égales par ailleurs, lorsque la borne cognitive des agents augmente. Dans le cas non perturbé, la proportion des équilibres métamimétiques par rapport aux attracteurs métamimétiques devrait augmenter avec la borne cognitive des agents.

III.2.C.b L'espace des règles d'imitation

Définissons maintenant l'espace R des règles d'imitation. Ceci nécessite la donnée de trois ensembles : l'ensemble des fonctions de valuation, l'ensemble des fonctions de sélection et l'ensemble des fonctions de modification. Il nous faut donc spécifier les propriétés de chacun de ces trois ensembles.

Fonction de valuation : Nous avons vu principalement trois types d'agents au cours des exemples donnés dans la partie *I* : des agents maximisateurs (Henrich et Richerson, Nowak et May, Orléan, Young), des agents conformistes (Orléan, Young, Henrich et Richerson) et des agents anticonformistes⁶⁶ (Young). Nous allons proposer ici le plus petit espace de règle qui contienne ces trois formes, auquel nous ajouterons la règle dictant un comportement aléatoire. Pour ceci, nous allons suivre la méthode que nous avons proposée en *III.1.C.e* consistant à décrire cet espace en termes de calculs possibles sur l'espace des perceptions et d'algorithmes d'optimisation possibles sur le résultat de ces calculs.

La fonction de valuation assigne à chaque agent un score et sélectionne l'agent de score maximal. Ainsi en ce qui concerne les scores, nous considérerons des agents capables de :

- Calculer les densités sur un ensemble de traits à caractère discret.
- Multiplier une valeur numérique par -1 .

En ce qui concerne le type d'optimisation que les agents sont capables de faire sur les scores, nous considérerons qu'ils sont capables :

- De calculer le maximum de deux valeurs numériques
- De choisir au hasard

⁶⁶ L'étude des jeux entre agents anticonformistes est par ailleurs très développée et est un domaine en soi de la théorie des jeux : le jeu de la minorité (cf. Arthur B. W., 1994, Inductive reasoning and bounded rationality, *Am. Econ. Assoc. Papers and Proc* 84, 406-411).

Etant donné que les agents perçoivent les gains de leurs voisins, ceci nous donne un espace de cinq critères d'évaluation possibles : l'évaluation par les gains en termes de minimisation et maximisation, l'évaluation par la densité des traits en termes de densité maximale ou de densité minimale, l'évaluation au hasard (Tableau 3)

Tableau 3 : Les cinq critères d'évaluation que les agents peuvent envisager.

<i>Traits perçus</i> → ----- ↓ Calcul appliqué	<i>Gains</i>	<i>Densités des traits modifiables</i>
<i>Maximum</i>	<i>Maxi</i>	<i>Conformiste</i>
<i>Minimum</i>	<i>Mini</i>	<i>Anticonformiste</i>
<i>Aléatoire</i>	<i>Aléatoire</i>	

Fonction de sélection : une fois désignés le ou les meilleurs voisins par la fonction de valuation, l'agent doit sélectionner le trait qu'il va chercher à modifier en inférant le ou les traits susceptibles d'avoir participé à cette bonne évaluation. Plusieurs choix sont possibles pour la règle d'inférence utilisée, et il est tout à fait envisageable de considérer dans un même jeu plusieurs règles d'inférences qui définiraient des règles d'imitation différentes. Nous évoquerons ce point au III.3.A. Nous nous contenterons ici de considérer une seule règle d'inférence et donc une seule fonction de sélection. Nous adopterons comme règle par défaut la règle 1 proposée dans l'encart 11 : les agents choisissent de revoir leurs règles avec une probabilité α et revoient leur comportement soit parce qu'ils ont changé de règle, soit spontanément avec une probabilité θ (toujours à la condition qu'ils ne se considèrent pas déjà comme les meilleurs). Les situations telles que $\alpha=1$, et $\theta=1$ correspondront au cas de mise à jour parallèle synchrone des règles puis des comportements (règle 2). Lorsque l'un de ces deux paramètres sera inférieur à un, nous aurons des mises à jour parallèles asynchrones. Par ailleurs, nous supposerons qu'un agent qui ne se considère pas comme le meilleur mais dispose de plusieurs modèles équivalents, choisira d'imiter l'un d'eux au hasard.

Par exemple, si un agent ($D, maxi$) a comme meilleur voisin un agent ($C, conformiste$), celui-ci attribuera le succès de ce voisin à son comportement coopérateur avec une probabilité $(1-\alpha) \cdot \theta$, et au fait qu'il est conformiste avec une probabilité α , ce qui l'amènera par la même occasion à revoir son comportement.

Fonction de modification : une fois qu'un agent a identifié un trait susceptible d'améliorer sa stratégie, il cherche à adopter. Nous considérerons ici le processus le plus simple qui est celui de la copie.

D'après ce qui précède, les agents sont donc capables d'envisager cinq règles métamimétiques :

- 1) **Maxi** : Imitation indexée sur les gains. Le meilleur voisin est celui qui a le gain le plus élevé. L'agent imite avec une probabilité α la règle du meilleur agent (puis revoit son comportement en fonction) ou imite avec une probabilité $(1-\alpha).\theta$ le comportement du meilleur agent, et dans le reste des cas ne fait rien.
- 2) **Mini** : Règle d'imitation symétrique de *Maxi*, la fonction de valuation étant multipliée par $-I$.
- 3) **Conformiste** : Imitation indexée sur les densités. Les meilleurs voisins sont ceux qui ont les traits modifiables les plus communs. L'agent imite avec une probabilité α la règle utilisée par la majorité des agents (puis revoit son comportement en fonction) ou imite avec une probabilité $(1-\alpha).\theta$ le comportement de la majorité des agents, et dans le reste des cas ne fait rien.
- 4) **Anticonformiste** : Règle d'imitation symétrique de la règle conformiste (fonction de valuation multipliée par $-I$). Les meilleurs voisins sont ceux qui ont les traits modifiables les plus rares. L'agent imite avec une probabilité α la règle utilisée par la minorité des agents (puis revoit son comportement en fonction) ou avec une probabilité $(1-\alpha).\theta$ le comportement de la minorité des agents, et dans le reste des cas ne fait rien.
- 5) **Aléatoire** : l'agent choisit un de ses voisins au hasard et imite sa règle avec une probabilité α ou son trait modifiable avec une probabilité $(1-\alpha).\theta$.

Pour des raisons de clarté, nous nous limiterons dans ce chapitre à étudier des jeux métamimétiques avec α et θ uniformes et égaux à I dans toute la population. Cela signifie qu'à chaque pas de temps, chaque agent vérifiera qu'il a bien la même règle et le même comportement que ceux qu'il estime être les meilleurs agents. Nous avons vérifié que les résultats que nous présentons ici ne dépendent pas qualitativement des valeurs de α et θ , il n'y a pas d'artefact de la mise à jour parallèle (des résultats similaires sont également présentés en version asynchrone en annexe web). Nous en aurons une illustration au III.3.A où, en rendant

α et θ endogènes, nous aurons des exemples où ces deux paramètres dépendent à la fois de l'individu et du temps.

D'après ce que nous venons de voir, le niveau des comportements ne comporte que deux traits : $\{C,D\}$ et le niveau des règles en comporte cinq : $\{aléatoire, maxi, mini, conformiste et anticonformiste\}$. Nous considérerons des agents *sans mémoire*, pouvant percevoir l'ensemble des traits de leurs voisins c'est-à-dire, leurs gains, leur comportement, et leur métarègle. Nous avons donc pour chaque agent $T_{perçu} \sim (\mathcal{R} \times \{C,D\} \times R)^9$. L'espace des états du système est quant à lui isomorphe à $(\{C,D\} \times \{1, \dots, 5\})^N$

III.2.B. La dynamique interne des jeux métamimétiques

Nous allons commencer par étudier les dynamiques non perturbées du dilemme du prisonnier métamimétique. Nous illustrerons en particulier par des exemples les points suivants :

- 1) *les systèmes métamimétiques sont des systèmes auto-organisés présentant des attracteurs forts, avec une convergence généralement rapide vers ces attracteurs.*
- 2) *ces attracteurs sont globalement statiques,*
- 3) *les attracteurs hétérogènes sont plutôt la règle que l'exception,*
- 4) *les populations à l'attracteur sont structurées (formation de clusters, distribution similaires des différents types d'agents pour un large ensemble de conditions environnementales).*

Dans cette section et dans la suivante, nous considérerons des jeux ne comportant qu'une paire de règles, ceci afin d'aiguiser notre intuition sur des exemples minimaux. Étant donné que nous avons un jeu spatial, la stabilité d'une forme émergente dans un jeu dépendra de la forme de ses frontières. Pour cette raison, nous nous référerons de temps en temps aux bords élémentaires présentés dans la Figure 30, en les nommant par leur lettre (i.e. bord élémentaire de type x).

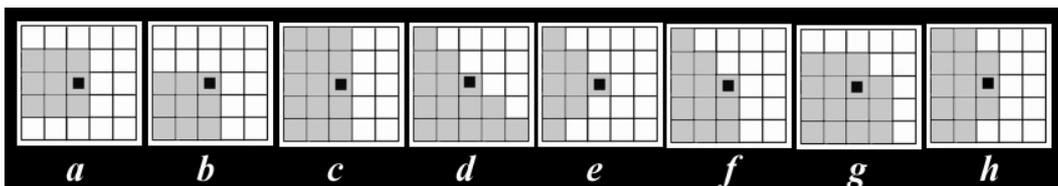


Figure 30 : Quelques configurations de frontière. Sont représentés sur chaque figure un agent (cellule marquée d'un carré noir), ses huit voisins et ses 16 seconds voisins.

Comment voir un attracteur ou un SSS ?

Comment peut-on étudier, dans le cadre d'une approche computationnelle les processus de Markov dont nous avons parlé au III.1.D.d ? Notamment, comment rendre compte de la convergence vers une distribution limite μ du processus de Markov définissant la dynamique du système. Nous avons vu qu'il fallait distinguer deux cas de figure suivant que le processus est non perturbé (P^0) ou perturbé (P^ε). Dans le premier cas nous avons un équilibre métamimétique ou un attracteur métamimétique, qui dépendent des conditions initiales, le premier étant un cas particulier du second. Dans le deuxième cas, nous avons un processus de Markov irréductible dont la distribution stationnaire se concentre autour de certains états.

L'équilibre métamimétique est facile à identifier lors d'une simulation car le système n'évolue plus. La distribution limite, qui dépend de P^0 et de l'état initial, est alors un Dirac sur l'équilibre métamimétique. Dans le cas plus général des attracteurs métamimétiques, la situation est différente, le système parcourt un petit nombre d'états, chaque état σ ayant une fréquence d'apparition $\mu(\sigma)$ sur le long terme. L'attracteur est alors caractérisé par μ . Cette distribution étant une distribution limite, il faudrait, pour la mettre en évidence de manière empirique calculer pour t fixé, la distribution empirique μ^t définie comme la fréquence moyenne d'apparition des différents états sur une fenêtre temporelle suffisamment large, centrée autour de t ; puis regarder la limite de μ^t lorsque t tend vers l'infini. Ceci n'est pas réalisable en pratique étant donné la taille de l'espace d'état. Nous pouvons cependant suivre le système et regarder les changements d'état d'une période sur l'autre. Fort heureusement, les attracteurs métamimétiques dans le jeu que nous étudions sont globalement statiques et les changements d'états se traduisent par des variations dans des régions très circonscrites de la grille torique. Nous pouvons alors les visualiser en représentant uniquement les changements d'états dans la population.

Par ailleurs, ce qui intéresse le modélisateur n'est pas tellement la distribution déterminant la fréquence d'apparition d'états particuliers, mais la distribution des valeurs prises par des variables agrégées, comme par exemple le taux de coopération dans la population. Il n'est pas très intéressant de savoir avec quelle fréquence un agent donné est dans tel état, en revanche, il est intéressant de savoir dans quelle fourchette se trouve la proportion d'agents *maxi* ou d'agents conformistes. Le fait qu'il y ait une distribution stationnaire sur les états du système implique qu'il y a également une distribution stationnaire sur toute variable agrégée. Nous nous intéresserons donc à l'évolution des distributions des variables agrégées. Une distribution étant encore un objet assez complexe dont il n'est pas possible de représenter l'évolution de manière simple (cf. Figure 31-a), nous la caractériserons par ses moments d'ordre 0 et 1 (moyenne et variance). Nous nous intéressons alors à la dépendance de ces variables par rapport aux conditions initiales.

La même démarche s'appliquera dans le cas des processus perturbés définis par une matrice de transition P^ε (Figure 31-b). Dans ce cas, nous savons que les conditions initiales n'ont pas d'influence à long terme sur les différentes distributions caractérisant le système. Nous nous intéresserons donc à la dépendance de la distribution limite μ_ε par rapport à la structure des perturbations.

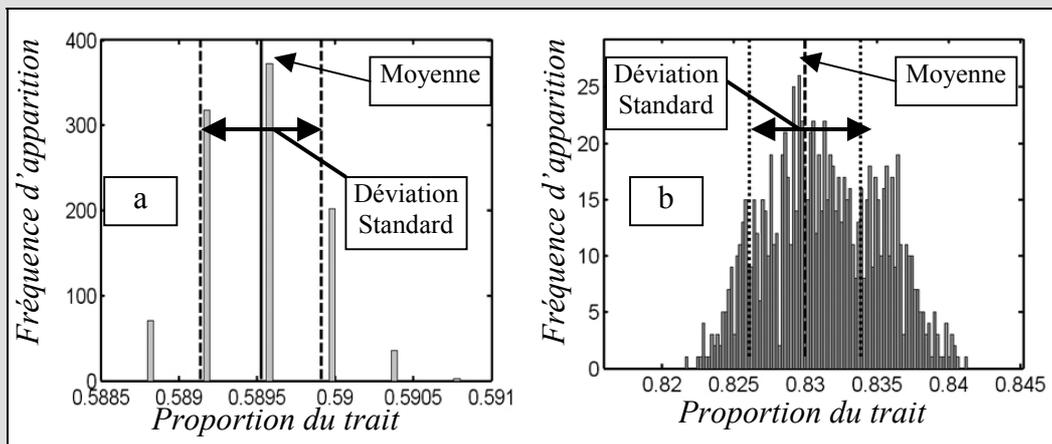


Figure 31 : Nous pouvons étudier la distribution limite sur les états du système en regardant la distribution sur des variables agrégées, comme par exemple la distribution limite de la proportion d'un trait donné dans la population. Dans le cadre d'une étude computationnelle, celle-ci peut être approchée par la fréquence empirique des différentes proportions de ce trait sur une fenêtre temporelle suffisamment large. Par exemple, la métadynamique d'un système métamimétique peut être approchée en regardant les proportions des différents types de règles, qui est un vecteur dont la taille est celle du nombre de règles. Il y aura donc une distribution limite sur l'espace constitué de ces vecteurs. Pour la visualiser, nous pouvons regarder la projection de cette distribution sur les différentes dimensions. Par exemple, sur la figure a, nous avons l'histogramme des proportions de conformistes sur une fenêtre temporelle englobant 1000 périodes dans le cas d'un attracteur métamimétique. L'attracteur n'a qu'un petit nombre d'états possibles ce qui ne donne que 6 valeurs possibles pour la proportion de conformistes et une distribution très concentrée autour de la valeur 0.5895. Dans le cas d'un système perturbé (figure b), la distribution limite est plus étendue mais se concentre autour de certaines valeurs qui traduisent la structure du processus P^0 sous-jacent. Dans tous les cas, ces distributions pourront être caractérisées par leur variance et leur moyenne, ce qui rendra plus facile l'étude graphique de leur dépendance en fonction d'autres paramètres ou de leur évolution dans le temps. Par exemple, sur la figure b, la moyenne de la proportion de conformistes dans une série de 1000 états successifs est 0.83 avec une variance de 0.04. Lorsque le système évolue à partir d'une configuration initiale, c'est la forme de cet histogramme qui se stabilise.

III.2.B.a Quelques cas de jeux simples

Dans ce qui suit, nous considérerons les valeurs suivantes : $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$. Nous aurons une mise à jour parallèle des règles puis des comportements (éventuellement avec les nouvelles règles). **Les algorithmes utilisés pour ces simulations pourront être trouvés en annexe.**

III.2.B.a.i) *L'art d'être anticonformiste dans une société conformiste*

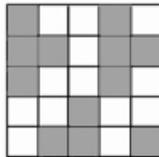
Le premier exemple que nous allons considérer est un jeu avec deux règles : la règle conformiste et sa règle symétrique, la règle anticonformiste. Dans ce jeu, les gains n'auront donc pas de signification pour les agents, ceux-ci n'indexant leur comportement que sur les densités observées. Les comportements des agents seront donc les suivants :

- *mise à jour des règles* : à chaque période, un agent conformiste vérifie que la règle majoritaire dans son voisinage est bien la règle conformiste et, dans le cas contraire, change de règle. Un agent anticonformiste vérifie que la règle minoritaire dans son voisinage est bien la règle anticonformiste et dans le cas contraire change de règle,
- *mise à jour des comportements* : à chaque période, *après* la révision de la règle (donc éventuellement avec la nouvelle règle), un agent conformiste vérifie que son comportement est bien le comportement de la majorité des agents dans son voisinage et, dans le cas contraire, change de comportement, un agent anticonformiste vérifie que le comportement minoritaire est bien celui qu'il a adopté et dans le cas contraire change de comportement.

Un rapide raisonnement nous donne les principales propriétés qualitatives de ce système.

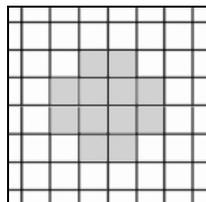
Du point de vue des règles : un agent anticonformiste entouré d'agents conformistes est stable (il est dans la minorité). Tant que la proportion d'anticonformistes n'est pas trop grande et qu'ils sont suffisamment éparpillés, le système sera stable du point de vue des règles d'imitation. En revanche, un système avec une proportion d'anticonformistes au-dessus de $4/9$ sera instable. En effet, si tel est le cas il y a au moins un anticonformiste dont plus de $4/9$ des voisins sont également anticonformistes. Comme nous avons un réseau carré avec des voisinages de 9 agents, la majorité est à 5 contre 4. Un agent

anticonformiste qui a une proportion d'anticonformistes supérieure à $4/9$ dans son voisinage aura donc nécessairement au moins quatre voisins anticonformistes et celui-ci changera de règle. Par ailleurs, il existe un pavage stable avec exactement $4/9$ d'anticonformistes, les anticonformistes formant des **T** disposés en rangées de sens alterné :



Dans cette configuration, le changement d'un anticonformiste en conformiste n'altère pas la stabilité du système et fait baisser la proportion d'anticonformistes de $1/N$. Pour tout $x < 4/9$, il existe donc un équilibre métamimétique tel que la proportion d'anticonformistes dans la population approche x avec une précision arbitrairement grande pour N assez grand.

Par ailleurs, il est important de remarquer qu'un groupe de conformistes tel que chaque agent du groupe est entouré d'une majorité d'agents de ce même groupe est stable. Si un tel groupe se constitue au cours du processus de réorganisation, il perdurera en l'absence de bruit pendant tout le temps de l'évolution du système. De plus, le cluster conformiste stable de taille minimale est facile à trouver : c'est un groupe de 12 agents disposés en forme de croix.



Du point de vue des comportements : considérons un sous-ensemble composé d'agents conformistes. Au sein de ce sous-ensemble, les groupes d'une couleur donnée ne seront stables que si chaque agent de ce groupe a une majorité de ses voisins de la même couleur que lui, c'est-à-dire au moins quatre voisins. Cela contraint l'ensemble des formes possibles au sein des régions conformistes puisque de chaque côté de la frontière entre deux couleurs, chaque agent devra avoir au moins quatre voisins de la même couleur. Par exemple, les bords de frontière c, d, f, h seront stables alors que les bords de frontière a, b, e, g seront instables. Partant d'une configuration quelconque, les réorganisations successives des comportements des conformistes cherchant à être comme leurs voisins

feront apparaître, dans les zones entièrement conformistes, des formes arrondies du type de celle que l'on peut voir sur la Figure 32 (des réseaux d'agents conformistes ont été étudiés brièvement par Szilagyi 2003 et avec une règle légèrement différente par Axelrod 1997).



Figure 32 : Exemple des formes caractéristiques qui apparaissent lorsqu'une population conformiste doit choisir entre deux traits (ici gris foncé et gris clair). Les plus petits amas en forme de croix sont les plus petites formes stables. Elles sont composées de 12 agents.

Si maintenant la population contient également une petite proportion d'anticonformistes, ceux-ci formeront des points isolés de couleurs différentes au sein des formes arrondies que nous pouvons voir sur la Figure 32.

Nous pouvons donc prédire ce que sera le résultat d'une réorganisation des comportements et des règles dans un dilemme du prisonnier métamimétique avec uniquement des agents conformistes ou anticonformistes. À partir d'une situation initiale, des agents anticonformistes vont disparaître dans les zones où leur densité est trop élevée, et des régions de coopérateurs et de défecteurs de formes assez proches de celles de la Figure 32 vont apparaître, tachetées par la couleur opposée en raison de la présence d'anticonformistes. C'est en effet ce que nous pouvons observer sur la Figure 33, où une population d'état initial totalement désordonné - 50% d'anticonformistes et 50% de comportements coopérateurs répartis aléatoirement sur tout le réseau - se réorganise en se stabilisant dans un état final avec à peu près 25% d'anticonformistes et 50% de coopérateurs organisés en groupes de même couleur, parsemés de la couleur opposée.

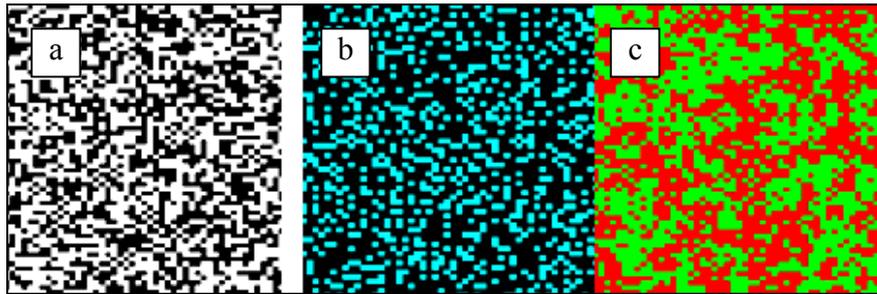


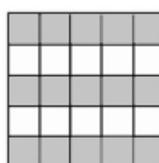
Figure 33 : Equilibre métamimétique dans un dilemme du prisonnier entre des agents conformistes et anticonformistes. La figure *a* donne un exemple d'état initial de distribution aléatoire uniforme de deux traits. Les figures *b* et *c* présentent le résultat de la réorganisation du système à partir d'un état initial de distribution uniforme telle que celui présenté en *a*. La figure *b* présente la population dans un état d'équilibre au niveau des règles (agents anticonformistes en bleu clair/gris clair) et la figure *c* présente l'état d'équilibre correspondant au niveau des comportements (comportements coopérateurs en vert/gris clair). On remarquera la dispersion des agents anticonformistes sur la figure *b*, et le regroupement des agents de même couleur sur la figure *c*. Les configurations sont stables aux deux niveaux, nous avons là un équilibre métamimétique.

Nous reviendrons par la suite sur les détails de la dynamique de transition. Remarquons simplement que les états finaux que nous pouvons voir ici sont l'expression au niveau global des contraintes d'auto-cohérence que les règles s'imposent au niveau local : un anticonformiste est satisfait si et seulement s'il est isolé, un conformiste est satisfait si et seulement s'il a réussi à s'insérer dans un groupe d'agents similaires. Par ailleurs, il y a un grand nombre d'équilibres métamimétiques caractérisés par des distributions de règles différentes.

III.2.B.a.ii) Choisir l'opulence, faire vœu de pauvreté

Nous allons maintenant regarder les propriétés du deuxième sous-ensemble symétrique de règles parmi les cinq que nous avons proposées (cf. III.2.A.b) : le couple *maxi/mini*. Dans ce jeu, les agents s'intéressent aux gains mais pas nécessairement de la même manière, certains cherchant à être riches, d'autres à être pauvres. Cela veut dire qu'une frontière entre une région *maxi* et *mini* ne sera stable que si les agents *mini* gagnent strictement moins que les agents *maxi*.

Commençons par remarquer qu'une configuration telle que les agents forment des bandes alternées de (*D,maxi*) et de (*C,mini*) est nécessairement stable, c'est donc un équilibre métamimétique :



En effet, dans cette configuration, le gain des agents *maxi* est égal à $6T+2P$ alors que le gain des agents *mini* est égal à $2R<2T$. Par ailleurs, nous pouvons transformer n bandes consécutives d'agents $(D,maxi)$ en agents $(C,mini)$ (ou faire l'inverse) sans changer la stabilité du système et en faisant varier les proportions des divers types de n/N . Pour tout $x \in [0,1]$, il existe donc un équilibre métamimétique tel que la proportion d'agents *maxi* et la proportion de défecteurs dans la population approche x avec une précision arbitrairement grande pour N assez grand.

Convergence vers l'attracteur

Essayons de décrire qualitativement ce qui se passe lorsqu'un tel système commence dans un état désordonné, comme par exemple une répartition aléatoire uniforme des règles et des comportements. D'après la structure du dilemme du prisonnier, les agents coopérateurs gagneront en moyenne moins que les agents défecteurs. La plupart des agents $(D,mini)$ et des agents $(C,maxi)$ seront donc insatisfaits dans leur état initial et s'engageront dans un acte mimétique. Un agent $(C,maxi)$ aura donc de fortes chances d'imiter la règle d'un autre agent. Le gain n'étant pas corrélé avec la règle dans l'état désordonné, le modèle de cet agent pourra être aussi bien un agent *maxi* qu'un agent *mini*. Dans le premier cas, l'agent restera *maxi* et aura de grandes chances d'adopter par imitation un comportement défecteur. Dans le deuxième cas, l'agent après avoir adopté la règle *mini*, révisera son comportement et aura de grandes chances de copier un agent coopérateur, adoptant ainsi la stratégie dominante du point de vue de la règle *mini*. Ainsi, la population aboutira à un état dans lequel les agents *maxi* seront défecteurs et les agents *mini* seront coopérateurs. Par ailleurs, du fait des dynamiques mimétiques, les agents ayant des traits en commun auront eu tendance à se regrouper. Comme le montre la Figure 5, c'est effectivement ce qui se produit, et à quelques rares exceptions près, dès la seconde période, tous les agents *maxi* sont défecteurs et tous les agents *mini* sont coopérateurs. Le système se stabilise au bout d'un temps de l'ordre de trois périodes sur un équilibre métamimétique.



Figure 34 : État proche de l'équilibre métamimétique pour un dilemme du prisonnier entre agents *maxi* et *mini*. L'état initial (a) est une distribution uniforme des règles et des comportements (les quatre niveaux de gris correspondent aux quatre chaînes métamimétiques différentes : *C-maxi*, *D-maxi*, *C-mini*, *D-mini*). La figure b montre l'état du système après une itération : les chaînes métamimétiques dominantes sont *D-maxi* (en noir) et *C-mini* (en blanc). Pratiquement tous les exemplaires restant des autres chaînes disparaîtront dans les périodes suivantes. Ici, $T = 5$, $R = 3$, $P = 1$, $S = 0$.

Influence du taux initial de coopération

Une dernière question que nous devons nous poser est celle de l'influence du taux de coopération initial sur l'attracteur métamimétique sélectionné. Une étude computationnelle révèle un résultat contre-intuitif (

Figure 35) : la proportion d'agents utilisant la règle *mini* après réorganisation est d'autant plus forte que le taux de coopération initial est faible. Ainsi, c'est précisément lorsque les agents ont déjà le comportement le plus approprié à leurs buts qu'ils sont les plus vulnérables lors d'un processus de réorganisation. Par ailleurs, et c'est une conséquence de la première constatation, le taux de coopération a tendance à décroître lorsque le taux initial de coopération croît.

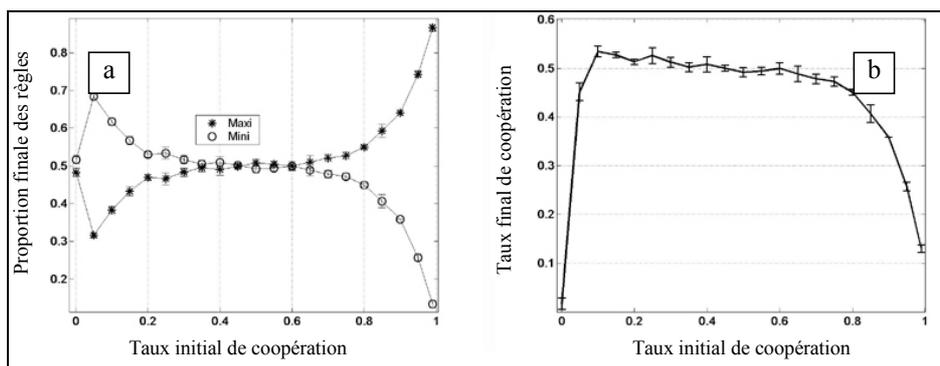


Figure 35 : Statistiques sur les attracteurs métamimétiques d'un dilemme du prisonnier métamimétique entre les règles *maxi* et *mini* en fonction du taux initial de coopération (distribution aléatoire), la distribution initiale sur les règles étant aléatoire uniforme. Le taux initial de coopération varie entre 0.001 et 0.99 , chaque point est obtenu comme une moyenne de 10 simulations indépendantes (3600 agents). Les barres d'erreur indiquent l'écart type. On remarquera que sur la figure a la proportion d'agents *mini* après réorganisation diminue globalement lorsque le taux initial de coopération augmente, ceci expliquant que sur la figure b, le taux final de coopération a tendance à décroître lorsque le taux initial de coopération augmente, les comportements défecteurs étant favorisés par la présence d'agent *maxi*. Ici, $T = 5$, $R = 3$, $P = 1$, $S = 0$.

Une explication qualitative de ce phénomène est donnée en annexe, celle-ci ne constituant pas un point majeur pour nos discussions futures.

III.2.B.a.iii) Devenir maximisateur par conformisme

Pour finir cet aperçu des systèmes métamimétiques simples, nous nous pencherons sur le comportement d'un jeu métamimétique où les agents ont le choix entre être *maxi* ou *conformistes*. L'ensemble des règles considéré ici n'est pas symétrique, et c'est là le *premier exemple de coexistence de deux règles qui représentent des univers totalement différents*, la première s'intéressant aux gains, la deuxième aux densités.

Commençons par remarquer que n'importe quel rectangle constitué de conformistes défecteurs, dont les coins sont écornés comme sur la Figure 30-g, plongé au milieu d'agents *D-maxi* sera stable. Pour une population de taille suffisamment grande, il est donc possible de trouver des équilibres métamimétiques tels que la proportion de conformistes dans la population soit arbitrairement proche d'un nombre quelconque entre 0 et 1.

Pour ce qui concerne la coopération, nous avons vu (cf. encart «Aux origines du chaos», I.3.A) que celle-ci était instable dans pratiquement toute la zone des paramètres définissant un dilemme du prisonnier. Mises à part les situations de dilemme social faible, des régions entièrement *maxi* seront donc des régions à comportement défecteur. De plus, pour les valeurs de paramètres que nous avons choisies ($T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$), les défecteurs gagnent le long d'un bord élémentaire de type *c* et pour des coins de type *b* ou *e*, et perdent le long d'un bord élémentaire de type *d*. Cela veut dire par exemple qu'un rectangle dont les coins sont écornés (type *g*) constitué de *C-conformistes* et entouré de *D-maxi* sera stable en ce qui concerne les comportements. Pour tout nombre entre 0 et 1, il existe donc des équilibres métamimétiques tels que la proportion de coopérateurs soit aussi proche que voulue de ce nombre.

En ce qui concerne les processus de réorganisation, d'après ce que nous avons vu en *i*) et *ii*), nous pouvons nous attendre à ce que les conformistes se regroupent pour former des structures compactes et que les maximisateurs se stabilisent sur un équilibre défecteur. Si par exemple nous partons d'une distribution uniforme sur les comportements et les règles, tous les agents *maxi* deviendront très rapidement défecteurs, ce qui aura pour effet d'augmenter la proportion de défecteurs dans la population. En conséquence, le comportement des agents conformistes sera biaisé en faveur de la défection. Nous pouvons donc nous attendre à ce que l'équilibre final montre une proportion de défecteurs bien plus importante que dans l'état initial. C'est effectivement ce que l'on peut observer au cours des simulations (Figure 36).

Nous pouvons remarquer que les groupes de conformistes coopérateurs ont tendance à se retrouver à l'intérieur des régions conformistes. Cela est dû au fait qu'un bord de type d entre une région C -conformiste et D -maxi est instable. Dans cette configuration, les agents maximisateurs à la frontière sont en effet insatisfaits, leurs gains étant de $3.T+5P=20$, alors que le gain de leur voisin conformiste le plus enclavé est de $7R=21$. Les agents $maxi$ le long de ce type de bord deviendront donc conformistes mais resteront défectueux.

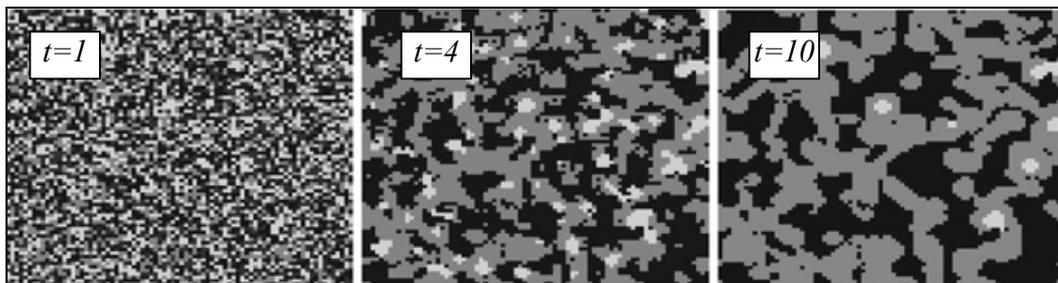


Figure 36 : Réorganisation dans un jeu métamimétique entre agents $maxi$ et agents conformistes à partir d'une situation initiale décrite par une distribution aléatoire uniforme sur les règles et sur les comportements. L'état final est caractérisé par des structures macroscopiques formées par le regroupement des conformistes (56%) au sein desquelles on peut voir quelques îlots de coopérateurs conformistes. (Voir annexes web pour l'animation).

De la même manière qu'en *ii*), nous pouvons étudier l'influence du taux initial de coopération sur l'état final. La Figure 37 montre le résultat d'une étude computationnelle dans le cas où la distribution des règles dans la population initiale est aléatoire uniforme. La première chose à constater est que la variance sur les proportions des différents types de règles et de comportements dans l'état final est très faible. Cela signifie que, étant donné les caractéristiques de la distribution aléatoire de départ, les attracteurs métamimétiques atteints à partir de cette classe de conditions initiales ont des propriétés statistiques similaires.

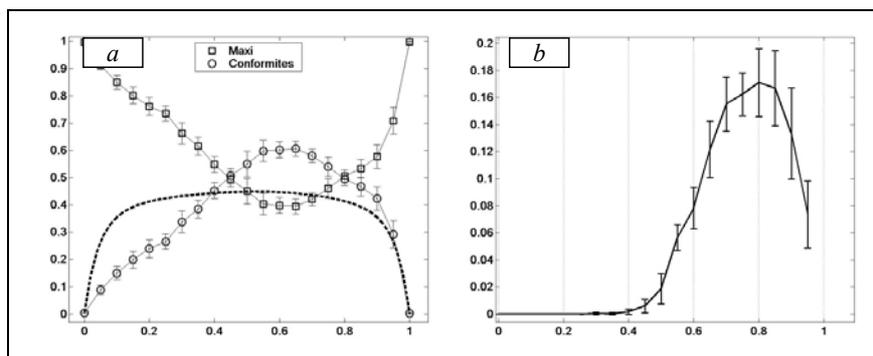


Figure 37 : Evolution de l'état final d'un jeu métamimétique entre agents $maxi$ et agents conformistes en fonction du taux initial de coopération (celui-ci varie entre 0 et 1). *a* : Evolution des proportions finales des règles en fonction du taux initial de coopération. Sur le même graphe en pointillé courbe donnant l'insatisfaction moyenne d'un agent $maxi$ dans l'état initial en fonction du taux initial de coopération. On peut remarquer la corrélation du succès des comportements conformistes avec cette courbe. *b* : Evolution du taux final de coopération pour un taux initial de coopération variant entre 0 et 0.95. Chaque point est une moyenne sur 10 populations de 6400 agents chacune. Les barres d'erreur indiquent la déviation standard.

Une explication qualitative de ce phénomène est donnée en annexes, celle-ci ne constituant pas un point majeur pour nos discussions futures.

III.2.B.b. Le mélange des genres

Nous venons d'étudier quelques cas de systèmes métamimétiques simples dans lesquels nous avons soit une paire de règles symétriques (*maxi/mini*, *conformiste/anti-conformiste*), soit une paire de règles dont les fonctions de valuation appréhendaient le monde sur des dimensions différentes (*maxi/conformistes*).

Les trois études que nous venons d'effectuer au a) nous permettent déjà de poser les remarques suivantes :

- *l'ensemble des attracteurs métamimétiques est très vaste et peut couvrir un ensemble très étendu de distributions possibles sur les différents types d'agents,*
- *lors d'un processus de réorganisation à partir d'un état désordonné, seul un sous-ensemble très restreint de cet ensemble d'attracteurs est atteint, celui-ci étant caractérisé par une valeur moyenne des différents types de règles et de comportements,*
- *les processus de réorganisation à partir d'un état désordonné aboutissent à l'émergence de distributions spatiales caractéristiques sur les règles et les comportements.*

Nous allons maintenant nous intéresser à un ensemble minimal de règles qui soit à la fois symétrique et contienne deux manières différentes de saisir le monde : par les gains et par les densités. Nous utiliserons pour cela l'ensemble des règles décrit par le Tableau 3 : *maxi*, *mini*, *conformiste*, *anticonformiste* et *aléatoire*.

L'exposition des résultats de simulation sera la suivante :

- i) Etude précise pour un couple particulier de paramètres (taux initial de coopération (*IniCoop*) de 30%, $T=5$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$), qui nous permettra de faire quelques remarques sur le type d'évolution auquel nous avons affaire.
- ii) Etude de l'influence du taux initial de coopération et de l'intensité du dilemme sur la dynamique.

III.2.B.b.i) La structuration des différences

Commençons par étudier la façon dont se structure un jeu métamimétique à partir d'un état désordonné lorsque l'on considère les cinq règles mentionnées. Nous allons donc voir ici les attracteurs de la dynamique P^0 , étudier leur caractéristique et la manière dont le système évolue vers l'attracteur à partir d'un état désordonné.

L'étude statistique présentée ci-dessous a été effectuée sur des populations de 10 000 agents, dont l'état initial est décrit par une distribution uniforme aléatoire des règles et un taux initial de coopération de 30 %, les coopérateurs étant uniformément distribués sur tout le réseau. La Figure 38 montre l'espace des règles et l'espace des actions avant et après réorganisation. Les agents sont pour la plupart satisfaits après réorganisation, mis à part quelques-uns qui restent frustrés (cf. l'animation en annexes web).

Comme nous avons déjà pu le remarquer dans les exemples précédents, la population atteint rapidement un attracteur métamimétique très structuré qui reflète les contraintes imposées par l'auto-cohérence des règles. Ainsi, des structures apparaissent au niveau global qui permettent à un observateur extérieur de deviner les types des différents agents : les *conformistes* sont localement en majorité, les *anticonformistes* sont localement en minorité, les agents *maxi* et *mini* s'enchevêtrent satisfaisant ainsi leurs intérêts complémentaires. La règle aléatoire, quant à elle, a totalement disparu à l'attracteur. En effet, on comprend bien qu'il ne puisse y avoir de configuration où une règle probabiliste soit son propre trait préférentiel, par conséquent, la règle aléatoire ne peut pas être un trait stable en tête de chaîne métamimétique, et doit disparaître dans ce cas de figure. Ceci nous permettra de ne plus considérer cette métrarègle par la suite⁶⁷.

On observe également une réorganisation au niveau des comportements avec émergence de clusters de coopérateurs et de défecteurs. Les zones les plus homogènes témoignent généralement de la présence de conformistes, les comportements isolés sont le fait des anticonformistes ou de *mini/maxi* qui se sont installés dans une région au comportement complémentaire au leur. Les régions fortement hétérogènes sont le signe de la coexistence d'agents *maxi* et *mini*. Ces structures qui apparaissent au niveau des comportements seraient difficilement interprétables sans la connaissance du niveau des métrarègles.

⁶⁷ Dans des systèmes à plusieurs méta-niveaux, il est cependant raisonnable de penser que des règles probabilistes seront stables à des niveaux intermédiaires, par exemple sous le contrôle d'une règle du type *maxi*, puisque la théorie des jeux nous indique que celles-ci sont très performantes dans certains cas de figure.

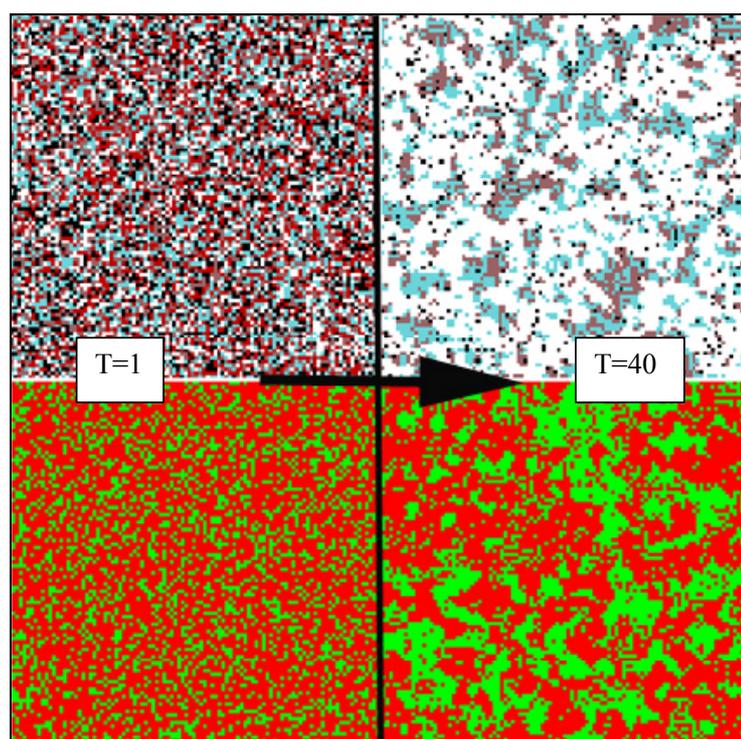


Figure 38 : Evolution d'un jeu métamimétique lorsque l'espace des règles est $\{aléatoire, maxi, mini, conformiste \text{ et } anticonformiste\}$. L'état initial ($T = 1$) est une distribution uniforme sur les règles (en haut à gauche) et un taux de coopération de 30 %, les coopérateurs étant répartis uniformément sur tout le réseau (en bas à gauche). Chaque petit carré représente un agent et le réseau torique comporte 10 000 agents.

En haut à droite : la distribution des règles à l'attracteur métamimétique au temps $T=40$. Nous pouvons remarquer que chaque population de règle a une structure caractéristique. Ces structures qui apparaissent au niveau global sont le résultat des contraintes locales imposées par l'auto-cohérence des règles : les *conformistes* sont présents localement en majorité (en blanc), les *anticonformistes* le sont localement en minorité (en noir), *maxi* (en bordeaux/gris foncé) et *mini* (en bleu/gris clair) s'enchevêtrent de manière à satisfaire leurs intérêts complémentaires.

En bas à droite : la distribution des comportements à l'attracteur au temps $T=40$. On peut remarquer des clusters de coopérateurs et de défecteurs avec cependant des exceptions à l'intérieur de ces clusters qui indiquent la plupart du temps la présence d'anticonformistes. Par ailleurs, il y a des régions où *C* et *D* s'enchevêtrent, qui correspondent à des populations enchevêtrées de *maxi* et *mini*.

Si maintenant nous nous intéressons au caractère dynamique de cette réorganisation, nous serons peut-être frappés par sa rapidité. Les Figure 39 et Figure 40 montrent les statistiques de l'évolution dans le temps des proportions des règles et des comportements. Le système a atteint l'attracteur en moins de 40 périodes. Celui-ci est caractérisé au niveau des règles par une prédominance des agents conformistes (un peu moins de 60 %), une présence en proportions à peu près égales des agents *mini* et *maxi* (autour de 20%), et une minorité d'anticonformistes (moins de 4 %). En ce qui concerne les comportements, nous assistons à un accroissement du taux de coopération qui passe de 30 % à 42 %. De plus, la variance sur les trajectoires du système, que ce soit dans l'espace des règles ou dans l'espace des comportements, est très faible. Ainsi, les distributions que nous pouvons observer dans l'état final sont caractéristiques de l'ensemble des états initiaux décrits par une distribution aléatoire sur les règles et une distribution aléatoire sur les comportements lorsque le taux initial de coopération est de 30 %.

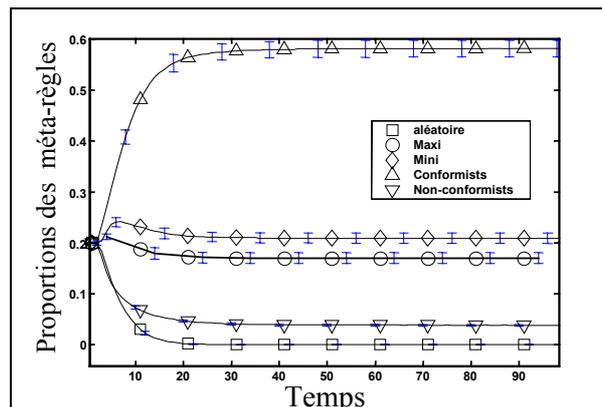


Figure 39 : Statistiques de l'évolution des proportions des règles métamimétiques au cours du temps pour le jeu défini par $T = 5$, $R = 3$, $P = 1$, $S = 0$. Les conditions initiales sont définies par une distribution uniforme des métarègles et un niveau de coopération de 30%. On constate que les proportions convergent rapidement vers une distribution d'équilibre qui définit les propriétés de l'attracteur métamimétique. On remarquera que la règle aléatoire a totalement disparu à l'attracteur. Les barres d'erreur représentent la déviation standard. L'étude a été faite sur 96 simulations indépendantes, constituées chacune de 10 000 agents.

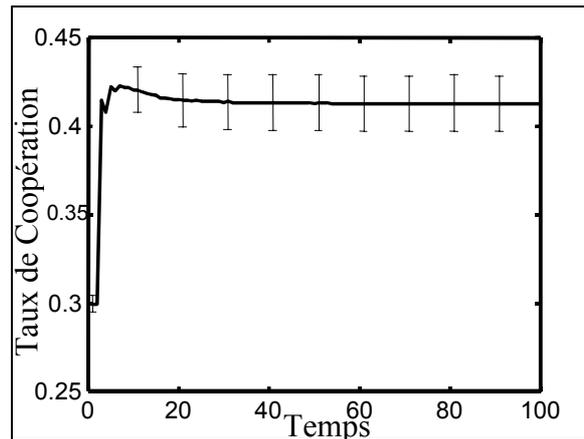


Figure 40 : Statistiques de l'évolution des proportions des comportements au cours du temps pour le jeu défini par $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$. Les conditions initiales sont définies par une distribution uniforme des métarègles et un niveau de coopération de 30%. La proportion de coopérateurs croît pour atteindre un niveau de 47%.

En regardant de manière plus fine l'évolution du taux de coopération en fonction des règles (Figure 41), nous pouvons observer sans surprise que les agents *maxi* adoptent très rapidement un comportement défecteur (au bout de trois à cinq périodes), les agents *mini* deviennent très rapidement tous coopérateurs ; les conformistes et les anticonformistes convergent vers des taux de coopération respectifs de 30 et 60 %.

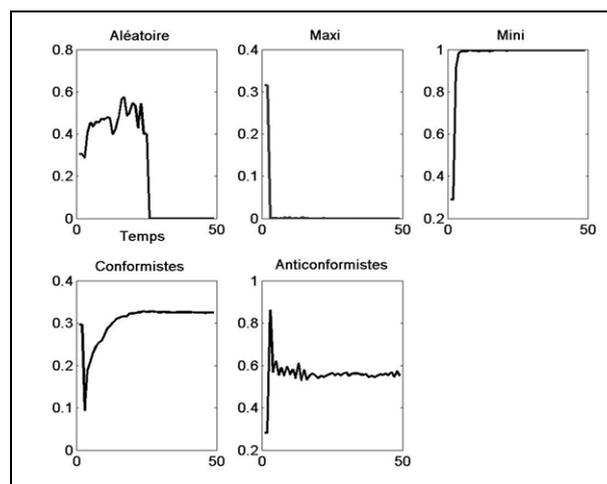


Figure 41 : Evolution du niveau de coopération par règle métamimétique. La règle *mini* est celle qui coopère le plus alors que la règle *maxi* est celle qui fait le plus souvent défaut. $T = 5$, $R = 3$, $P = 1$, $S = 0$. Les conditions initiales sont définies par une distribution uniforme des métarègles et un niveau de coopération de 30%.

Conclusions de cette étude

Quels enseignements tirons-nous de cet exemple ? En reprenant les distinctions que nous avons faites entre dynamiques des individus et dynamiques collectives, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- **Au niveau individuel** : lorsque nous regardons dans le détail l'évolution de la population, nous constatons qu'environ 76 % des individus ont changé de métarègle entre l'état initial désordonné et l'état final. Ainsi, si la règle particulière qu'adopte un agent à long terme était présente dans la population au début de la dynamique (il n'y a pas pour le moment d'apparition de nouvelles règles dans le système), elle est la plupart du temps inconnue de l'agent dans son état initial. L'agent construit au cours de ses interactions les objectifs qu'il sera amené à poursuivre et qui feront sens dans l'environnement dans lequel il vivra (Figure 42). Il atteint alors un état contrefactuellement stable : lorsqu'il s'imagine dans la position de voisins dont les stratégies sont différentes de la sienne, sa situation n'est pas meilleure. Nous avons là, à nouveau, un exemple de la dynamique de type 1 dont nous avons parlé dans l'introduction de cette partie. L'agent en tant que système fait évoluer ses propres métarègles en interaction avec l'environnement, d'après ses propres critères.

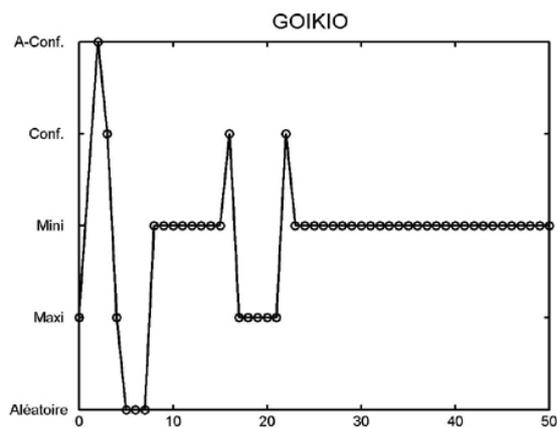


Figure 42 : Evolution de la métarègle de l'agent Goikio au cours d'un processus de réorganisation du type de ceux décrits par la Figure 39. Celui-ci initialement *maxi* explore toutes les règles possibles avant de terminer *mini*.

- **Au niveau collectif** : Nous avons un processus de réorganisation spontané qui fait évoluer le système d'un état désordonné vers un attracteur fortement structuré, principalement statique au cours d'un processus de cognition sociale (cf. annexes web pour l'animation). Le niveau des règles, qui détermine l'évolution du système, fait partie intégrante de l'état du système et évolue au cours du temps, traçant la métadynamique de la cognition sociale. La métarègle d'évolution du système du point de vue collectif est également la règle d'évolution du système, elle est constituée de la collection des métarègles individuelles.

De même qu'une pomme est un objet distinct de la soupe désordonnée constituée de ses éléments chimiques (carbone, oxygène, etc.), insistons sur le fait que la métarègle du système change radicalement entre le début et la fin du processus. Même si certains éléments se retrouvent, certains ont disparu et la structure de la métarègle finale n'a strictement rien à voir avec la métarègle initiale, autant dans la proportion des éléments qui la composent que dans leur organisation spatiale. La distribution finale des règles est le reflet au niveau collectif des propriétés intrinsèques de l'ensemble R des règles mimétiques possibles, qui s'expriment au travers des processus de réorganisation. C'est parce que les différentes règles s'influencent mutuellement dans leur auto-cohérence que des structures macro émergent. Nous voyons là s'affirmer le parallèle entre les jeux métamimétiques et le rôle que Gabriel Tarde (1890) attribuait à l'imitation dans la structuration des systèmes sociaux :

C'est par des accords ou des oppositions de croyances s'entre-fortifiant ou même s'entre-limitant, que les sociétés s'organisent ; leurs institutions sont surtout cela. C'est par des concours ou des concurrences de désirs que les sociétés fonctionnent.

* *
*

Nous ne pouvons pas conclure cette sous-section sans commencer à aborder le thème de la coopération. Nous avons déjà remarqué dans les chapitres précédents que les valeurs que nous avons choisies dans notre matrice du dilemme du prisonnier sont défavorables à la coopération dans le cadre de la théorie du choix rationnel ou de la théorie des jeux évolutionnistes. Le fait que le taux de coopération soit relativement élevé pour la plupart des attracteurs métamimétiques que nous venons d'étudier ne peut manquer de nous frapper. De

plus, les populations sont ici fondamentalement hétérogènes au niveau des métrarègles, hétérogénéité qui est souvent problématique dans les formalismes classiques des paradigmes que nous venons de citer. Ces propriétés, dont on a vu dans la partie I qu'elles étaient recherchées par les modélisateurs, ont un prix : l'abandon d'un critère d'optimisation, d'une définition de meilleur, qui serait unique et stable dans le temps, si l'on regarde du point de vue de la théorie des jeux ; l'abandon d'une définition du succès en termes de succès reproductif, si l'on regarde du point de vue de la théorie des jeux évolutionnistes. Ainsi, contrairement aux jeux standards, même si l'on peut envisager de désigner des « perdants » dans un jeu métamimétique - les règles qui ont été éliminées par la dynamique - cela n'a pas de sens de désigner un « gagnant ». On ne peut pas aller voir par exemple un anticonformiste et lui dire «vous êtes isolé, vous avez perdu !», ou aller voir un agent *mini* et lui dire « Vos gains sont inférieurs à ceux de vos voisins, vous avez perdu !», car tous deux vous répondront poliment « Merci, mais c'est précisément ce que je cherchais ».

III.2.B.b.ii) Cartographie des attracteurs

*Comme nous l'avons fait pour le modèle de Nowak et May, il nous faut vérifier que les deux propriétés importantes que nous avons trouvées, **stabilité de la coopération et hétérogénéité des populations**, ne sont pas l'effet d'un jeu particulier de paramètres. C'est pourquoi nous allons maintenant rendre compte d'une étude computationnelle extensive de l'espace des paramètres et regarder la dépendance des propriétés des attracteurs de la dynamique P^0 en fonction des conditions initiales.*

Si la dépendance des résultats précédents par rapport au taux initial de coopération est assez facile à contrôler, celle par rapport à la forme la matrice est assez délicate dans la mesure où l'espace des paramètres est de dimension quatre, ce qui dans le cadre d'une étude computationnelle représente un espace de recherche beaucoup trop vaste pour être exploré en détail. Nous allons donc reparamétriser la matrice du dilemme du prisonnier de manière à restreindre le nombre de paramètres, l'objectif étant de disposer d'une représentation en trois dimensions de l'influence du taux initial de coopération et de la force du dilemme social. La matrice des gains n'a d'influence directe que sur le comportement des agents *mini* et *maxi*. Etant donné que ces deux types d'imitation ne s'intéressent qu'aux valeurs relatives des gains, une transformation affine de la matrice ne change pas la dynamique (la situation est la même qu'en théorie des jeux ou en théorie des jeux évolutionnistes). Nous pouvons donc considérer

sans perte de généralité que $T=1$ et $S=0$. Reste à trouver une paramétrisation des valeurs de R et P qui donne un indice de la force du dilemme social. Nous prendrons une paramétrisation classique dans la littérature des dilemmes sociaux qui consiste à considérer un paramètre $0 < p < 0.5$, et à poser $T=1$, $R=1-p$, $P=p$ et $S=0$. Nous obtenons ainsi la matrice suivante :

<i>Agent B</i> →		
-----	<i>C</i>	<i>D</i>
↓ <i>Agent A</i>		
<i>C</i>	$(1-p, 1-p)$	$(0, 1)$
<i>D</i>	$(1, 0)$	(p, p)

Des valeurs de p élevées correspondent à un dilemme social fort (la punition pour trahison est faible alors que la coopération mutuelle n'apporte pas beaucoup plus qu'une défection mutuelle), les valeurs de p faibles correspondent à un dilemme social faible (la punition est sévère et la trahison n'apporte pas beaucoup plus que la coopération mutuelle).

Dans cette paramétrisation, la condition $T > R > P > R$ est satisfaite. En revanche la condition $T+S < 2R$ est violée (nous avons égalité), mais cela n'a pas un impact important sur la dynamique. Cette condition exprime qu'il n'est pas possible, pour deux joueurs, de partager leurs gains de manière à ce qu'il soit plus avantageux pour eux d'avoir des comportements distincts que de coopérer. Dans un jeu spatial tel que nous le considérons, le seul moyen d'effectuer un tel partage serait que tout un groupe d'agents oscille en alternant entre comportements coopérateurs et comportements défecteurs, ce qui n'est jamais observé. De plus, cela ne rapporterait jamais plus que la coopération mutuelle.

Dans toute cette analyse, nous considérons des systèmes métamimétiques qui se réorganisent à partir d'une distribution aléatoire uniforme sur les règles. Nous adressons la dépendance des dynamiques par rapport à la distribution initiale des règles dans la section III.2.B. Par ailleurs, nous considérerons le même ensemble de règles que précédemment, en excluant la règle aléatoire étant donnée son instabilité.

Nous présentons ici les statistiques les plus importantes, l'ensemble des données de ces simulations pourra être trouvé en annexes web. L'étude a été réalisée pour $0.1 < p < 0.45$ et un taux initial de coopération variant entre 5 et 95% (Figure 43), et les statistiques présentées correspondent à l'état de jeux métamimétiques lorsque ceux-ci ont atteint leur attracteur (ici après 40 périodes).

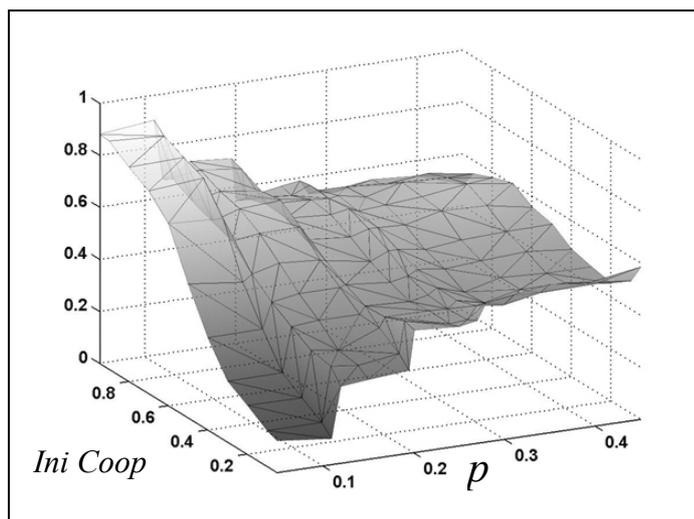


Figure 43: Dépendance du taux de coopération à l'attracteur en fonction de p ($p \in [0.05, 0.45]$) et du taux initial de coopération ($Ini Coop \in [0.05, 0.95]$). On remarque que ce taux est toujours supérieur à 12% et que l'influence des conditions initiales sur l'attracteur décroît lorsque p croît. Les simulations ont été effectuées avec une distribution initiale uniforme pour les métarègles. Chaque point de cette surface correspond au taux moyen de coopération à l'attracteur pris sur 10 simulations indépendantes de 2500 agents chacune.

La Figure 43 montre l'évolution du taux de coopération. Nous avons ici la confirmation du caractère fondamentalement hétérogène des attracteurs métamimétiques en ce qui concerne les comportements. Nous pouvons voir en effet que le taux de coopération varie entre 12% ($p=0.05$, $IniCoop=0.05\%$) et 88% ($p=0.05$, $IniCoop=95\%$) sur l'ensemble des paramètres étudiés.

La première chose qui semble contre-intuitive, et que nous allons tâcher d'expliquer, est que les zones où le taux de coopération atteint ses valeurs extrémales sont celles où la force du dilemme social est la plus faible. Dans cette zone nous assistons à une forte dépendance du taux de coopération à l'attracteur en fonction du taux de coopération initial. En revanche, lorsque le dilemme social est fort ($p > 0,2$), le taux de coopération varie entre 40 et 50 % et ne dépend pratiquement plus du taux initial de coopération. Contre toute attente, dans la zone où le taux de coopération initial est faible, le taux de coopération à l'attracteur augmente avec la force du dilemme social. La deuxième chose que nous remarquerons est que le taux de coopération à l'attracteur semble subir des discontinuités pour certaines valeurs de p .

Comme pour l'étude précédente, ces observations au niveau des comportements ne peuvent se comprendre qu'en prenant également en compte le niveau des règles. L'insatisfaction des règles *conformiste* et *anticonformiste* ne va pas dépendre directement du taux initial de coopération ni de la valeur de p . Ces règles sont aveugles aux gains. En revanche l'insatisfaction des règles *mini* et *maxi* vont directement dépendre de p et du taux

initial de coopération (comme nous l'avons vu au *a-ii*). Des agents *maxi* et *mini* insatisfaits perturbant les structures localement, ceci va avoir pour effet de faire varier l'insatisfaction relative de l'ensemble des règles au cours du processus de réorganisation en fonction de ces deux paramètres. Par exemple, si un agent *maxi* imite un anticonformiste et fait passer localement la proportion des anticonformistes au-dessus de 50%, ces derniers vont devenir insatisfaits et vont chercher à changer de règle à la période suivante.

Pour comprendre comment peut varier l'insatisfaction des règles *maxi* et *mini* en fonction de p , il faut commencer par regarder, comme au *a-iii*), la forme des distributions des gains associés à un comportement coopérateur ou un comportement défecteur. Rappelons que si nous avons un taux de coopération de γ et que les coopérateurs sont uniformément répartis :

- $\rho(\gamma, k) = C_8^k \gamma^k (1-\gamma)^{8-k}$ est la probabilité d'avoir k voisins coopérateurs,
- le gain d'un coopérateur est égal à $g_c(p, k) = k \cdot (1-p)$ avec une probabilité $\rho(\gamma, k)$,
- le gain d'un défecteur est égal à $g_d(p, k) = (k + (8-k)p)$ avec une probabilité de $\rho(\gamma, k)$.

La Figure 44 compare la distribution des gains associés à chacune des actions dans un état désordonné dans le cas d'un dilemme social faible ($p=0.1$) et dans le cas d'un dilemme social fort ($p=0.4$). Les courbes des distributions des gains associés à la coopération et à la défection se recouvrent plus ou moins selon que p est faible ou fort. La courbe associée à un comportement coopérateur est toujours décalée vers la gauche, dans le sens des gains plus faibles, par rapport à la courbe associée à un comportement défecteur. Ceci indique que, dans la majorité des cas, le gain maximal des agents défecteurs dans un voisinage donné sera supérieur au gain maximal des agents coopérateurs. De même, le gain minimal des agents défecteurs sera en général supérieur au gain minimal des agents coopérateurs.

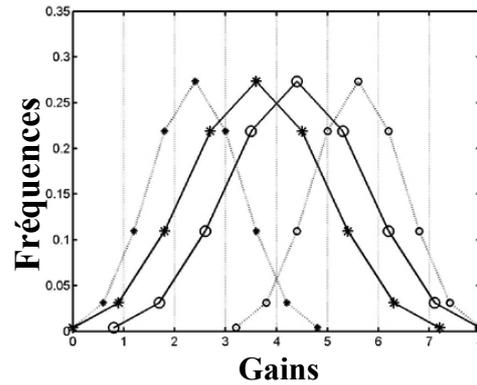


Figure 44 : Courbes de fréquence des gains pour un comportement coopérateur (-*-) et pour un comportement défecteur (-o-) dans un état initial désordonné avec 50 % de coopérateurs lorsque $p=0.1$ (lignes pleines) et lorsque $p=0.4$ (lignes pointillées). Le taux de recouvrement des courbes indique la probabilité pour qu'un agent défecteur tiré au hasard dans la population ait un gain strictement inférieur à un agent coopérateur également tiré au hasard dans la population.

Si les courbes ne se recouvraient pas, cela signifierait qu'un agent défecteur ne puisse pas être insatisfait en se comparant à un agent coopérateur. Lorsque le taux de recouvrement augmente, la probabilité pour qu'un agent coopérateur gagne plus qu'un agent défecteur dans un voisinage donné augmente. Ainsi, plus les courbes se recouvrent, et plus la probabilité augmente pour qu'un agent qui recherche la maximisation où la minimisation des gains se retrouve insatisfait par comparaison avec un agent utilisant la stratégie opposée à la sienne. En quelque sorte, le taux de recouvrement de ces courbes donne un indice du caractère dominant en termes de gains de la défection sur la coopération dans le cadre d'une comparaison avec les voisins. Nous pouvons formaliser cette idée en définissant un indice de dominance de la

défection sur la coopération par $i_{DC}(\gamma,p) = \sum_{i=0..8} \sum_{j=0..8} \rho(\gamma,i) \rho(\gamma,j) [1_{\{gd(p,i) < gc(p,j)\}}]$. C'est la

probabilité pour que dans un état désordonné, un agent défecteur gagne moins qu'un agent coopérateur pris au hasard dans la population.

Cet indice ne prenant pas en compte la corrélation entre les gains d'un agent et ceux de son voisin, ce n'est pas la probabilité pour qu'un agent défecteur gagne moins qu'un voisin coopérateur. Le calcul de cette probabilité, qui mènerait à celui de l'insatisfaction des agents *maxi* et *mini*, est extrêmement difficile car qu'il faudrait considérer toutes les configurations possibles sur les voisins et les seconds voisins d'un agent. Cependant, nous allons montrer que l'indice que nous proposons ici est une bonne approximation des variations des insatisfactions des agents *maxi* et *mini* en fonction de p . D'une certaine manière, nous pouvons relier par cet indice la difficulté pour un agent d'être *maxi* ou *mini* à la difficulté de

trouver un comportement (C ou D) qui soit le meilleur comportement dans une gamme la plus large possible de configurations des voisinages ; i_{DC} est donc un indice de l'incertitude sur le bon comportement à adopter lorsqu'un agent juge son comportement en comparant ses gains à ceux de ses voisins. Pour confirmer cette intuition, nous traçons sur le même graphe les valeurs de cet indice et le graphe des proportions de conformistes à l'attracteur en fonction de p et du taux initial de coopération (Figure 45). Ces deux surfaces devraient avoir les mêmes types de variations puisque les conformistes profitent directement de l'insatisfaction des agents *mini* et *maxi* : leur proportion devrait varier proportionnellement à cet indice.

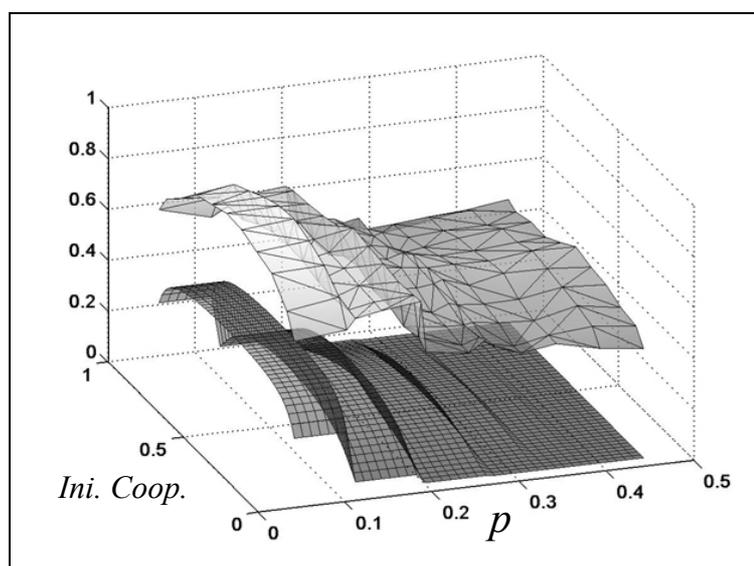


Figure 45 : Surfaces décrivant les variations de la proportion moyenne de conformistes à l'attracteur (position supérieure) et de l'indice i_{DC} (position inférieure). Nous pouvons voir que les variations de l'indice i_{DC} prédisent assez bien celles de la proportion de conformistes. Cet indice exprime la probabilité pour qu'un coopérateur tiré au hasard dans la population gagne plus qu'un défecteur également tiré au hasard, dans un état désordonné décrit par une distribution uniforme sur les règles, un taux de coopération de *IniCoop* uniformément distribué, et une matrice de jeu décrite par le paramètre p . i_{DC} est un indice de l'incertitude sur le bon comportement à adopter lorsqu'un agent juge en comparant ses gains à ceux de ses voisins.

La première chose à remarquer est que la proportion de conformistes à l'attracteur décroît globalement avec p , avec des discontinuités qui coïncident avec celles que nous pouvons voir sur le graphique décrivant la proportion de coopérateurs à l'attracteur. Étant donné que les conformistes et les anticonformistes ne sont pas directement sensibles aux valeurs de p et γ , cela traduit le fait que les insatisfactions des agents *maxi* et *mini* au cours du processus de réorganisation décroissent globalement en fonction de p . Par ailleurs, nous pouvons voir que la forme générale des deux surfaces sur la Figure 45 se correspondent et surtout, que les variations brutales des proportions de conformistes sont bien prédites par les

variations brutales de l'indice i_{DC} . Cela nous permet de confirmer que cet indice est bien un indice de l'insatisfaction des règles *maxi* et *mini* au cours du régime transitoire entre l'état désordonné et l'état organisé, et que cette insatisfaction est bien liée au caractère plus ou moins dominant en terme de gains contrefactuels du comportement D sur le comportement C . Les transitions brutales de l'indice i_{DC} s'expliquent par le fait que les gains sont discrets : lorsque p augmente, nous avons des transitions brutales de la valeur de cet indice lorsque l'un (ou plusieurs) des $g_a(p,i)$ passe en dessous de l'un (ou plusieurs) des $g_c(p,j)$. Ces transitions sont d'autant plus brutales que le produit des poids $\rho(\gamma,i)\rho(\gamma,j)$ est élevé.

Cet indice permet de rendre compte également du caractère concave du graphe décrivant la proportion de conformistes lorsque p est faible, qui est dû à l'uniformisation des des gains contrefactuels lorsque les comportements deviennent homogènes. Enfin, d'après l'étude du *a-ii*), nous pouvons nous attendre à ce que la proportion d'agents *mini* relativement à la proportion d'agents *maxi* augmente lorsque le taux initial de coopération décroît, ce que nous pouvons effectivement observer sur les graphes décrivant les proportions de *maxi* et *mini* (voir annexes web).

Mentionnons enfin que la proportion d'anticonformistes reste entre 4,5 et 6 % dans tout l'espace des paramètres, leur proportion ayant tendance à varier de la même manière que celle des conformistes.

Sachant cela, nous pouvons interpréter le graphe décrivant le taux de coopération à l'attracteur (Figure 43) en résumant ce que nous venons de voir :

- les systèmes évoluant sous des dilemmes sociaux faibles sont fortement conformistes (entre 70 et 80 % de conformistes). Ils sont donc très influencés par le taux initial de coopération ce qui explique la variation du taux de coopération à l'attracteur en fonction du taux initial de coopération dans la zone où le dilemme social est faible,
- les systèmes évoluant sous des dilemmes sociaux forts sont modérément conformistes avec une proportion de *maxi* et de *mini* autour de 25% pour chaque population. Étant donné que l'équilibre au niveau des comportements est défecteur pour une population *maxi* et coopérateur pour une population *mini*, ces deux populations vont entraîner la population conformiste vers un taux de coopération proche de 50% (entre 45% et 65% pour $p=0.4$), affaiblissant ainsi la dépendance du taux de coopération dans la population à l'attracteur par rapport au taux de coopération initial,

- les discontinuités observées du taux de coopération à l'attracteur en fonction de p ont pour origine le caractère discret des gains.

Conclusions de cette étude

Cette étude confirme les deux observations que nous avons relevées sur une étude de cas, à propos de la dynamique interne des jeux métamimétiques, à savoir :

- *une population d'agents jouant à un jeu métamimétique se réorganise spontanément à partir d'un état désordonné, atteignant rapidement un état globalement stable : un attracteur métamimétique. Ce processus s'interprète en terme de cognition sociale comme un « calcul » collectif à partir d'un état donné. Ces attracteurs présentent des structures caractéristiques de l'espace des métarègles,*
- *les attracteurs atteints dans le cadre d'un jeu métamimétique défini par un espace symétrique de règle sont tous hétérogènes, aussi bien au niveau des comportements qu'au niveau des métarègles, lorsque la distribution initiale sur les règles est aléatoire uniforme,*
- *les configurations désordonnées décrites par un même taux initial de coopération et une même matrice de jeu convergent vers des attracteurs similaires en termes de distributions sur les comportements et sur les gains,*
- *la coopération est présente pour l'ensemble des valeurs des paramètres étudié et est souvent prédominante.*

Il nous reste maintenant à étudier l'effet du couplage de la dynamique interne d'un jeu métamimétique avec des perturbations.

III.2.C La sélection par le bruit

Nous venons de voir que la dynamique d'un jeu métamimétique possède en général une multitude d'attracteurs relativement statiques, qui peuvent être classés en fonction de leurs propriétés globales (dynamique définie par P^0). Dans cette section nous étudions la dynamique perturbée P^e . Nous montrons ainsi que :

- 1) Les propriétés des dynamiques internes des systèmes métamimétiques (hétérogénéité et structuration) sont résistantes à l'introduction de bruit dans le système.*
- 2) L'introduction du bruit permet de sélectionner un ensemble de configurations concentrées autour de certains attracteurs de la dynamique interne. La dynamique du système sur le long terme acquiert alors une certaine indépendance par rapport aux conditions initiales, notamment quant à la distribution initiale des règles d'imitation.*

Apports attendus de cette étude

Du point de vue de la modélisation, l'étude des systèmes perturbés est importante pour trois raisons.

Au niveau le plus général, dans le cadre d'une étude des systèmes auto-organisés, il est important de voir, sur un exemple, de quelles manières des perturbations extérieures peuvent influencer le type de dynamiques que nous avons proposées dans l'introduction à cette partie. L'ajout d'une composante bruitée à un système métamimétique pourra nous permettre de voir si le point de vue de la clôture opérationnelle est intéressant dans le cadre des dynamiques que nous avons mises en évidence.

Au niveau intermédiaire qui est celui de la modélisation des systèmes sociaux, l'approche précédente est insatisfaisante, en particulier parce qu'elle suppose d'une part, que les agents peuvent observer d'une manière totalement transparente les actions de leurs voisins et les règles qu'ils utilisent, d'autre part qu'ils peuvent les copier avec exactitude. Si l'on peut admettre que par l'observation au travers d'interactions, notamment verbales, des individus sont susceptibles d'inférer ces deux types de traits, ces inférences seront sans aucun doute soumises à des erreurs, celles-ci n'étant pas de la même nature ni de la même ampleur lorsqu'il s'agira d'inférer des comportements visibles ou des règles, lorsqu'il s'agira d'imiter les moyens ou les buts. Par ailleurs, un individu peut également commettre des erreurs lorsqu'il cherche à copier un trait donné. Une première approche pour adresser ce problème consiste à

envisager que les agents commettent des erreurs aux différents niveaux, ce qui revient à dire que la dynamique que nous avons considérée est bruitée.

Au niveau spécifique de l'étude de l'émergence de la coopération, il nous faut vérifier que les propriétés des systèmes que nous venons d'étudier sont robustes aux perturbations, celles-ci étant la plupart du temps nuisibles à l'émergence et à la stabilité de la coopération. Par ailleurs, une question qui se pose naturellement dans les études précédentes est de savoir si l'hétérogénéité constatée aux attracteurs des dynamiques métamimétiques n'a pas pour origine l'état initial particulier que nous avons considéré ; à savoir, une distribution aléatoire uniforme sur les règles. L'introduction de perturbations pourra nous permettre de voir par exemple, si des hétérogénéités telles que celles que nous avons observées peuvent réapparaître sous l'effet des perturbations à partir d'un état décrit par une distribution uniforme au niveau des règles et des comportements (par exemple une population initialement constituée entièrement d'agents *D-maxi*).

La structure des perturbations

Nous introduirons ici le bruit sous une forme très simple, souvent utilisée en modélisation lorsqu'il s'agit d'avoir une première approche de la résistance d'un système aux perturbations (voir par exemple Young 1993* & 2001). Celle-ci consiste à supposer que pour une action donnée, les agents arrivent à la réaliser selon les principes qu'ils se sont donnés avec une probabilité $(1-\varepsilon)$ et agissent de façon aléatoire dans l'ensemble des possibles avec une probabilité $\varepsilon \in [0,1]$, ε étant généralement petit devant 1. Ce type d'erreur pourra être interprété selon les cas comme une erreur de perception, de mémorisation, d'inférence ou d'exécution.

Étant donné qu'en l'absence de forces internes structurantes, un système à n éléments, quels que soient son état initial et le niveau de bruit, évolue avec une distribution uniforme sur ces n éléments et une configuration spatiale désordonnée, nous pourrions mesurer la force des attracteurs métamimétiques à leur écart avec l'état désordonné de distribution spatiale uniforme.

Nous conservons dans cette section l'hypothèse d'une *mise à jour parallèle synchrone* des règles et des comportements (voir les annexes web pour des exemples de mise à jour asynchrone).

Les paramètres de la matrice du dilemme du prisonnier seront toujours pris de la manière suivante : $T=1$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$.

Les agents que nous considérons ici sont myopes, sans mémoire et peuvent envisager les règles *mini*, *maxi*, *conformistes* et *anticonformistes* décrites précédemment. Comme dans la section précédente, nous allons commencer par regarder le comportement de systèmes simples avant d'étudier un système complet comportant les quatre règles. De plus, étant donné que le bruit peut intervenir à deux niveaux (sur les règles et sur les actions), la perturbation sera décrite par un vecteur $\varepsilon = (\varepsilon_r, \varepsilon_a)$. Nous avons donc une *structure* sur le bruit. La matrice perturbée P^ε sera irréductible uniquement si les *deux* composantes de ε sont non nulles. Nous ne pourrons donc parler de SSS que lorsque les deux composantes seront non nulles. Nous allons dans un premier temps regarder l'effet de chaque composante de ce vecteur sur la dynamique, l'autre étant nulle.

III.2.C.a Quel avenir pour les maximisateurs myopes dans une société conformiste ?

Nous avons vu au *III.C.a.iii*) que dans un jeu métamimétique non bruité entre agents conformistes et agents maximisateurs, l'attracteur métamimétique au niveau des comportements est globalement défecteur, les agents *maxi* entraînant les conformistes dans la défection. Nous allons donc considérer ici l'effet du bruit dans une population d'agents uniformément défecteurs. Nous commencerons par étudier séparément l'erreur sur les règles et l'erreur sur les actions dans le cadre d'un dilemme du prisonnier métamimétique.

III.2.C.a.i) Pourquoi l'erreur sur les actions favorise-t-elle le conformisme ?

Considérons un dilemme du prisonnier métamimétique, comme celui décrit en *III.2.A*, aux différences près que les seules règles autorisées sont les règles *maxi* et *conformiste*, et que les actions des agents sont soumises à un bruit de niveau ε . Lorsqu'un agent décide de réviser son comportement, celui-ci choisit au hasard⁶⁸ parmi les deux comportements possibles avec une probabilité ε , et choisit le comportement prescrit par sa règle avec une probabilité $(1-\varepsilon)$.

Une première étude computationnelle, semble montrer que l'erreur sur les actions est défavorable aux comportements *maxi*. La Figure 46 nous montre l'évolution spatiale et temporelle de la proportion des agents conformistes dans la population pour un niveau de

⁶⁸ On remarquera que comme il n'y a que deux comportements, le choix aléatoire tombe dans 50 % des cas sur la bonne réponse, et le taux réel d'erreur est de $\varepsilon/2$.

bruit sur les actions égal à 2%, lorsqu'il y a initialement autant de *maxi* que de *conformistes* répartis aléatoirement sur tout le territoire et que le taux initial de coopération est nul. Nous pouvons voir sur cette figure qu'après une période au cours de laquelle les conformistes diminuent en nombre, tout en se structurant en petits îlots (b), ceux-ci envahissent progressivement tout l'espace (c).

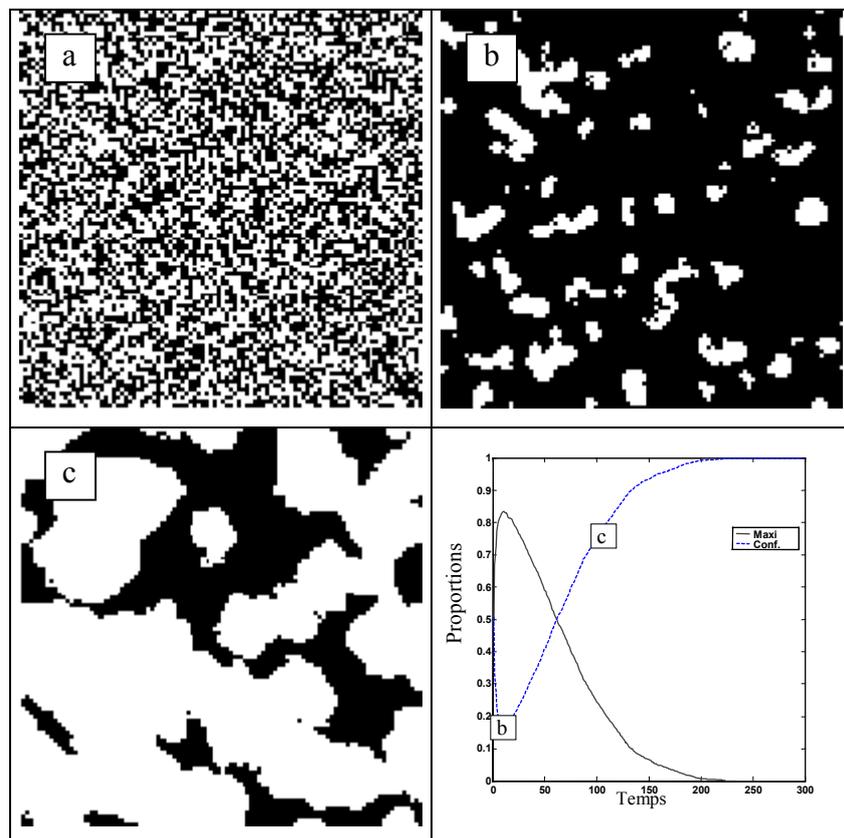


Figure 46 : Evolution des proportions de *conformistes* (en blanc) et de *maximisateurs* (en noir) pour un niveau de bruit de 2% sur les actions, un taux initial de coopération nul, une distribution initiale aléatoire uniforme sur les méta-règles (a) et $p_c=0.3$. Après une période au cours de laquelle les conformistes diminuent en nombre tout en se structurant en petits îlots (b), ceux-ci envahissent progressivement tout l'espace (c). (cf. annexe web pour l'animation)

Pour comprendre ce phénomène, nous allons regarder précisément ce qui se passe à la frontière des groupes conformistes. La Figure 47-a montre un exemple d'un tel jeu avec sur une même image les règles qu'utilisent les agents et leurs gains. Le niveau de bruit sur les actions est égal à 2% et p_c vaut 0,3. L'équilibre des agents *maxi* est globalement défecteur comme c'est le cas pour la plupart des évolutions partant d'un état initial désordonné (cf. I.2.A). Par ailleurs, comme le taux initial de coopération est nul, les *conformistes* sont également dans un équilibre défecteur stable. Le bruit se traduit donc par des agents qui localement tentent la coopération. Comme nous l'avons vu sur la figure précédente, les zones

conformistes croissent à leur frontière. Après la stabilisation des îlots conformistes, chacun d'entre eux se comporte comme un ballon que l'on gonflerait jusqu'à ce qu'il occupe tout l'espace disponible.

Pour trouver le lien avec le caractère bruité des comportements, jetons un coup d'œil au voisinage d'un agent *conformiste* *A*, qui se trouve à l'intérieur d'un groupe conformiste, mais néanmoins assez proche de la frontière pour avoir des voisins qui s'y trouvent. *A* est marqué d'une croix sur les figures. A un moment donné (figure b), *A* change par erreur de comportement et joue *C* avec ses voisins, tous conformistes défecteurs. Ceci a pour effet immédiat de rehausser les gains de ses voisins (couronne claire grisée) dont certains se trouvent à la frontière du groupe conformiste. De l'autre côté de cette frontière, les agents *maxi* (marqués d'une étoile) qui ont des voisins en commun avec *A* - mais ne voient pas *A* - se retrouvent face à des agents qu'ils évaluent meilleurs qu'eux. Insatisfaits, ils deviennent donc conformistes à la période suivante (c). L'un d'eux est cependant trop isolé pour garder sa règle conformiste et redevient *maxi* (d). A la fin du processus, le groupe conformiste a gagné deux nouvelles recrues.

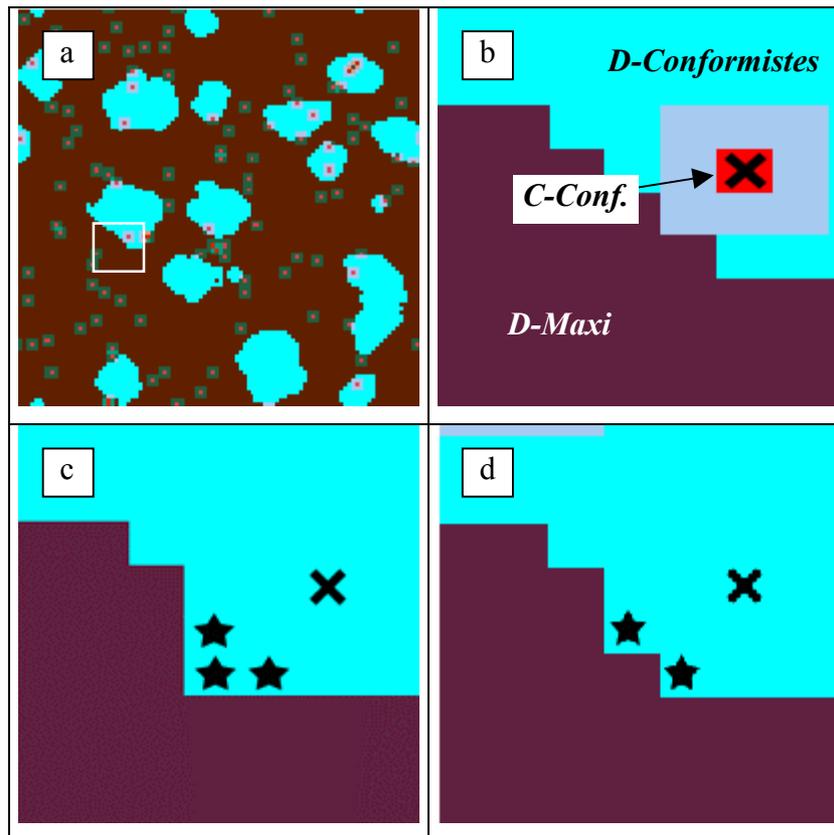


Figure 47: Détail de la frontière entre une région *conformiste* et une région *maxi*. La figure (a) traduit sur une même image les règles qu'utilisent les agents et leurs gains. Le niveau de bruit sur les actions est de 2%. L'équilibre global est totalement défecteur si bien que le bruit correspond à des agents qui localement tentent la coopération, comme c'est le cas de l'agent conformiste *A* marqué d'une croix (b). Ceci a pour effet de rehausser temporairement les gains de ses voisins *conformistes* (couronne), dont certains se trouvent à la frontière du groupe social. De l'autre côté de cette frontière, les agents *maxi* (marqués d'une étoile) qui ont des voisins en commun avec *A* - mais ne voient pas *A* - se retrouvent insatisfaits et deviennent également conformistes à la période suivante (c). L'un d'eux est cependant trop isolé pour garder sa règle conformiste et redevient *maxi* (d).

Nous pouvons généraliser cette première approche intuitive par la proposition suivante (preuve en annexe) :

Proposition :

Dans un dilemme du prisonnier métamimétique spatial composé d'agents myopes défecteurs maxi ou conformistes, avec un niveau de bruit ε_a sur les actions, s'il existe un îlot stable de conformistes, la distribution limite sur les états du système est caractérisée par une population uniformément conformiste. De plus, lors du régime transitoire vers cette distribution limite, la vitesse de croissance des îlots est, au premier ordre, proportionnelle au produit de leur périmètre externe par ε_a .

Pour estimer la vitesse de croissance, il suffit de regarder la vitesse de croissance d'un îlot conformiste entre deux temps où la longueur de la frontière $B(t)$ peut être considérée comme constante. Nous avons effectué des simulations avec une population de 40 000 agents, l'état initial consistant en un îlot conformiste carré représentant 25% de la population totale plongé dans une population *maxi*. Nous avons pris un taux initial de coopération nul et nous avons mesuré pour un niveau de bruit variant entre 0,001 à 0,02 le temps mis par l'îlot pour passer de 50% à 55% de la population. Durant ce temps, la taille de la frontière de l'îlot varie peu et peut être considérée comme constante, nous nous attendons donc à une dépendance en $1/\varepsilon_a$ de ce temps. Les résultats de ces simulations sont résumés par la Figure 48, et indiquent bien une vitesse de croissance de l'îlot proportionnelle à ε_a pour les faibles valeurs de ε_a . On peut alors estimer d'après ce graphique que la vitesse de croissance est de l'ordre de 3,5 fois la longueur de la frontière entre les deux groupes.

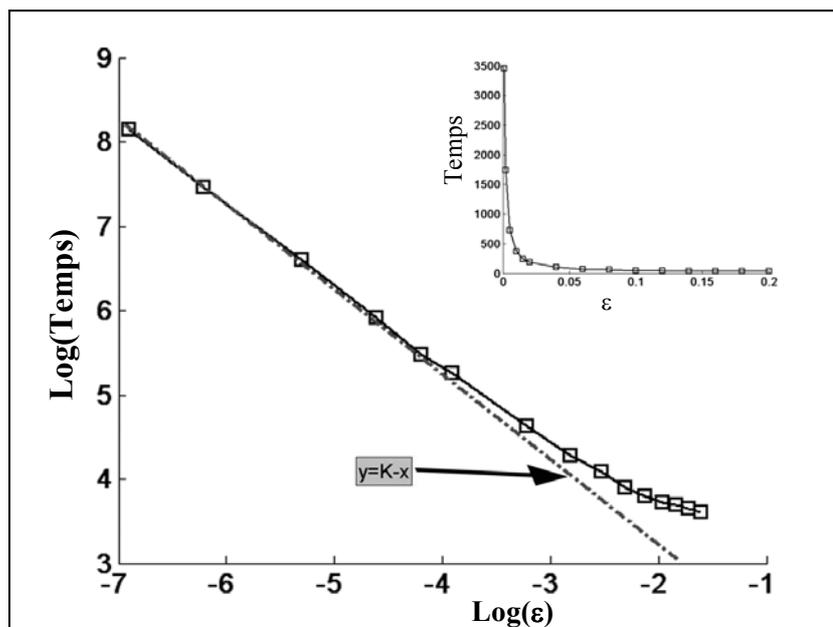


Figure 48 : Graphe loglog de la croissance d'un îlot *conformiste* en fonction du niveau de bruit ε_a sur les actions. La situation initiale est un îlot conformiste carré représentant 25% d'une population de 40 000 agents. Le taux initial de coopération est nul. Les ordonnées mesurent en coordonnées logarithmiques le temps mis par l'îlot pour passer de 50% à 55% de la population. On peut constater une vitesse de croissance de l'îlot proportionnelle à ε_a pour les faibles valeurs de ε_a .

Pour conclure, nous pouvons estimer la probabilité pour qu'un îlot conformiste stable se forme et envahisse le système étant donné une proportion initiale p_c d'agents *conformistes* uniformément répartis sur le réseau. Étant données 12 cellules du réseau arrangées suivant la structure minimale, une structure conformiste minimale s'y formera avec la probabilité p_c^{12} .

Pour un réseau de taille N^2 , la probabilité pour qu'au moins un flot stable se forme dès l'initialisation est égale à $1 - (1 - p_c^{12})^{N^2}$. Nous voyons sur la Figure 49 que la probabilité d'invasion en l'absence de bruit sur les règles est caractérisée par une brutale transition autour d'une probabilité p_c . Cette transition sera d'autant plus brutale que la taille du système sera grande, et elle prendra la forme d'une transition de phase lorsque celle-ci tendra vers l'infini.

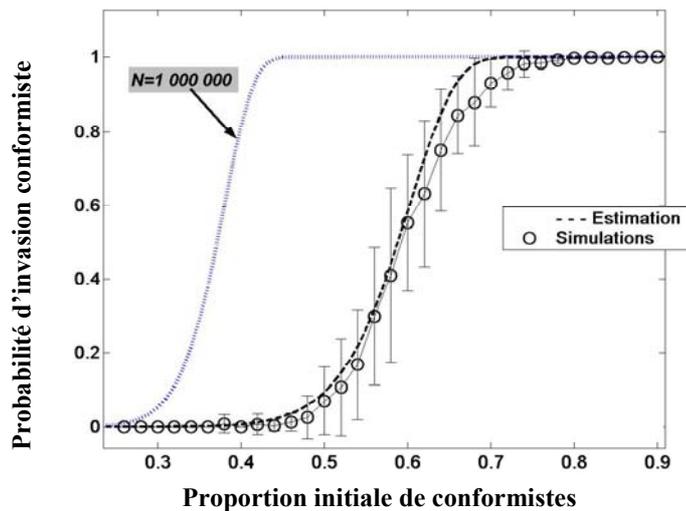


Figure 49 : Probabilité d'invasion conformiste en fonction de la proportion initiale p_c de conformistes uniformément répartis dans une population *maxi*. Les deux courbes superposées comparent les données issues de simulations (cercles) et la courbe théorique (pointillés) pour une population de 400 agents. La courbe pointillée à gauche montre la transition théorique pour une population de taille $N=1\ 000\ 000$ d'agents. Nous voyons qu'alors, la transition est encore plus brutale entre une zone de paramètres pour laquelle l'équilibre final est toujours totalement *maxi* ($p_c < 0.3$) et celle où l'équilibre final est toujours totalement *conformiste* ($p_c > 0.4$). Lorsque N tend vers l'infini, cette transition s'apparente à une transition de phase.

III.2.C.ii) Pourquoi l'erreur sur les méta-règles favorise-t-elle les comportements *maximisateurs* ?

Après avoir étudié l'influence d'un bruit sur les actions, nous allons de la même manière étudier l'influence d'un bruit sur les méta-règles en supposant que le bruit sur les actions est nul et que l'équilibre général est défecteur. Nous allons voir que dans ce cas, le bruit sur les méta-règles profite aux comportements *maxi*, alors que nous avons vu que le bruit sur les actions favorise les comportements conformistes. Plus précisément, nous pouvons montrer la proposition suivante (preuve en annexes) :

Proposition :

Dans un dilemme du prisonnier métamimétique spatial composé d'agents myopes maxi ou conformistes, avec un niveau de bruit ε_r sur les méta-règles, la distribution limite sur les états du système est caractérisée par une proportion $(1-\varepsilon_r/2)$ d'agents maxi et une proportion $\varepsilon_r/2$ de conformistes. De plus, durant le régime transitoire, il existe un temps T_c tel que pour $t < T_c$ la vitesse de disparition des îlots conformistes est égale à $\varepsilon_r/2$ le processus s'accélérate pour $t > T_c$.

Au cours de la démonstration de cette proposition, nous proposons une équation approchée de l'évolution de la proportion d'agents *maxi* à partir d'une population entièrement conformiste. La Figure 50 montre la différence entre un comportement réel d'un tel système soumis à un niveau de bruit de 2% sur les actions et l'approximation que nous en avons faite. La vitesse de disparition des conformistes est, dans un premier temps, égale à ε_r et s'accélère au-delà d'un temps critique T_c .

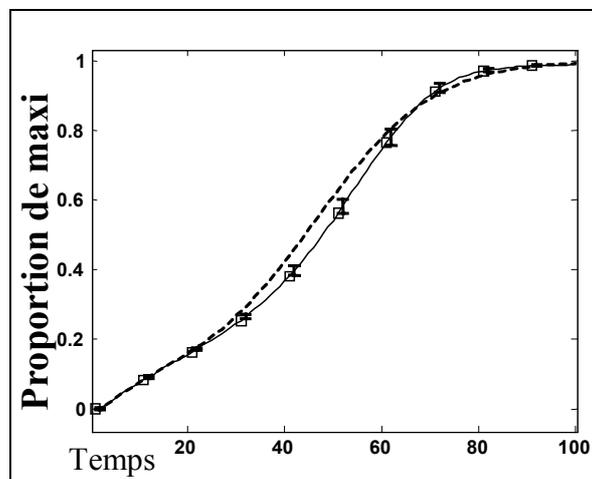
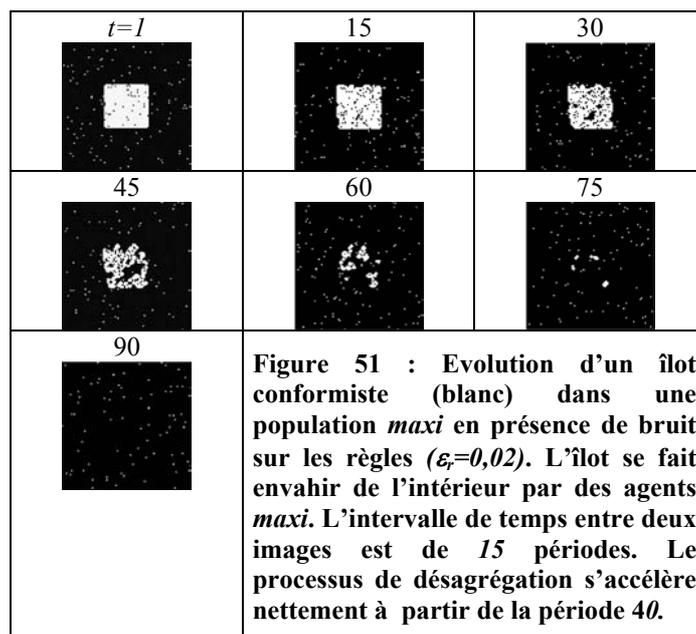


Figure 50 : Adoption de la règle *maxi* dans une population de conformistes défecteurs soumise à un niveau de bruit $\varepsilon_r=0.02$ sur les règles. Courbe issue d'une statistique sur 30 simulations en trait plein, et courbe théorique en pointillés (cf preuve de la proposition). Les deux courbes tendent vers $1-\varepsilon_r/2$ et montrent un changement de pente vers $T_c=40$ au moment où le phénomène d'adoption en cascade percole.

Le bruit sur les règles favorise donc les comportements maximisateurs, l'équilibre final d'un dilemme du prisonnier métamimétique perturbé au niveau des règles étant une population quasi homogène d'agents *maxi*. De plus, contrairement à ce que nous avons vu dans le cas d'un bruit sur les actions, la disparition des groupes conformistes se fait ici sur toute leur surface et non pas seulement à la frontière (Figure 51, cf. annexe web pour l'animation).



III.2.C.a.iii) Diagramme de phases

Nous pouvons maintenant décrire qualitativement le comportement d'un système métamimétique bruité composé d'agents défecteurs *maxi* et conformistes, lorsque le niveau de bruit sur les actions est ε_a et le niveau du bruit sur les règles est ε_r . Ici, la perturbation est caractérisée par deux paramètres, nous aurons donc des SSS différents pour des rapports $\varepsilon_a/\varepsilon_r$ différents. Par ailleurs, comme nous nous intéressons à des niveaux de bruit non négligeables, la distribution μ_ε ne sera pas nécessairement proche de la distribution μ_0 correspondante. Nous pouvons néanmoins donner une description qualitative de la distribution μ_ε en fonction de ε_a et ε_r . Pour cela, il nous faut préciser le comportement d'un agent *D-maxi* isolé dans un voisinage de *D-conformistes*.

Lemme : La probabilité $f(\varepsilon_a)$ pour qu'un agent A D -maxi isolé dans un groupe D -conformiste soit insatisfait lorsque le niveau de bruit sur les actions est égal à ε_a est au premier ordre⁶⁹ égal à $f(\varepsilon_a) = 17/2 \cdot \varepsilon_a + o(\varepsilon_a)$.

Preuve :

L'erreur étant définie comme un choix au hasard, les agents ont une probabilité de $\varepsilon_a / 2$ de devenir coopérateur. Le terme de premier ordre dans f correspond à deux types de situation possibles :

- soit A est insatisfait suite à une erreur commise par l'un de ses 16 seconds voisins ce qui arrive avec une probabilité $(1 - \varepsilon_a/2)^9 \cdot (1 - (1 - \varepsilon_a/2)^{16})$, le coefficient d'ordre 1 dans ce terme est $16/2$,
- soit A commet lui-même une erreur et de ce fait se retrouve perdant dans toutes ses interactions, ce qui arrive avec une probabilité $\varepsilon_a/2 \cdot (1 - \varepsilon_a/2)^{24}$, le coefficient d'ordre 1 dans ce terme étant $1/2$,

Nous avons donc bien $f(\varepsilon_a) = 17/2 \cdot \varepsilon_a + o(\varepsilon_a)$.



Imaginons donc ce qui se passe lorsqu'il y a à la fois un bruit sur les actions (ε_a) et sur les règles (ε_r). Les agents *maxi* sont d'autant plus susceptibles de changer de métarègle qu'ils sont isolés. Par ailleurs un agent conformiste est susceptible de changer de règle avec une probabilité au moins égale à ε_r puisqu'il peut également changer de règle par conformisme. Deux cas de figure sont possibles :

- soit le taux d'apparition des agents *maxi* dans un groupe conformiste (ε_r) est inférieur à leur taux de disparition qui est une fonction de ε_a , ce qui se traduira pour $\varepsilon \ll 1$ par la condition $\varepsilon_a < 2/17 \varepsilon_r$. Les agents *maxi* s'évaporeront alors à mesure qu'ils apparaîtront tout en pouvant localement, avec une faible probabilité former des clusters,
- soit le taux d'apparition des agents *maxi* est supérieur à leur taux de disparition et ils s'accumuleront dans les groupes conformistes jusqu'à provoquer des conversions en cascade qui finiront par faire disparaître les agents conformistes.

⁶⁹ Le développement à l'ordre 2, qui nécessite plus de calculs, est égal à $f(\varepsilon) = 17/2 \cdot \varepsilon - 194 \varepsilon^2 + o(\varepsilon^2)$.

Nous devrions donc assister à un basculement du système entre une distribution limite concentrée sur des états globalement conformistes et une distribution limite concentrée sur des états globalement *maxi* au passage de la courbe $\varepsilon_r = f(\varepsilon)$. Aux alentours de cette courbe, nous aurons des états limites globalement hétérogènes avec des clusters de *maxi* se formant aléatoirement au sein des groupes conformistes puis s'évaporant ou se déplaçant. Le développement limité de la fonction f comportant de très grands coefficients, il est difficile d'avoir une bonne approximation de cette courbe pour des niveaux de bruit non négligeables devant I car cela nécessite un calcul ardu pour déterminer les coefficients d'ordres supérieurs à 3. Nous pouvons cependant confirmer notre intuition par une étude computationnelle présentée sur la Figure 46. Des exemples de chacun des régimes pourront être trouvés en animation dans les annexes web.

La chose importante à retenir de cette étude est que lorsqu'il y a une structure sur le bruit, celle-ci influence la sélection du SSS. La structure du bruit peut alors devenir un paramètre de contrôle de la dynamique. Dans le cadre d'une étude plus poussée de ces systèmes, il faudra distinguer une composante endogène du bruit, due à la composante aléatoire du compromis exploration/exploitation des agents, d'une composante exogène purement environnementale. C'est l'équilibre entre ces deux composantes qui déterminera la structure du SSS.

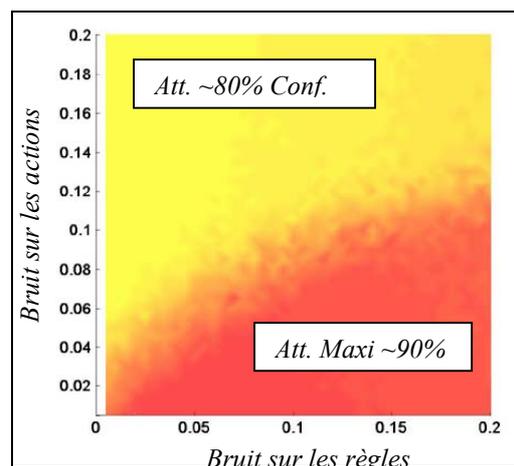


Figure 52 : Dépendance en fonction du bruit sur les règles et du bruit sur les actions de la proportion moyenne de conformiste sur le long terme dans un dilemme du prisonnier métamimétique bruité. La zone jaune/gris clair correspond à des distributions globalement conformiste, la zone rouge/gris foncé correspond à des distributions globalement *maxi*.

Ce graphique a été obtenu à partir de statistiques effectuées à la période 350 sur l'état d'un système de 1600 agents. L'état initial est un cluster de conformistes défecteurs représentant 30 % de la population dans une population d'agents *maxi* défecteurs. Les paramètres de la matrice du dilemme du prisonnier sont : $T=1$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$.

III.2.C.a.iv) Que se passe-t-il à la frontière d'un groupe coopérateur ?

Le cas d'un groupe conformiste coopérateur entouré de *maxi* défecteurs se traite de façon similaire. Sans entrer dans les détails, remarquons que suivant les valeurs de p , certains bords de frontière entre une région *maxi* et une région conformiste seront instables en dehors de toute perturbation, les agents *maxi* pouvant être insatisfaits à la suite d'une comparaison avec leurs voisins conformistes. Comme au III.2.B.a.iii, des agents *maxi* adopteront la règle conformiste et il se formera une région de conformistes défecteurs d'une largeur d'au moins deux agents entre le groupe conformiste coopérateur et le groupe *maxi* défecteur. Ceci nous ramènera au cas de l'évolution des frontières dans une région de défecteurs. En ce qui concerne les frontières stables en dehors de toutes perturbations, le bruit les amènera à bouger d'une manière légèrement différente, puisque c'est l'erreur des conformistes situés sur le bord de la frontière qui favorisera la croissance des groupes conformistes (le conformiste défecteur étant généralement plus enclavé dans le groupe coopérateur gagnera plus que tous ses voisins *maxi*). En revanche, la situation change radicalement à l'intérieur d'un groupe conformiste coopérateur puisqu'un agent conformiste qui deviendrait par erreur *maxi* défecteur serait extrêmement stable. Sans entrer dans une étude détaillée, nous dirons que les groupes de conformistes coopérateurs seront des hôtes privilégiés pour des *D-maxi* isolés. Ceux-ci seront plus stables que dans les groupes de conformistes défecteurs car leur insatisfaction dépendra d'un changement de comportement chez leurs 8 voisins et non chez leurs 16 seconds voisins. En revanche, dès que ceux-ci formeront des clusters, ils s'évaporeront avec une vitesse proportionnelle au produit de leur frontière par le bruit sur les actions. Une relation du même type que la précédente pourra être trouvée entre influence du bruit sur les actions et influence du bruit sur les règles.

Ceci étant, dans le cas général d'un jeu métamimétique bruité entre agents *maxi* et agents conformistes, on peut s'attendre à ce que le comportement du système soit assez bien décrit par la Figure 52.

III.2.C.b L'incertitude dans une société *maxi-mini*

Sans nous attarder sur ce point, nous allons brièvement évoquer le comportement d'une société *maxi-mini* soumise au bruit. Étant donné que nous avons des agents aux intérêts complémentaires, nous pouvons nous attendre à ce qu'en présence de bruit, les états les plus représentés soient composés pour moitié d'agents *mini* et pour moitié d'agents *maxi*. En effet, un agent *mini* coopérateur entouré d'agents *maxi* défecteurs aura une insatisfaction nulle, de même qu'un agent *maxi* défecteurs entouré de *mini* coopérateurs. Étant donné la structure du dilemme du prisonnier, l'insatisfaction des *maxi* coopérateurs sera toujours strictement plus grande que l'insatisfaction des *maxi* défecteurs, de même que l'insatisfaction des *mini* défecteurs sera strictement plus grande que l'insatisfaction des *mini* coopérateurs. Nous pourrions ainsi démontrer que la proportion de *maxi* coopérateurs et des *mini* défecteurs tend vers zéro avec le temps (en fait, ils disparaissent en quelques périodes).

Une société *maxi-mini* sera alors partagée entre des *maxi* défecteurs et des *mini* coopérateurs. Celle-ci, sous l'effet des perturbations, atteindra un état avec 50% d'agents de chaque type, ce qui est effectivement observé lors de simulations. De plus, si nous approchons les variations des insatisfactions des agents *mini* et *maxi* par l'indice⁷⁰ $i_{DC}(\gamma)$ proposé au III.2.B.b.ii, nous voyons que celles-ci seront maximales lorsque la population atteindra un niveau de 50% de coopération. Ainsi, bien que pour les états les plus fréquents, les proportions moyennes de coopérateurs et d'agents *mini* seront stables autour de 50 %, au niveau individuel, les agents changeront fréquemment de règle ou de comportement. Nous pouvons conjecturer que le SSS de ce système est l'ensemble des états qui minimisent le potentiel :

$$H(s) = \sum_{i=1..N} \sum_{j \in V_i} (s_i = s_j) ; s_k \in \{(D, maxi), (C, mini)\}$$

Somme sur l'ensemble des agents, du nombre de voisins qui ont la même stratégie que l'agent considéré, sachant que ces stratégies peuvent être (D,maxi) ou (C,mini)}

⁷⁰ Celui-ci mesure la probabilité pour que, dans un état désordonné de niveau de coopération γ , un agent défecteur gagne moins qu'un agent coopérateur (cf. III.2.B.b.ii).

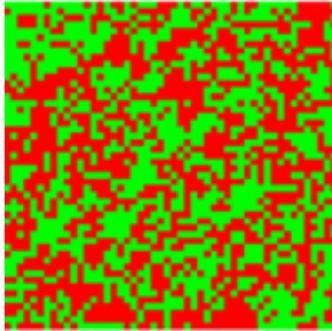


Figure 53 : Exemple de structures apparaissant au niveau des règles et les comportements dans une population d'agents *maxi* et *mini* jouant à un dilemme du prisonnier avec un bruit sur les règles et sur les actions de 5 %. Remarquons que le niveau des comportements est beaucoup moins structuré que dans une population de conformistes.

III.2.C.c L'effet des perturbations sur les systèmes métamimétiques

Nous sommes maintenant en mesure d'aborder les questions posées dans l'introduction à cette section. Une étude exactement symétrique à celle que nous avons faite, concernant la cohabitation entre agents conformistes et agents *mini*, montrerait les mêmes dépendances par rapport au bruit sur les actions et sur les règles, à la différence près que la distribution limite serait concentrée sur des états globalement coopératifs.

Ceci étant, nous pouvons retenir des études précédentes les choses suivantes :

- *les perturbations au niveau des différentes variables définissant un système métamimétique réduisent le nombre d'états dont le poids dans la distribution limite est significatif. Seuls certains attracteurs métamimétiques de la dynamique non perturbée sont représentés de manière significative. Cette sélection dépend de la forme de la perturbation. Dans l'exemple proposé ici, elle est paramétrée par le niveau de bruit ε_r sur les règles et le niveau de bruit ε_a sur les actions,*
- *les états apparaissant le plus fréquemment sont structurés au sens où ils possèdent des distributions spatiales caractéristiques, très différentes de la distribution aléatoire uniforme sur les différents traits. Ils ont en commun d'avoir des distributions sur les traits relativement similaires,*
- *lorsque ces états limites sont hétérogènes, les structures émergentes reflètent les contraintes locales imposées par l'auto-cohérence des règles (nous avons vu par exemple que dans un attracteur hétérogène maxi/conformiste de la dynamique non perturbée, les règles conformistes forment des clusters).*

III.2.C.c.i) Etre sans mémoire en environnement bruité

Regardons donc maintenant ce qui se passe dans un jeu métamimétique impliquant les quatre règles que nous avons décrites : *maxi*, *mini*, *conformiste*, et *anticonformiste*. La question que nous nous posons maintenant est : le type d'organisation observé dans le jeu sans bruit résiste-t-il à la présence de perturbations ? D'après ce que nous avons vu, nous devons nous attendre à ce que les types d'insatisfaction se divisent en trois sous-groupes : les agents anticonformistes qui ne peuvent, pour des raisons topologiques, dépasser en proportion un certain seuil, les populations d'agents *maxi* et *mini*, qui se renforcent l'une l'autre, et la population conformiste.

L'étude analytique de ce jeu métamimétique est très difficile et nous ne la ferons pas ici. Nous espérons avoir pu donner dans les exemples précédents quelques pistes ainsi que le cadre théorique qui permettront de mener à bien cette étude lors de futurs travaux. Qualitativement, les résultats que nous avons obtenus nous permettent de prédire que l'erreur sur les actions sera toujours défavorable aux règles *maxi* et *mini*, et que celles-ci seront moins stables de manière générale que pour un système avec seulement une paire de règles, étant donné qu'une hétérogénéité sur les actions, favorisée par la co-présence de *maxi* et de *mini*, d'une part rend inévitable l'amplification du bruit sur les actions par le bruit sur les règles, d'autre part augmente la probabilité pour qu'un agent coopérateur gagne plus qu'un agent défecteur.

Pour avoir une idée du comportement de ce système, nous avons effectué des simulations pour un dilemme du prisonnier défini par : $T=1$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$, un niveau de bruit sur les règles variant entre 0,5% et 20 %, un niveau de bruit sur les actions variant entre 0,5% et 10 %, un *taux de coopération initial nul* et une distribution initiale uniforme sur les règles (voir la Figure 54 pour un exemple de structures émergentes, les détails de ces simulations pourront être trouvés en annexes web).

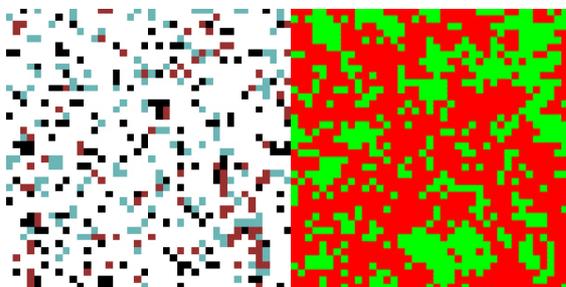


Figure 54 : Exemple de structures apparaissant dans un dilemme du prisonnier métamimétique bruité (5% de bruit sur les actions et 5% de bruit sur les règles). La règle conformiste est largement prédominante. Bien que les règles *maxi* et *mini* puissent former ça et là des clusters, leurs proportions restent non significatives étant donné le niveau de bruit sur les règles. Etat initial : distribution aléatoire uniforme sur les règles, taux de coopération nul.

Sur toute la zone des paramètres étudiée, les taux de coopération moyens sont d'environ 45%, les comportements étant structurés en clusters.

En ce qui concerne les règles d'imitation, l'évolution au cours du régime transitoire est particulièrement instructive (cf. annexes web pour l'animation). Comme pour le jeu entre la règle *maxi* et la règle conformiste (cf. III.2.C.a), nous assistons dans une première phase à une diminution très significative du nombre de conformistes. Parallèlement, nous assistons à une structuration des règles *maxi/mini* en de larges clusters hétérogènes ressemblant à ce que nous avons vu dans les jeux entre agents *maxi* et *mini* (Figure 53). Dans un deuxième temps, la règle conformiste reprend peu à peu du terrain et les clusters *maxi/mini* s'évaporent jusqu'à disparaître ou se stabiliser autour d'une taille caractéristique. Des mécanismes similaires à ceux que nous avons étudiés au III.2.C.a sont à l'œuvre à la frontière entre les régions conformistes et les régions *maxi/mini*.

Dans toute la zone de paramètres étudiée, la règle conformiste est prédominante (Figure 55) et le taux de coopération se situe entre 40 et 50%. Bien que les règles *maxi* et *mini* puissent former çà et là des clusters, leurs proportions restent relativement basses, et sont la plupart du temps non significatives étant donné le niveau de bruit. Leur insatisfaction est donc plus élevée relativement à celle de la règle conformiste, si on la compare au cas où il n'y a qu'une des deux règles en présence, *maxi* ou *mini*. La prédominance des conformistes est compréhensible dans la mesure où la règle conformiste est moins sensible au bruit que les règles *maxi* et *mini*, sa fonction de valuation étant une moyenne sur un voisinage, alors que les règles *maxi* et *mini* s'attachent à des gains individuels qui subissent de fortes variations en cas d'erreur sur les actions. Ces erreurs sur les actions ont d'autant plus de conséquences que le taux de coopération est proche de 50 % (voir l'étude sur l'indice i_{DC} au III.2.B.b.ii). Or ce taux de coopération élevé est précisément dû à la présence de populations *maxi/mini* au sein desquelles le taux de coopération moyen est de 50%, celles-ci ayant influencé les populations conformistes, dont le comportement dans l'état initial était uniformément défectueux. En quelque sorte, le couple de règles *maxi/mini* est victime de sa complémentarité : l'une n'apparaît pas sans l'autre, augmentant ainsi leurs insatisfactions respectives par l'effet de l'hétérogénéité des comportements qu'elles engendrent, qui les rend plus à même d'imiter une règle tierce.

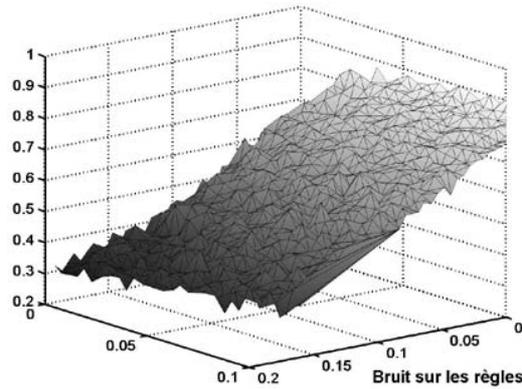


Figure 55 : Dépendance de la proportion moyenne de conformistes (les statistiques sont effectuées sur une fenêtre temporelle inversement proportionnelle au niveau du bruit le plus fort) en fonction de la structure des perturbations (niveau de bruit sur les règles entre 0,5% et 20 % et du niveau de bruit sur les actions entre 0,5% et 10 %). Les conformistes sont largement prédominants dans les régions où le bruit sur les règles est modéré, et restent dans tous les cas le type d'agent majoritaire dans la population.

III.2.C.c.ii) La mémoire retrouvée

La prédominance de la règle conformiste en situation de jeu bruité n'est pas surprenante. Lorsque l'on veut calculer avec fiabilité une espérance de gains, il est bien connu qu'il vaut mieux avoir de la mémoire. Or les agents *maxi* et *mini* tels qu'ils ont été définis ne s'intéressent qu'aux gains instantanés. Le moindre changement de configuration dans leur voisinage est donc susceptible de les rendre insatisfaits, ce qui explique leur vulnérabilité au bruit. Les comportements *maxi* et *mini* ne seraient-ils pas plus stables si les agents avaient des capacités cognitives plus étendues ?

Pour vérifier l'idée que l'insuccès des agents *maxi* et *mini* dans l'étude précédente est bien lié au manque de mémoire des agents, nous avons réalisé une étude en définissant les règles *maxi* et *mini* de façon légèrement différente. Nous avons considéré des agents capables de calculer une moyenne actualisée des gains. Ainsi, si $g_i(t)$ est le gain de l'agent i au temps t , et $\beta > 0$ un nombre réel, nous avons considéré des agents capables de calculer la valeur

actualisée des gains : $G(t) = \sum_{n \leq t} \beta^{t-n} g_i(n)$ pour chacun de leurs voisins, et d'indexer leurs

comportements sur la maximisation ou la minimisation de cette valeur⁷¹ (remarquons que ce calcul nécessite très peu de mémoire supplémentaire puisqu'il peut se faire de manière

⁷¹ Puisque ici toute l'histoire compte, nous sortons du cadre des chaînes de Markov, pour des raisons purement techniques, notre plate-forme multi-agent ne pouvant pas pour le moments prendre en compte la mémoire. Cependant, ce système devrait avoir un comportement très proche du cas où cette somme est effectuée sur ensemble de pas de temps fini, grand relativement à la constante de temps définie pas le taux d'actualisation.

incrémentale). Le but étant ici de regarder spécifiquement l'effet de la mémoire, nous avons fixé $\beta=0.05$ pour tous les agents *maxi* ou *mini*. Nous montrerons au chapitre 3, que cette valeur peut s'endogénéiser très naturellement. Ceci étant, nous pouvons nous attendre à ce que les nouvelles règles *maxi* et *mini* ainsi définies soient plus robustes aux perturbations, mais que leurs proportions, lorsqu'elles sont significatives, continuent à varier en fonction du bruit sur les actions et du bruit sur les règles d'une manière analogue à celle que nous avons évoquée précédemment. C'est effectivement ce que nous constatons (cf. annexes web). De plus, comme le montre la Figure 56, nous retrouvons les structures caractéristiques que nous avons décrites au III.2.A.

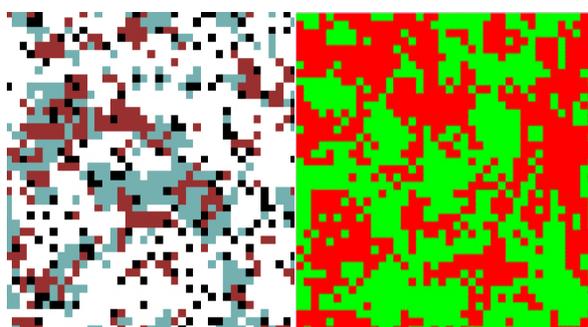


Figure 56 : Etat d'un jeu métamimétique bruité avec mémoire autour d'un attracteur (bruit de 5% sur les règles, 5% sur les actions, $\beta=0.05$). On peut observer les mêmes structures caractéristiques que dans le jeu non bruité (cf. III.2.B.b.i). Les configurations spatiales ne cessent de changer tout en gardant des formes caractéristiques, les proportions moyennes restant dans une gamme étroite de valeurs possibles. Les *conformistes* sont localement présents en majorité (en blanc), les *anticonformistes* le sont localement en minorité (en noir) ; *maxi* (en bordeaux/gris foncé) et *mini* (en bleu/gris clair) s'enchevêtrent de manière à satisfaire leurs intérêts complémentaires. Etat initial : distribution aléatoire uniforme sur les règles, taux de coopération nul.

III.2.C.c.iii) Une distribution endogène des règles d'imitation

Intéressons-nous maintenant à l'une des questions les plus importantes : à quelle vitesse le système converge-t-il vers la distribution μ_ε ? Et quelle est la dispersion de cette distribution? D'après ce que nous avons vu à la fin du chapitre 1, dans la perspective de l'auto-organisation, ceci est fondamental car la réponse nous dira si les systèmes métamimétiques peuvent se rétablir facilement après grandes perturbations ; dans la perspective de la modélisation des systèmes sociaux, il est essentiel d'avoir une idée de la relation entre la précision des mesures sur la condition initiale du système et les comportements qualitatifs du modèle à moyen terme ; dans la perspective de l'émergence de la coopération, la réponse nous dira si les attracteurs que nous avons rencontrés sont

représentatifs de la distribution μ_ε et si μ_ε est réellement concentrée autour d'attracteurs. Nous n'apporterons ici que des éléments de réponse, à travers des études computationnelles. Ceci nous permettra néanmoins d'entrevoir les propriétés remarquables des systèmes métamimétiques.

La Figure 57 :donne la proportion moyenne des différentes règles dans la distribution μ_ε après 100 pas de temps lorsque les conditions initiales sont des distributions homogènes sur les règles. Les proportions moyennes dans μ_ε sont quasiment identiques quelle que soit la condition initiale et la distribution sur les règles est très concentrée (ou plus précisément, la distribution sur les distributions de règles au sein de la population au cours du temps possède une variance très faible). La Figure 58 nous donne les distributions empiriques des différentes proportions de règles calculées sur une fenêtre temporelle de 700 périodes. Il y a donc d'une part, convergence très rapide vers μ_ε (en moins de 100 périodes), et d'autre part, forte concentration de μ_ε autour d'un petit nombre d'états caractérisés par les distributions présentées sur la Figure 57. Un résultat équivalent est obtenu si on considère des agents avec mémoire (Figure 59 et Figure 60), mais le temps d'atteinte de la distribution stationnaire est plus long. Par ailleurs, dans les deux cas, les structures spatiales observées sont similaires à celles que nous avons mises en évidence concernant la dynamique non perturbée. Si cette propriété est confirmée par une étude analytique, nous pourrions dire que le bruit opère une sélection extrêmement forte sur les systèmes métamimétiques au sens où, même pour des niveaux de bruit élevés, l'ensemble des états du système qui apparaissent avec une probabilité significative est très restreint. Une population jouant à un jeu métamimétique sous l'effet de perturbations extérieures (erreurs de perception, erreurs de mémorisation, erreurs d'implémentation) pourra alors s'interpréter comme un système opérationnellement clos dont couplage avec des perturbations extérieures révélera une composante particulière de sa structure interne. *Les structures émergentes dans un tel système sont alors l'expression de la diffusion du bruit (P^ε) à travers une structure préexistante (P^0). Elles sont la projection au niveau collectif des contraintes mutuelles que s'imposent les règles que les agents sont capables d'imaginer.*

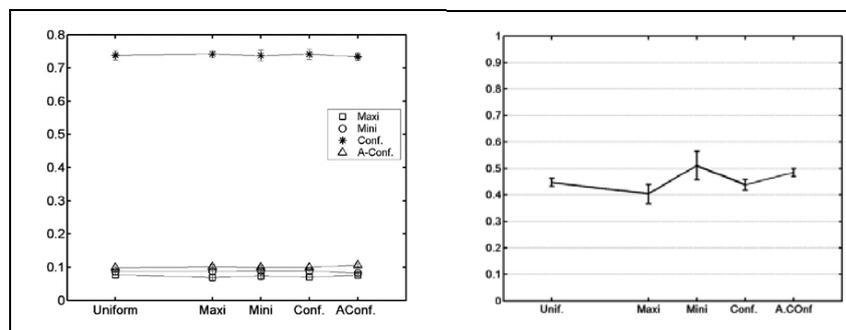


Figure 57 : Dépendance de la distribution limite de la dynamique métamimétique par rapport à la distribution initiale sur les règles en présence de bruit (5% sur les règles et 5% sur les actions), pour une population d'agents sans mémoire. A gauche : distribution sur les règles après 100 périodes en fonction de la distribution initiale (aléatoire uniforme, et états homogènes correspondant aux quatre règles). Les systèmes sont massivement conformistes et il n'y a pas de dépendance de la distribution finale des règles par rapport à la distribution initiale. A droite : taux moyen de coopération. Celui-ci n'a pas encore atteint sa distribution limite. Chaque point est une statistique sur 10 simulations indépendantes mettant en jeu 1600 agents. Pour chaque simulation, la valeur considérée est une moyenne sur les 20 dernières périodes.

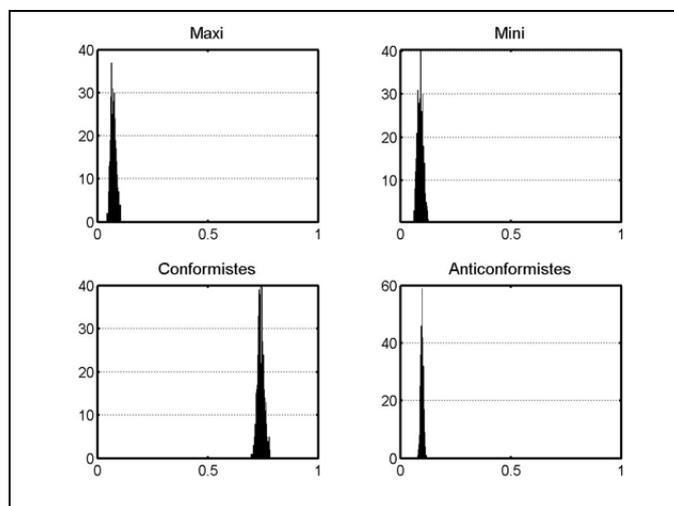


Figure 58 : Distributions empiriques des proportions des différentes règles calculées sur une fenêtre temporelle de 700 périodes, la dynamique ayant atteint sa distribution limite. On remarquera la faible variance de cette distribution. Les paramètres sont les mêmes que pour la Figure 57.

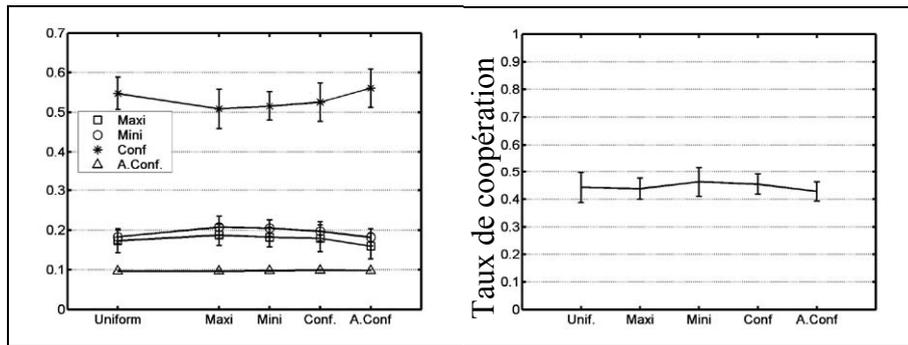


Figure 59 : Dépendance de la distribution limite de la dynamique métamimétique par rapport à la distribution initiale sur les règles en présence de bruit pour des agents avec mémoire ($\beta=0.05$, 5% de bruit sur les règles et 5% sur les actions). A gauche : distribution sur les règles après 2000 périodes en fonction de la distribution initiale (aléatoire uniforme, et états homogènes correspondant aux quatre règles). Les systèmes sont majoritairement conformistes avec une proportion très significative d'agents *mini* et *maxi* (~20%). Il y a très peu de dépendance par rapport à la distribution initiale. A droite : taux de coopération moyen après 2000 périodes. Chaque point est une statistique sur 10 simulations indépendantes mettant en jeu 1600 agents. Pour chaque simulation, la valeur considérée est une moyenne sur les 20 dernières périodes.

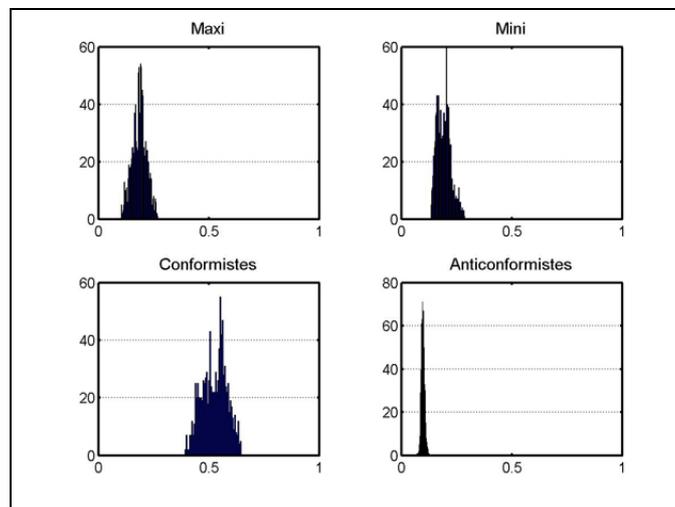


Figure 60 : Distributions empiriques des proportions des différentes règles calculées sur une fenêtre temporelle de 1000 périodes, la dynamique ayant atteint sa distribution limite. On remarquera la faible variance de cette distribution. Les paramètres sont les mêmes que pour la Figure 59 (agents avec mémoire).

Ainsi, dans un dilemme du prisonnier métamimétique, la distribution des règles d'imitation est endogène : une fois donnée la structure du bruit, la distribution sur les proportions des différentes règles est totalement déterminée. Cela n'élimine pas tous les paramètres, mais cela permet de faire l'économie du choix d'une distribution, ce qui est appréciable dans le cadre de jeux à populations hétérogènes. Il est néanmoins possible, comme nous allons le faire ci-dessous, de s'intéresser au régime transitoire à partir d'une condition initiale donnée. Dans ce cas-là, nous devons nous attendre à ce que des ensembles de conditions initiales proches rejoignent dans un premier temps un même attracteur métamimétique, comme c'était le cas pour l'étude de la dynamique non perturbée, puis qu'ils aient des trajectoires qualitativement similaires.

Concernant la modélisation des systèmes sociaux dans le cadre méta-mimétique, si cette approche s'avère pertinente, le travail du modélisateur ne sera plus de trouver un critère d'optimisation approprié reflétant ce que les agents se doivent d'optimiser ou la manière dont évoluent les type d'agents, mais de déterminer de façon stylisée un ensemble de capacités cognitives et de traits perçus qui permettront d'engendrer un espace de règles, ainsi que l'ordre de grandeur du bruit intervenant aux différents niveaux de traitement cognitif des agents. Cette direction de recherche sera certainement plus à même de proposer des modélisations-métaphores au sens du *I.3.A* que des modélisations prédictives. Si l'objet pertinent pour la compréhension de certains types de phénomènes sociaux est effectivement l'ensemble des règles que peuvent formuler les individus, cet ensemble est certainement bien trop complexe pour être modélisé, même approximativement. C'est donc sur le mode de la métaphore que nous allons aborder les phénomènes d'émergence de la coopération.

III.2.C.c.iv) Emergence de la coopération par différenciation

Dans le cadre d'une approche de la coopération, le formalisme métamimétique permet de voir la coopération humaine non comme le résultat d'un processus d'optimisation sous contraintes, qui est l'idée dominante en modélisation, mais comme un processus de différenciation par co-évolution. Ainsi, la question n'est pas de savoir comment des altruistes peuvent « survivre » dans un monde égoïste, avec tout le poids que la sociobiologie a pu ajouter au mot survivre, mais comment des objectifs hétérogènes peuvent se renforcer et s'entre-limiter dans leur identité propre pour aboutir collectivement aux structures observées. De ce point de vue, l'émergence de la coopération ne pose plus de problème puisque les

attracteurs métamimétiques sont généralement hétérogènes. La dynamique métamimétique, contrairement à ce que l'imitation laisserait penser de prime abord, impose une hétérogénéité de points de vue, et donc de comportements.

Un dernier exemple nous permettra d'illustrer ce point tout en faisant le lien avec la notion de clôture opérationnelle. Considérons une population de défecteurs maximisateurs, capables néanmoins de comprendre chacune des quatre règles que nous avons proposées. Si cette population est soumise à un certain niveau de bruit sur les règles et sur les actions, vont apparaître ici ou là des agents innovants ayant adopté l'une des trois autres règles, introduisant ainsi de *nouvelles* règles dans le système. La question est maintenant de savoir ce que la population, en tant que système, va faire de cette nouveauté. Si le système n'avait pas de dynamique interne, ces nouveaux types de comportements s'accumuleraient au sein de la population pour aboutir à un état désordonné de distribution homogène. Comme le montre la Figure 61, le comportement d'un système métamimétique est tout autre (voir également les annexes web pour l'animation).

Dans la configuration initiale du système (qui correspond à une dynamique initiale puisque, rappelons-le, les états du système contiennent la dynamique du système) les comportements mimétiques ne peuvent pas s'exprimer à cause de la trop grande homogénéité de la population. Il n'y a aucune petite différence de laquelle l'acte mimétique puisse s'emparer. Comme nous pouvons le constater, dans ce régime, les perturbations extérieures ou les comportements innovants ont très peu d'influence. Ils sont mis en évidence par des points isolés dans les parties inférieures des graphes. Dans cette configuration, la plupart des changements de comportement peuvent s'interpréter du point de vue de l'agent comme des erreurs : sur la figure, les couples de points superposés isolés signalent des agents qui après avoir tenté la coopération sont redevenus défecteurs. Dans une première phase d'évolution, le comportement du système est donc neutre par rapport aux nouveaux comportements (Figure 61).

Mais après une dizaine de périodes, la dynamique métamimétique s'accroche à une hétérogénéité et prend le dessus sur les perturbations, faisant apparaître un deuxième régime dynamique. Nous voyons très bien sur les deux figures qu'une perturbation initiale est amplifiée par la dynamique mimétique, générant ainsi un nombre extraordinaire de changements au sein de la population. Encore une dizaine de périodes et le système s'est réorganisé en profondeur, la dynamique a été transformée à l'échelle de toute la population et la dynamique interne du système a pris le dessus sur les perturbations, contrôlant ainsi les changements de proportions des différents traits modifiables. A ce stade, certaines règles qui

initialement étaient apparues comme des nouveautés ont été incorporées à la dynamique interne, redéfinissant ainsi la nature même du comportement du système. Cependant, toutes les innovations n'ont pas été intégrées de la même manière. En regardant le système après 50 périodes, on s'aperçoit que les comportements qui ont été adoptés sont essentiellement les comportements *mini*, et dans une moindre mesure les comportements anticonformistes.

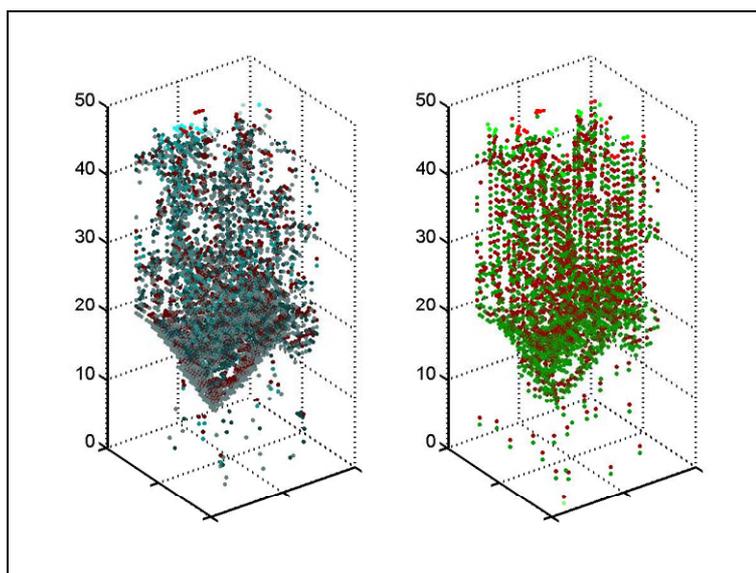


Figure 61 : Évolution différentielle d'un jeu métamimétique entre les règles *maxi*, *mini*, conformiste, anticonformiste dans un dilemme du prisonnier métamimétique décrit par un taux initial de coopération nul, une population initiale entièrement *maxi* et un bruit sur les actions et sur les règles de 0,5 %. La matrice du dilemme est quant à elle définie par $T=5$, $R=3$, $P=1$ et $S=0$. L'axe vertical représente le temps et sur chaque plan horizontal sont notés les changements dans la population entre la période définie par l'axe Oz et la période précédente. Nous avons donc ici l'évolution différentielle d'un système métamimétique sur 50 périodes avec à gauche, les changements dans l'espace des règles et à droite, les changements dans l'espace des comportements.

L'état initial étant homogène à tous les niveaux, la dynamique mimétique n'engendre aucune modification. Mais il suffit d'une petite hétérogénéité, provoquée par les perturbations extérieures, pour que la dynamique métamimétique s'enrange (après 10 périodes) réorganisant totalement le système en l'amenant vers l'état hétérogène.

Soulignons que la partie gauche de la figure représente les processus de réorganisation de la métarègle du système elle-même. Nous avons donc une image de la métadynamique (cf. annexes web pour l'animation et la comparaison avec la mise à jour asynchrone).

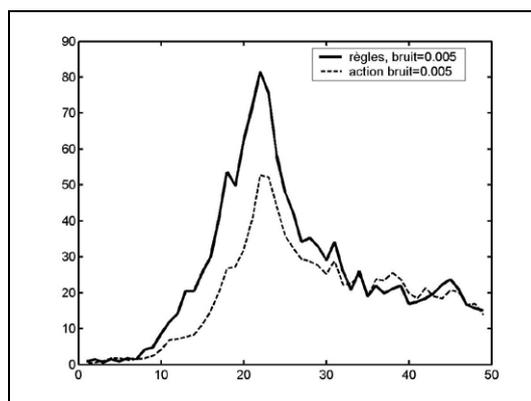


Figure 62 : Courbes des rapports du nombre de changements internes dus à la dynamique mimétique sur le nombre de changements dus aux perturbations pour ce qui concerne les règles (en plein), et pour ce qui concerne les actions (en pointillés). Nous pouvons distinguer les trois phases de la réorganisation : un régime neutre, un pic de réorganisation, et un régime caractéristique de la dynamique interne. Durant les premières périodes, ces rapports sont de l'ordre de 1, ils montent ensuite jusqu'à 80 pour ce qui est des règles, et 50 pour ce qui est des actions, lorsque le système se réorganise totalement, puis se stabilisent autour de 20 lorsque le système s'est réorganisé. Dans cet état, il y en a en moyenne 20 fois plus de changements du fait de la dynamique interne du système que du fait des perturbations extérieures.

Nous avons là un exemple de ce que nous pouvons appeler *l'émergence de la coopération au cours d'un processus de différenciation par co-évolution*. En effet, si l'on regarde l'état de la population après 50 périodes, nous pouvons constater que le taux de coopération a atteint 42 %, la population étant composée en grande majorité d'agent *maxi* (50%), d'agents *mini* (36%) et d'*anticonformistes* (11%). Mais ce processus ne peut pas s'interpréter comme des agents *mini* et *anticonformistes* qui auraient envahi une population d'agents *maxi*. Ce n'est pas une question de vie et de mort, de reproduction ou de succès. Ici, ce sont les mêmes agents qui ont adopté des buts différents après s'être trouvés insatisfaits.

D'après les études précédentes, nous pouvons nous attendre à ce qu'un second processus de différenciation intervienne, amenant la population vers un état dynamique globalement conformiste, de distribution stationnaire μ_ε . Ceci se produit effectivement (Figure 63) mais sur des échelles de temps beaucoup plus longues que la première réorganisation. Le plus remarquable est cependant que l'apparition des conformistes est très largement favorisée par l'issue de la première réorganisation. En effet, dans l'état initial, il aurait été très peu probable qu'un groupe conformiste stable apparaisse étant donné la taille relativement importante du cluster conformiste stable de taille minimale (douze agents). En revanche, une fois la première réorganisation effectuée, de nombreux voisinages comportent

les trois types de règles, ce qui abaisse le seuil de la majorité à trois agents. Ceci étant, la probabilité de formation d'un cluster stable de conformistes est nettement plus élevée et les conformistes apparaissent très rapidement en proportions non négligeables.

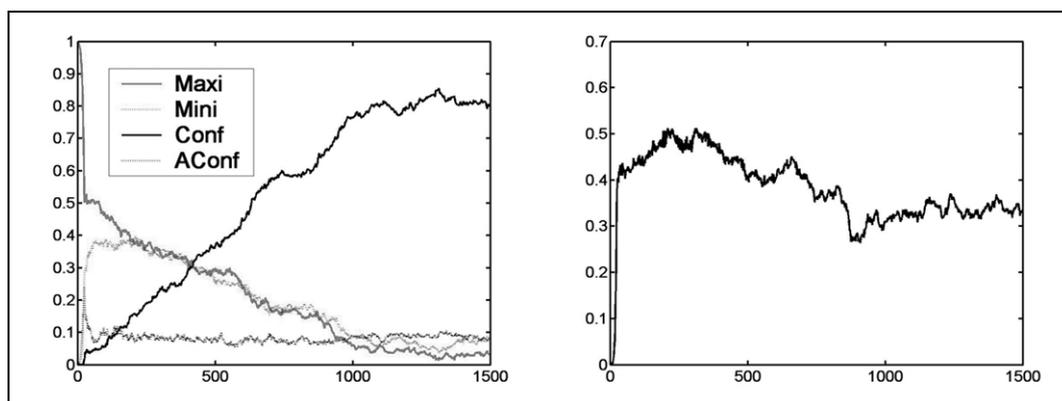


Figure 63 : Évolution des proportions des règles d'imitation (à gauche) et du taux moyen de coopération (à droite) dans un dilemme du prisonnier métamimétique avec un niveau de bruit de 0.5 % sur les règles et sur les actions, la population initiale étant composée exclusivement d'agents *maxi* défecteurs. Nous voyons clairement deux types de régimes transitoires, une transition vers un état méta-stable composé principalement d'agents *maxi* et d'agents *mini*. Cette phase peut durer un certain temps jusqu'à l'apparition d'un cluster conformiste stable qui déclenche une lente transition vers un bassin d'attraction où les populations sont à 80 % conformistes.

Cette approche de la coopération est certes très éloignée d'une définition en termes de gains et de perte de fitness, et nous reconnaissons que cette manière de poser le problème sort complètement du cadre traditionnel. Elle n'est cependant pas si exotique si nous remarquons que les disciplines expérimentales soulignent de manière récurrente que les comportements altruistes dans la « vraie vie » sont toujours dus à une hétérogénéité des motivations (Fehr & Fischbacher 2003* et aussi Ahn et al. 2001, Dal Forno et Merlone 2004*, Henrich et al. 2001*, Offerman et al. 2001*, Sonnemans et al. 1999*). La question de savoir ce qui se passe lorsque les gains dans le dilemme du prisonnier conditionnent dans une certaine mesure, la participation au jeu des agents (situation de contraintes économiques ou sélection naturelle par exemple) est cependant tout à fait légitime, nous l'évoquerons au III.4.B.

Cette approche de la coopération replace d'une certaine manière les phénomènes de coopération dans le cadre plus général de la culture, que nous pouvons envisager comme le théâtre de phénomènes de différenciation à partir de l'ensemble des représentations que peuvent formuler les individus. Ces phénomènes dynamiques de différenciations successives sont l'essence même de la cognition sociale. Nous nous rapprochons ainsi fortement du point de vue de Dominique Lestel exprimé dans son ouvrage « *Les origines animales de la culture* » :

La question de la culture peut [...] être posée dans toute sa plénitude, comme celle de l'espace physique, social, individuel et comportemental par lequel l'organisme développe une expérimentation par rapport aux nécessités auxquelles il est soumis, et les fait jouer les unes contre les autres. La culture est l'individuation par le collectif. Elle est en d'autres termes l'optimisation de stratégies de différenciation.

III.2.C.c.v) La nouveauté et le bruit

Commençons par rappeler la position de Francisco Varela (1981) qui devrait désormais avoir une résonance toute autre :

Tout comportement auto-organisé est engendré par la diversité de la cohérence interne d'un système opérationnellement clos.

Si nous abordons les systèmes métamimétiques sous cet angle, nous allons pouvoir reconsidérer le rôle des perturbations, déjà évoqué au III.1.B.f, en faisant une distinction entre bruit et nouveauté. L'exemple précédent en est l'illustration la plus simple.

La nouveauté est l'apparition de nouvelles règles inédites au sein d'un système. C'est un δf qui peut être *n'importe quoi* qui puisse être utilisé pour créer de nouvelles règles. Le système y est sensible de manière sélective en fonction de son état courant. Ainsi, dans l'état initial homogène de l'exemple précédent, le système incorpore très vite les règles *mini* et anticonformiste mais n'intègre pas immédiatement la règle conformiste, alors que dans l'état hétérogène, après la première réorganisation, le système est beaucoup plus susceptible d'intégrer la règle conformiste. Dans les deux cas, la nouveauté aboutit à une réorganisation totale du système à plus ou moins long terme en changeant sa *structure* interne. En reprenant les notations du III.1.C, la nouveauté se traduit par une modification de la matrice P^0 , qui peut changer de dimension (par exemple devenir plus grande). Il y a dans ce cas *changement d'espace des phases* du système.

Le bruit est au contraire la modification des règles existantes en d'autres règles existantes. Il s'interprète comme le passage de P^0 à P^e . Comme nous l'avons vu, celui-ci perturbe localement l'état du système mais ne change pas la structure globale (c'est ce qui se passe dans le régime limite du système). Au contraire, le bruit permet au système de se structurer autour d'un nombre restreint d'états possibles, vers lesquels il retourne même après une large perturbation, du moment que la description des éléments qui ont disparu est conservée. Le bruit permet alors au système d'exprimer la diversité de sa cohérence interne de manière plus déterminée que s'il avait simplement été initialisé au hasard dans un état quelconque.

Si nous revenons à la modélisation, et en particulier à la modélisation multi-agents, il n'y a pas d'espoir de faire réellement apparaître de la nouveauté étant donné que l'ensemble des états que le système artificiel pourra atteindre devra nécessairement pouvoir être décrit par le programme initial. Cependant, en identifiant l'espace des phases⁷² du système aux règles qui ont déjà été actualisées, nous pourrions avoir une idée des types de transformations provoquées par la nouveauté. L'apparition des règles *mini*, *conformiste* et *anticonformiste* à partir d'un système entièrement *maxi* en est un exemple. Dans cette perspective, il sera judicieux d'envisager des modes d'apparition différents pour ce qui est considéré comme du bruit et pour ce qui est considéré comme de l'innovation.

Remarquons enfin que l'état d'un système à un moment donné contraint l'ensemble des innovations qui sont susceptibles d'y être adoptées à moyen terme. L'ensemble des règles existantes agit comme un filtre sur l'ensemble des règles potentielles. Par exemple, la règle conformiste a très peu de succès dans les toutes premières périodes du jeu lorsque la population est encore relativement homogène. Ce phénomène est par ailleurs très fréquent dans des situations réelles, et chacun pourra facilement en trouver des exemples, que ce soit le problème de l'adoption de nouvelles techniques agricoles contraires aux traditions en monde rural ou le problème de la contraception et de la prévention contre le sida dans les populations où la présence religieuse est forte et le niveau d'éducation faible.

⁷² L'espace des phases d'un système est l'ensemble des états dans lesquels il peut se trouver. La dynamique est alors un chemin dans l'espace des phases et contraint l'ensemble des états vers lequel le système peut évoluer à partir d'un état initial.

Résumé du chapitre III.2

Dans ce chapitre nous avons donné un premier exemple de jeu métamimétique en proposant une généralisation du dilemme du prisonnier spatial.

Nous avons alors étudié le comportement de populations jouant à un dilemme du prisonnier métamimétique non bruité, étant donné un espace de règles constitué de quatre règles métamimétiques simples : *maxi*, *mini*, *conformiste* et *anticonformiste*. Ceci nous a permis d'exhiber des exemples des deux dynamiques dont nous avons parlé dans l'introduction à cette partie, les agents pouvant être considérés comme des systèmes qui modifient eux-mêmes leur métarègle au cours de leurs interactions avec le monde extérieur (dynamique 1), la population d'agents pouvant être considérée comme un système clos qui évolue selon sa dynamique interne, et change cette dernière de manière interne au cours de son évolution (dynamique 2). Dans un deuxième temps, nous avons regardé quelles relations pouvait entretenir la dynamique collective avec des perturbations, en montrant sur quelques exemples comment un système métamimétique peut se structurer sous l'effet du bruit, ses caractéristiques globales étant alors l'expression de la diffusion du bruit à travers sa structure interne.

Cette étude nous a permis de proposer une approche de la coopération qui ne se poserait pas en termes « d'avantages » de tel ou tel comportement, mais qui apparaîtrait comme l'effet de l'hétérogénéité des buts des individus dans une population d'agents métamimétiques. Nous avons montré que cette hétérogénéité apparaît spontanément au cours de processus de réorganisation, qui peuvent opérer à partir d'états non structurés comportant l'ensemble des règles possibles, mais également à partir d'états initiaux homogènes dans la mesure où le système est soumis à de petites perturbations.

Dans ce dernier cas, nous avons parlé *d'émergence de la coopération au cours d'un processus de différenciation par co-évolution*. Ceci exprime le fait que dans un monde où des agents métamimétiques sont capables de formuler un certain ensemble de règles, les structures émergentes qui apparaissent au cours de l'évolution d'une population sont la projection au niveau collectif de la structure interne de cet espace de règles d'imitation, l'angle de cette projection pouvant être modulé par le bruit. Ces structures sont donc une propriété intrinsèque de l'espace des règles considéré et de la structure des perturbations, et sont indépendantes de l'état initial du système.

III.3 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.

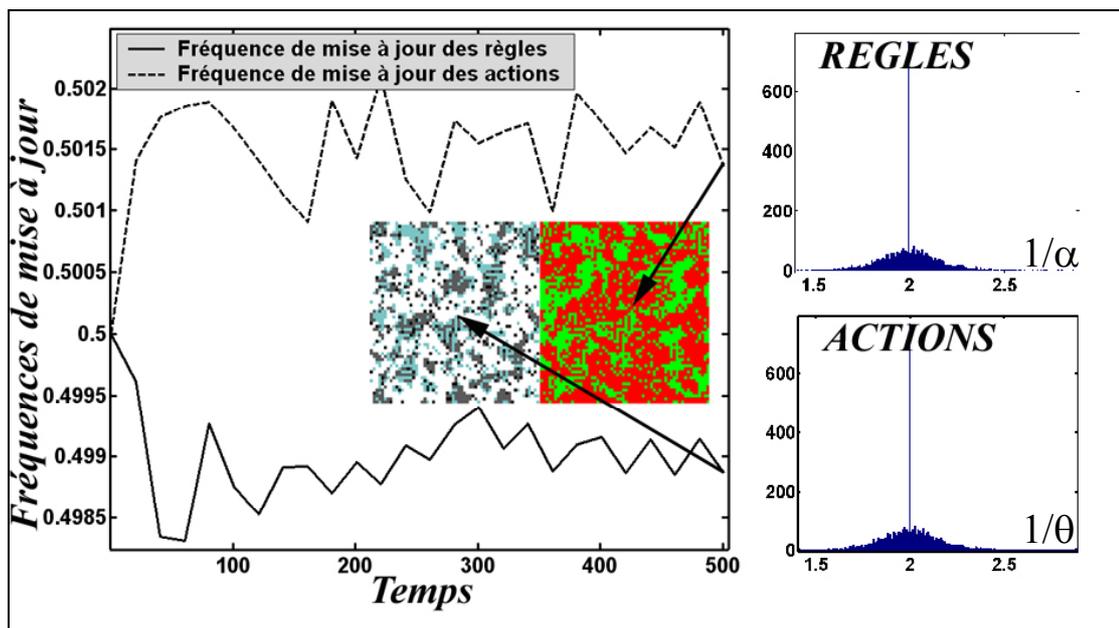


Figure 64 : Evolution des temps de mise à jour moyens dans une population d'agents métamimétiques jouant à un dilemme du prisonnier. Les conditions sont les mêmes qu'en III.2.B.b.i ($T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$). Les agents sont initialisés avec un temps moyen de mise à jour égal à deux sur les règles 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.

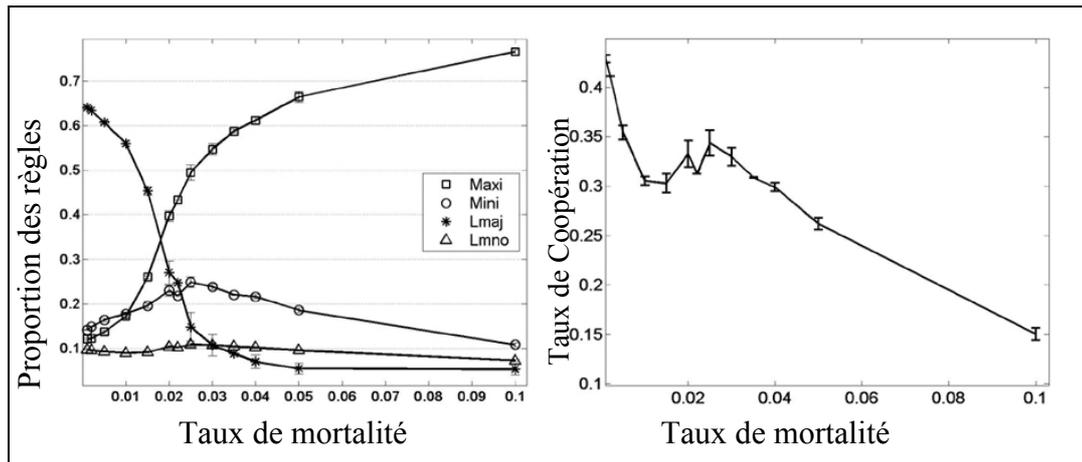


Figure 65 : État d'une population d'agents jouant à un dilemme du prisonnier métamimétique sous des contraintes de sélection après 3000 périodes (les proportions montrées ici se sont stabilisées au bout de 300 périodes). À gauche, la proportion des règles dans la population. À droite, le taux de coopération 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.

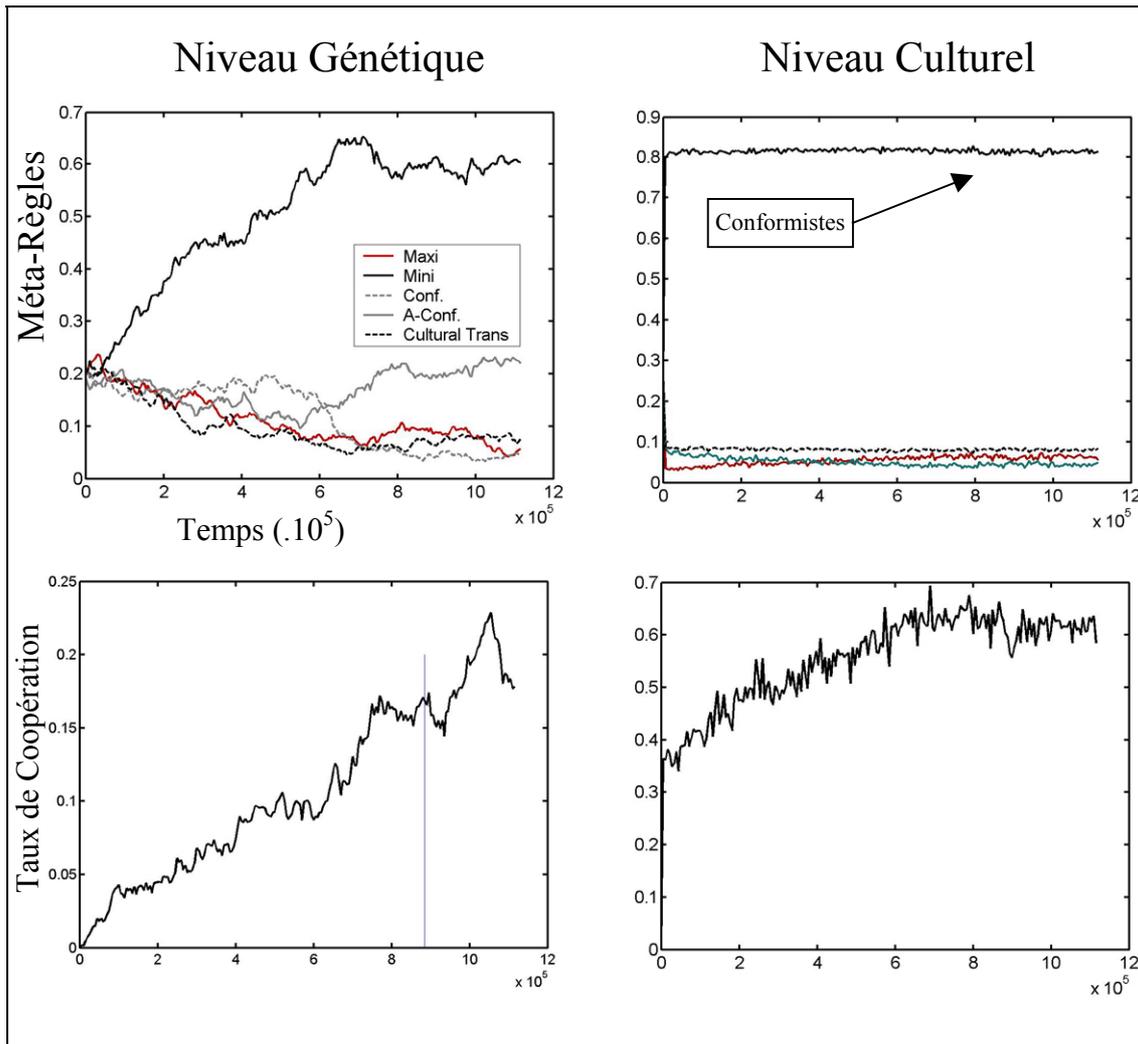


Figure 66 : Synthèse de l'évolution sur plus d'un million de périodes d'un dilemme du prisonnier métamimétique ($10\ 000$ agents) soumis à une pression de sélection. À gauche : évolution du génome, à droite l'évolution du niveau culturel. On remarquera en haut que le génome évolue fortement (à gauche) 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.

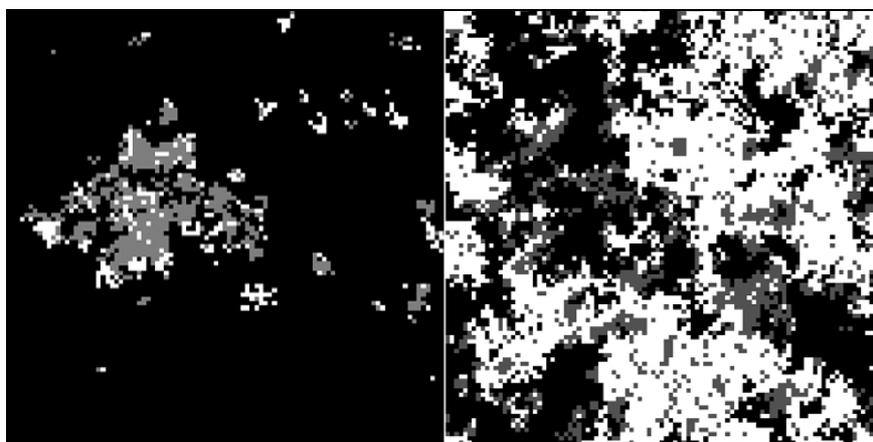


Figure 67 : Influence des allèles *maxi* et *mini* sur les comportements culturels. À gauche, structures émergentes au niveau culturel au sein des populations possédant l'allèle *maxi* (en gris les comportements défecteurs, en blanc les comportements coopérateurs). À droite, structures émergentes au 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 (Bourguine 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 & Bourguine 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.

Conclusions

L'homme est un animal principalement bâtisseur, condamné à marcher consciemment vers son but, à exercer l'art de l'ingénieur et à se frayer éternellement une voie qui va bien quelque part. [...] peut-être que le seul but vers lequel tend l'humanité, sur cette Terre, réside-t-il dans la permanence de cette poursuite, autrement dit dans la vie elle-même, et non dans le but proprement dit qui, bien sûr, ne peut-être que deux fois deux quatre, c'est-à-dire une formule, alors que deux fois deux quatre, ce n'est déjà plus la vie, messieurs, mais le commencement de la mort.

Notes d'un souterrain, Dostoïevski

L'auto-organisation du social par les phénomènes métamimétiques

L'approche de la modélisation des systèmes sociaux que nous avons adoptée dans cette thèse peut être résumée par la question suivante : Peut-on endogénéiser la distribution de métarègles de comportement dans le cadre d'une modélisation des systèmes sociaux, de manière à ce qu'elle soit le produit de la dynamique collective qu'elle définit ? Cette question ne se pose bien entendu que s'il y a hétérogénéité des métarègles dans la population.

Si dans certaines situations très contraintes, il est possible d'admettre que les conditions environnementales rendent cette hétérogénéité non significative, la viabilité de l'individu n'étant compatible qu'avec une seule métarègle, il en est d'autres où cette hétérogénéité est le principal facteur explicatif des données empiriques. C'est le cas en particulier des phénomènes de coopération pour lesquels il n'est pas possible, dans le cadre d'une approche du fait stylisé autour du dilemme du prisonnier et plus généralement des dilemmes sociaux, de négliger cette hétérogénéité des critères de décision.

Or, si la plupart des formalismes en sciences sociales sont à même de représenter une hétérogénéité des systèmes de règles utilisés par les individus, un problème majeur se pose quant à sa nature et à son origine. Celui-ci ne peut se poser qu'avec pour toile de fond la question de l'évolution culturelle. Nous avons vu dans les premiers chapitres que celle-ci ne peut pas coïncider avec l'évolution biologique pour des raisons bien simples d'échelles de temps : sur les quelques milliers d'années d'évolution culturelle galopante, le génome, n'a pas évolué. Il est donc nécessaire d'envisager les systèmes sociaux comme des systèmes autonomes par rapport aux phénomènes biologiques. Théâtres de l'émergence de ce que Hayek a qualifié d'ordre « spontané », ils ne peuvent évoluer que sous l'effet de forces internes. Mais c'est précisément là que le bât blesse, car les modalités de cette auto-organisation sont des plus difficiles à définir. Il serait même impossible, si l'on en croit la critique d'Ashby (1962*), de définir formellement une véritable auto-organisation au sens où il est toujours nécessaire de définir une ultime méta-règle d'organisation fixe qui serve de cadre à cette auto-organisation.

Parmi les principes organisateurs candidats, l'imitation a souvent été plébiscitée. Elle constitue cependant un terrain glissant. Définie de manière floue, elle permet d'analyser d'un point de vue conceptuel un certain nombre de phénomènes, mais elle est totalement non-opérationnelle dans une perspective de modélisation. D'un autre côté, une définition précise de l'imitation sous la forme d'une règle d'évolution oblige le modélisateur à définir un critère d'imitation, donnant à celle-ci le statut de règle fixe, qui nous renvoie à la position d'Ashby.

N'y a-t-il pas un juste milieu entre ces deux approches de l'imitation ? Doit-on nécessairement admettre qu'il n'y aurait qu'une seule façon d'imiter ? Nous ne pouvons certainement pas répondre en disant simplement qu'il peut y avoir plusieurs critères d'imitation, car ce serait revenir au problème précédent.

La direction de recherche que nous avons proposée est une manière de dissocier le principe d'imitation des éléments qui entrent dans la description des formes d'imitation. Ceci nous a été suggéré par l'analyse de travaux en psychologie et en éthologie, qui mettent en évidence l'importance de la réflexivité et de la méta-cognition dans la définition des processus cognitifs propres à l'espèce humaine. Dans l'étude des phénomènes mimétiques, ces deux qualités donnent aux règles d'imitation le statut de processus cognitifs modifiables, ce qui permet d'effectuer cette dissociation en posant que les composants qui définissent une règle d'imitation peuvent également être sujets à imitation. Dans ce cas de figure, *les règles d'imitation peuvent être leur propre métarègle*. Cette approche nous a permis de définir des systèmes particuliers, les *jeux métamimétiques*, qui formalisent cette dissociation. Nous avons pu ainsi proposer un amendement à l'argument d'Ashby : si ce qui sert de support à la formulation des règles d'organisation dans un système artificiel est nécessairement une donnée du modélisateur, il peut néanmoins y avoir auto-organisation au sens de *sélection spontanée d'une règle d'organisation* dans un ensemble de règles formulables. Pour reprendre les termes d'Ashby, si l'espace produit dans lequel le modélisateur envisage de plonger son système est nécessairement un choix arbitraire, contraint par les faits stylisés, la dynamique du système dans cet espace-produit peut être une propriété émergente.

Cette approche nous permet de redéfinir la relation de l'individu au collectif. En nous restreignant à une conception de l'imitation proche de ce que Tarde a pu désigner sous le terme d'*imitation logique*¹, nous sommes partis du principe que l'individu est susceptible de changer profondément sa manière d'être sous l'influence du social, mais toujours d'après ses propres critères, ces critères étant eux-mêmes établis par imitation. Nous avons ainsi dégagé un concept de stabilité propre aux phénomènes mimétiques : *un agent est contrefactuellement stable s'il ne peut pas s'imaginer être mieux qu'il n'est en se mettant contrefactuellement à la place d'un de ses voisins*. Un agent qui ne serait pas contrefactuellement stable, chercherait à imiter, selon le cas, les comportements, règles ou métarègles de l'agent qu'il estime être le

¹ « [...] les causes sociales sont de deux sortes : logiques ou non logiques. Cette distinction a la plus grande importance. Les causes logiques agissent quand l'innovation choisie par un homme l'est parce qu'elle est jugée par lui plus utile et plus vraie que les autres, c'est à dire plus d'accord que celles-ci avec les buts et les principes déjà établis en lui (par imitation toujours). », Tarde 1890.

meilleur. Du point de vue psychologique, ce concept de stabilité est inspiré à la fois de la théorie de la simulation – pour le raisonnement contrefactuel – et de la théorie de la théorie – pour l’imitation des métarègles.

D’un point de vue théorique, les jeux métamimétiques doivent être envisagés sous l’angle de la théorie des jeux stochastiques (Foster & Young 1990*). Leur particularité est la suivante : la chaîne de Markov, de matrice de transition P^0 , qui définit la dynamique sociale en l’absence de perturbations, ne dépend que de la classe de règles que les agents peuvent envisager (F) et de la topologie du réseau social qu’ils peuvent former (Γ), P^0 s’exprimant uniquement en fonction de F et de Γ (III.1.D.e). Ceci nous permet d’interpréter les dynamiques caractérisées par P^0 comme les métadynamiques de la cognition sociale, cette dernière étant définie comme le tout formé de l’ensemble des règles individuelles exprimées à un moment dans la population (Bourgine 2004). En présence de perturbations, cet ensemble de métadynamiques possibles s’agrège en *une unique métadynamique* qui sélectionne une certaine distribution sur les distributions possibles des comportements sociaux. Nous avons vu sur quelques exemples, que cette sélection par le bruit est le produit du couplage de la dynamique interne définie par P^0 avec la *structure* des perturbations ; et qu’elle aboutit, du moins dans les systèmes étudiés, à une sélection très fine des distributions de comportements sociaux possibles, indépendamment des conditions initiales, même dans le cas d’un fort niveau de bruit. Nous retrouvons ici la position de l’individualisme méthodologique complexe qui cherche à exprimer la co-détermination des comportements collectifs et des comportements individuels. Cette approche nous a permis de proposer les thèses suivantes, relatives à des populations d’agents mimétiques :

Thèse 1 : La sélection des distributions de comportements sociaux, en l’absence de perturbation, est entièrement déterminée par la classe de règles que les individus peuvent envisager et par le réseau social qu’ils forment.

Thèse 2 : En présence de perturbations aux différents niveaux des interactions sociales, la sélection de la distribution de comportements sociaux se concentre autour des états stochastiquement stables de la dynamique non perturbée. Cette distribution dépend de la structure des perturbations, de la classe de règles que les individus peuvent envisager, et du réseau social qu’ils forment.

Thèse 3 : Etant données des contraintes topologiques environnementales, et une structure de perturbations, la distribution des réseaux sociaux susceptibles de se former est entièrement déterminée par la classe de règles que les individus peuvent envisager

Dans le cadre particulier de l’émergence de la coopération, nous avons pu observer une structuration spatio-temporelle forte des populations d’agents métamimétiques avec un

fort niveau de coopération (le plus souvent entre 40% et 50%). Les structures émergentes sont hétérogènes et paramétrées par la structure du bruit. Nous avons donc des systèmes présentant une *distribution endogène des règles d'imitation* qui exhibe naturellement des phénomènes de coopération à grande échelle. Ceci nous permet de proposer la conjecture suivante :

Conjecture : La coopération humaine est le résultat d'un processus de différenciation culturelle, qui exprime, à travers les dynamiques métamimétiques, la structure interne de l'espace des règles que les individus peuvent envisager.

Mais revenons à notre contribution à la modélisation en sciences sociales. Sous l'influence de la théorie des jeux, la question qui revient le plus souvent sous la plume des modélisateurs est certainement : « *Quelle stratégie est la meilleure ?* ». Or, sauf à se placer dans un cadre normatif où il est admis qu'une norme exogène détermine les buts des agents, cette question en appelle inévitablement une autre : « *Quelle définition de meilleur est la meilleure ?* ». Cette dernière n'est cependant pas du ressort du modélisateur. En effet, posée au niveau individuel, toutes les observations de terrain indiquent qu'il n'existe pas de critère unique qui guiderait tous les comportements individuels. Posée au niveau collectif, elle devient une question éthique, philosophique ou politique, mais ne concerne en rien la façon de modéliser les comportements individuels. Faut-il pour autant abandonner l'espoir d'appréhender formellement les implications au niveau collectif, de notre capacité si particulière à nous forger une idée de ce qui est bon, et à choisir sciemment les actions les plus en accord avec cette conception ?

L'approche que nous avons présentée ici se veut en rupture avec les approches formelles traditionnelles fondées sur l'optimisation d'un critère global. En envisageant les systèmes sociaux sous l'angle de la différenciation par co-évolution, nous avons posé la question de l'auto-organisation d'une multiplicité de « définitions de meilleur », qui dès lors, ne peuvent se concevoir que de manière contextuelle et d'un point de vue individuel. Certes l'imitation, telle que nous l'avons présentée, ne participe que pour partie à la détermination des comportements sociaux, et une théorie des systèmes sociaux se doit d'intégrer un ensemble bien plus vaste de phénomènes (éducation, apprentissage, mémoire, processus automatiques, renforcement, etc.). Mais quand bien même l'idée de stabilité contrefactuelle devrait être élargie et complétée, si l'approche présentée ici est pertinente, la question qui incombe au modélisateur n'est plus « *Quelle stratégie est la meilleure ?* », mais « *Quelles sont les configurations sociales qui sont stochastiquement contrefactuellement stables ?* », ces configurations n'étant pas nécessairement « désirables ».

Limites de cette approche

Les espaces dans lesquels se situent les systèmes métamimétiques sont extrêmement complexes et nous devons nous attendre à ce qu'une première approche laisse derrière elle de nombreuses zones d'ombre. Les limites de cette première approche sont multiples, mentionnons en quelques-unes parmi les plus importantes.

La principale question qui se pose dans le cadre des jeux stochastiques est celle de la topologie des attracteurs de P^0 , de la forme des distributions limites des processus perturbés et de la vitesse de convergence vers les distributions limites. Les théorèmes dont nous disposons actuellement et qui sont directement applicables aux jeux métamimétiques sont trop généraux, et l'approche computationnelle ne peut donner lieu qu'à des conjectures. Rien ne nous garantit pour le moment que les distributions que nous avons observées au cours des études computationnelles sont effectivement les distributions limites du processus perturbé. Seule une étude fine de la topologie des attracteurs du processus non perturbé pourra nous le dire. Etant donné qu'il existe des algorithmes pour calculer les ensembles stochastiquement stables, nous pouvons espérer nous en inspirer pour trouver des propriétés qualitatives des distributions limites des variables agrégées et, entre autres, une estimation des vitesses moyennes de convergence et du nombre de modes des distributions limite. Ceci nécessitant un développement des théorèmes existants, il y a de ce côté d'importantes recherches mathématiques en perspective.

Nous pouvons cependant faire une conjecture qui, de notre point de vue, constitue l'un des apports potentiellement importants de l'approche métamimétique. Nous avons vu qu'il était possible de définir pour toute règle sa règle symétrique, en multipliant sa fonction de valuation par -1 . Dans le cadre d'une modélisation, il nous semble nécessaire d'envisager que tout espace de règles doive être symétrique en ce sens. C'est la propriété minimale que nous puissions exiger d'un ensemble de règles. Comment imaginer des agents qui pourraient formuler une idée mais pas l'idée contraire ? Peut-on imaginer le concept de richesse sans la pauvreté, le conformisme sans l'anticonformisme ? Notre conjecture est la suivante :

Conjecture: Dans un jeu métamimétique, si l'espace des règles est symétrique, les distributions limites des comportements sociaux sont toujours hétérogènes.

* *

Le second type de limites que nous pouvons mentionner relativement à ces premières applications concerne la complexité cognitive des agents que nous avons considérés. Ainsi, la pertinence du processus d'inférence que nous avons envisagé (un agent insatisfait attribue cette insatisfaction avec une certaine probabilité à sa méta-règle et une certaine probabilité à son comportement) est tout à fait discutable, celui-ci n'étant certainement pas le plus réaliste. De même, le manque de mémoire des agents peut être gênant et nous avons essayé de proposer des développements dans cette direction au *III.2.C.c.ii*. Enfin, les agents que nous avons considérés n'ont aucune capacité d'apprentissage et ne sont pas éductifs. Ces simplifications étaient nécessaires pour la clarté de l'exposé mais ces composantes ne peuvent pas être négligées dans le cas général. Il nous faudra vérifier que les résultats présentés ici ne dépendent pas qualitativement des diverses sophistications que nous pourrions apporter aux agents.

Par ailleurs, nous n'avons considéré ici qu'un espace de règles très restreint, alors que l'espace des règles et des représentations que peuvent formuler les êtres humains est immense. Comme pour le cas de la théorie des jeux évolutionnistes, nous pouvons percevoir à ce niveau les potentialités d'une fuite en avant vers des espaces des règles de plus en plus complexes. Ceci ne manquera pas d'arriver si ce formalisme se développe, et nous pouvons nous attendre à des résultats assez intéressants en terme de correspondance entre la structure de l'espace des règles et les structures émergentes au niveau collectif.

La démarche sera cependant différente. Dans le cadre des jeux évolutionnistes classiques, la démarche consiste à identifier un ensemble de stratégies compatibles avec les capacités cognitives humaines, puis à choisir une fonction d'évolution qui expliquerait qualitativement les distributions observées. Des fonctions d'évolution différentes correspondront à des modèles différents, et seront choisies en fonction de leur pouvoir explicatif. Dans la démarche métamimétique, l'acte de modélisation s'arrête lorsque l'on a la description des règles. La pertinence relative de deux modèles ne peut être évaluée que sur le plus ou moins grand réalisme de l'espace des règles qu'ils envisagent. L'inadéquation des reconstructions avec les faits stylisés sera alors plus à même de réfuter le formalisme lui-même. Il est donc plus facilement réfutable au sens de Popper.

Les agents métamimétiques et leurs institutions

En gardant ces limites à l'esprit, nous pouvons profiter de ces dernières lignes pour évoquer une question qui se trouve en filigrane dans notre première partie, mais que nous n'avons pas pu traiter ici : l'origine de la diversité des cultures ou des variations inter-groupes. Cette question est plus commune que celle de l'hétérogénéité inter-individuelle, peut-être parce qu'elle concerne des entités qui évoluent sur des échelles de temps beaucoup plus longues, qui sont donc plus facilement observables. Ce sont les institutions et les formes d'organisation sociale propres à chaque culture. Nous reprendrons pour la discussion une définition de forme institutionnelle empruntée à Lesourne (2002) : *une forme institutionnelle est une entité qui intervient dans la coordination des comportements des agents.*

Nous ne voudrions pas que l'approche des dynamiques métamimétiques en termes de chaînes de Markov laisse penser que celles-ci décrivent un mode d'évolution unique qui irait nécessairement vers une distribution stationnaire, certes hétérogène, mais unique. Ce serait oublier les commentaires que nous avons faits concernant le bruit et la nouveauté. Les sociétés humaines ne connaissent probablement que des états transitoires, qui se soldent invariablement par un changement de l'espace des phases. Tout réside, en effet, dans l'espace des règles qui définissent la dynamique interne du système. Or l'espace des règles n'est absolument pas un objet figé, il n'a de cesse d'évoluer au cours de l'histoire d'une société à la suite d'innovations, ce qui a pour conséquences que la dynamique métamimétique connaît régulièrement des changements d'espace des phases (voir le *III.1.D.e*). Ces innovations peuvent être le fruit d'individus isolés dont le comportement diffuserait de proche en proche par imitation et se stabiliserait dans la population. Par exemple, dans le cas des taches solaires en économie, la croyance d'un individu peut être adoptée par une sous-population. Ceci introduit alors de nouvelles stratégies au niveau comportemental dans la population entière, à savoir, tenir compte ou non des taches solaires dans les anticipations économiques. De la même manière, l'émergence d'une religion peut être vue comme la proposition d'un ensemble de règles par un petit groupe d'individus, adopté par la suite par un groupe plus large. Après s'être propagés, ces nouveaux traits sont perçus par un grand nombre d'agents mimétiques, et deviennent des entités susceptibles de s'auto-renforcer et d'acquérir une très grande stabilité. Ces entités interviennent alors de fait, dans la coordination des comportements des agents, et peuvent être vues comme des institutions.

Mais ces entités peuvent elles-mêmes dans certains cas, s'institutionnaliser « en dur », en se dotant de représentants. Il y a alors création d'un nouvel agent, qui a souvent la particularité d'avoir un voisinage bien plus large que la moyenne des individus. Ses actions et les règles qu'il diffuse ont alors plus d'impact. Lorsque par exemple, le président de la République s'exprime au nom de la France contre la Guerre en Irak, cette position a plus de poids dans l'orientation des consciences individuelles que celle de l'individu moyen. De même, lorsque l'Insee publie des sondages concernant les intentions de vote, elle crée de nouvelles manières de voter.

Précisons qu'il ne s'agit pas ici de directions de pensée imposées aux consciences individuelles, mais d'axes de pensée. Une institution n'a pas le pouvoir d'obliger les individus à penser d'une certaine manière. Cependant, en prenant position suivant un axe bien déterminé, elle les incite à penser de manière privilégiée le long de cet axe. Lorsque l'influence de l'institution est très forte, cela peut amener une population à ne privilégier, dans l'espace des règles, que la position de l'institution et la position symétrique, menant ainsi à une bipolarisation de la population. Ceci peut avoir des conséquences malheureuses si les positions en question sont conflictuelles.

Vues sous cet angle, les formes institutionnelles sont l'une des principales sources de changement d'espace des phases. En créant de nouvelles manières de se coordonner, elles spécifient de plus en plus le groupe qui les a adoptées par rapport à d'autres groupes sociaux qui ont pris un autre chemin. Ce n'est qu'une relecture d'un phénomène bien connu, mais c'est la manière la plus naturelle d'expliquer une partie des différences inter-groupes.

Enfin, il faut mentionner une dernière source de différences inter-groupes, celle-ci ne faisant pas nécessairement appel à un changement dans l'espace des règles. Nous avons vu l'importance de la structure des perturbations dans la détermination des processus de différenciation. Une étude formelle plus poussée nous permettra peut-être d'en saisir mieux les enjeux. Celle-ci peut être influencée de deux manières : exogène ou endogène. Si les sociétés peuvent difficilement jouer sur les influences exogènes (facteurs climatiques, contraintes physiques, etc...), elles peuvent faire varier les facteurs endogènes à plusieurs niveaux. Cela a, la plupart du temps, un certain coût qui contraint à des choix politiques. En ce qui concerne la nouveauté, la société peut favoriser son émergence en favorisant certaines activités exploratrices. L'importance qu'une société accorde à sa recherche, son éducation et à ses arts détermine sa propension à effectuer de tels changements d'espace des phases. En ce qui concerne le bruit, une société peut chercher à réduire ou augmenter l'incertitude dans tel

ou tel domaine d'activité économique ou sociale, ce qui changera effectivement la proportion des individus qui s'adonnent à telle ou telle activité, mais également, il faut le reconnaître, l'ensemble des valeurs représentées au sein de la société. Si on augmente le prix du tabac, il y aura sans doute moins de fumeurs, mais les non-fumeurs, moins exposés aux nuisances du tabac, risquent également d'être moins tolérants à l'égard des non-fumeurs, comme c'est par exemple le cas aux Etats-Unis. Les années de régime communiste dans les ex-pays de l'Est n'ont pas seulement changé les infrastructures, elles ont aussi changé les manières de penser et de percevoir le monde. Nous pouvons en dire autant des années de capitalisme galopant en Occident. Les formes institutionnelles, engendrées par les processus de cognition sociale, ont donc le pouvoir de les influencer en retour, modifiant ainsi leurs conditions d'existence. La forme des perturbations est donc destinée à co-évoluer avec l'espace des règles. Ceci soulève une question essentielle :

Existe-t-il des distributions limites de comportements sociaux, déterminées par des perturbations que leurs formes institutionnelles favorisent ?

De ces distributions limite, il serait bien difficile de s'écarter, quand bien même la viabilité de la société serait menacée.

Annexes

Annexe informatique : algorithmes utilisés pour les simulations

III.2.B. La dynamique interne des jeux métamimétiques

Un agent est entièrement décrit par sa stratégie, *i.e.* par la donnée de sa règle (*maxi*, *mini*, *conformiste*, *anticonformiste*, *aléatoire*) et de son comportement (*C* ou *D*).

Les agents sont disposés sur une grille torique de taille $N \times N$ et interagissent avec les agents des huit cellules adjacentes.

Exemple d'initialisation : distribution uniforme sur les règles, taux initial de coopération : *IniCoop*

- Pour chaque agent, on attribue au hasard l'une des cinq règles possibles.
- Pour chaque agent, on attribue un comportement coopérateur avec une probabilité *IniCoop*.

Le jeu est ensuite constitué de T cycles d'interaction. Un cycle d'interaction est constitué de trois phases :

- 1 **Calcul des gains** : Pour chaque agent, calcul des nouveaux gains en fonction des actions choisies à la période précédente par sommation des gains obtenus lors des huit dilemmes du prisonnier joués avec les huit voisins.
- 2 **Mise à jour des règles** (*idem p.195 et cf. encart 11*) : On tire pour chaque agent une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre α . Lorsque le résultat de ce tirage est égal à 1, la règle est mise à jour de manière réflexive en fonction des nouveaux gains et des stratégies observées à la période précédente. Lorsque le résultat du tirage est 0, l'agent garde la règle de la période précédente.
- 3 **Mise à jour des actions** (*idem p.195 et cf. encart 11*) : On tire pour chaque agent une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre θ . Pour chaque agent dont la règle a été mise à jour ou pour lequel le résultat de ce tirage est 1, le comportement est mis à jour à l'aide de sa (nouvelle) règle, en fonction des nouveaux gains et des stratégies observées à la période précédente. Dans les autres cas, l'agent garde le comportement de la période précédente.

Les règles sont définies de la manière suivante (comme à la page 196) :

Maxi : Imitation indexée sur les gains.

- *Phase 2* - Mise à jour de la règle : Si l'agent ne fait pas partie de l'ensemble des voisins dont les gains sont les plus élevés, la règle de l'agent est remplacée par la règle du voisin qui a le gain le plus élevé. En cas d'égalité, on choisit au hasard un des meilleurs voisins, sa règle servira de nouvelle règle à l'agent.
- *Phase 3* – Mise à jour du comportement : Si l'agent ne fait pas partie de l'ensemble des voisins dont les gains sont les plus élevés, le comportement de l'agent est remplacé par le comportement du voisin qui a le gain le plus élevé.

En cas d'égalité, on choisit au hasard un des meilleurs voisins dont le comportement sera le nouveau comportement de l'agent.

Mini : Règle d'imitation symétrique de *maxi*, la fonction de valuation étant multipliée par -1 (imitation des agents dont les gains sont les moins élevés).

Conformiste : Imitation indexée sur les densités.

- *Phase 2* - Mise à jour de la règle : Si à la période précédente, l'agent ne faisait pas partie de l'ensemble des voisins dont la règle avait la plus forte densité dans le voisinage de l'agent, la règle de l'agent est remplacée par la règle qui à la période précédente avait la plus forte densité. En cas d'égalité, on choisit au hasard un des meilleurs voisins, sa règle servira de nouvelle règle à l'agent.
- *Phase 3* - Mise à jour du comportement : Si à la période précédente, l'agent ne faisait pas partie de l'ensemble des voisins dont le comportement avait la plus forte densité dans le voisinage de l'agent, le comportement de l'agent est remplacé par le comportement qui à la période précédente avait la plus forte densité. En cas d'égalité, on choisit au hasard un des meilleurs voisins, son comportement sera le nouveau comportement de l'agent.

Anticonformiste : Règle d'imitation symétrique de *conformiste*, la fonction de valuation étant multipliée par -1 (on copie les traits de plus faible densité).

Aléatoire :

- *Phase 2* - Mise à jour de la règle : on choisit au hasard un des voisins de l'agent (agent compris) et la règle de l'agent est remplacée par la règle de ce voisin.
- *Phase 3* – Mise à jour du comportement : on choisit au hasard un des voisins de l'agent (agent compris), et le comportement de l'agent est remplacé par le comportement de ce voisin.

III.2.C La sélection par le bruit

Lorsqu'il y a un niveau de bruit ε_r sur les règles et ε_a sur les actions, l'algorithme est le même qu'au *III.2.B*, mis à part que :

- Avant d'effectuer la *phase 2* on tire pour chaque agent une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre ε_r . Si le résultat de ce tirage est 1 , on attribue à l'agent une règle choisie au hasard parmi l'ensemble des règles possibles et on s'arrête là pour la phase 2. Si le résultat de ce tirage est 0 , on effectue la phase 2 telle que décrite au *III.2.B*.
- Avant d'effectuer la *phase 3* on tire pour chaque agent une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre ε_a . Si le résultat de ce tirage est 1 , on attribue à l'agent un comportement choisi au hasard parmi l'ensemble des comportements possibles et on s'arrête là pour la phase 3. Si le résultat de ce tirage est 0 , on effectue la phase 3 telle que décrite au *III.2.B*.

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

Avec un niveau de bruit ε_r sur les règles et ε_a sur les actions, lorsque les constantes de mise à jour α et θ sont endogènes et que les agents peuvent copier les constantes de temps avec un niveau de bruit ε , l'algorithme est le même qu'au III.2.C mis à part que :

- Les paramètres α et θ sont propres à chaque agent et sont attachés à la règle qu'ils utilisent.
- Lorsqu'un agent copie la règle d'un voisin, il copie également les valeurs α et θ qu'utilise son modèle en commettant des erreurs relatives⁷⁶ calculées de la manière suivante :
 - On tire une variable aléatoire η suivant une loi normale de moyenne 0 et de variance ε . La nouvelle valeur α' de l'agent, obtenue à partir de la valeur α du modèle, est donnée par :

$$1/\alpha' = (1 + \eta)/\alpha \text{ si } (1 + \eta)/\alpha \geq 1 ;$$

$$= 1/\alpha \text{ si } (1 + \eta)/\alpha < 1 \text{ (pour satisfaire la condition } \alpha \leq 1)$$
 - On fait la même chose pour θ , les tirages étant indépendants.

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

Lorsque la population d'agent se renouvelle, les agents naissent et meurent. Un agent est entièrement décrit par la stratégie qu'il avait à sa naissance, que nous appellerons son génotype, et sa stratégie courante, *i.e.* par la donnée d'un *n-uplet* du type $(D, \text{maxi}, C, \text{conformiste})$

Les agents sont disposés sur une grille torique de taille $N \times N$ et interagissent avec les agents des huit cellules adjacentes.

On fixe un taux de mortalité ρ et un taux de mutation μ .

Initialisation (exemple pour des conditions aléatoires) : distribution uniforme sur les règles, taux initial de coopération : *IniCoop*

- Pour chaque agent, on attribue au hasard l'une des cinq règles possibles. Cette règle constitue la part procédurale du génotype de l'agent, et est utilisée pour définir sa règle courante à la période l .
- Pour chaque agent, on attribue un comportement coopérateur avec une probabilité *IniCoop*. Ce comportement constitue la part comportementale du génotype, et est utilisé pour définir le comportement courant à la période l .

Le jeu est ensuite constitué de T cycles d'interactions. Un cycle d'interactions est constitué de quatre phases :

- 1 **Calcul des gains** : Pour chaque agent, calcul des nouveaux gains en fonction des actions choisies à la période précédente par sommation des gains obtenus lors des huit dilemmes du prisonnier joués avec les huit voisins.
- 2 **Mise à jour des règles** (*idem p.195 et cf. encart II*) : On tire pour chaque agent une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre α . Lorsque le résultat de ce tirage est égal

⁷⁶ Les expériences en psychophysique montrent en effet que les erreurs de perception des variables quantitatives sont relatives à l'intensité du signal plutôt que absolues.

à 1 , la règle est mise à jour de manière réflexive en fonction des nouveaux gains et des stratégies observées à la période précédente. Lorsque le résultat du tirage est 0 , l'agent garde la règle de la période précédente.

- 3 Mise à jour des actions** (*idem p.195 et cf. encart 11*) : On tire pour chaque agent une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre θ . Pour chaque agent dont la règle a été mise à jour ou pour lequel le résultat de ce tirage est 1 , le comportement est mis à jour à l'aide de sa (nouvelle) règle, en fonction des nouveaux gains et des stratégies observées à la période précédente. Dans les autres cas, l'agent garde le comportement de la période précédente.
- 4 Renouvellement de la population** : On tire pour chaque agent une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre ρ . Si le résultat du tirage est égal à zéro, on passe au cycle suivant. S'il est égal à un, l'agent meurt. Il est remplacé par un nouvel agent. Son génotype est hérité de l'un des neuf voisins (agent compris) pris aléatoirement, la probabilité pour un voisin d'être choisi étant proportionnelle à ses gains cumulés sur toute sa vie. Le nouveau génotype est également utilisé pour définir la règle et le comportement de l'agent à la prochaine période (initialisation de l'agent). Enfin, pour chaque agent nouvellement introduit, pour chaque élément du génotype (règle et action), on tire de manière indépendante une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre μ . Si le résultat de ce tirage est 0 , on passe au cycle suivant. S'il est égal à un, l'agent mute et l'élément concerné est remplacé par un élément choisi au hasard parmi l'ensemble des éléments possibles.

Annexe III.1.D.c : La dynamique des réplicateurs

Proposition : *La dynamique des réplicateurs discrète correspond au cas particulier d'un jeu métamimétique avec une seule métarègle sur un graphe complet.*

Cette proposition, dont la démonstration n'est qu'un jeu de réécriture, va nous permettre de voir exactement en quoi les dynamiques des jeux métamimétiques diffèrent des dynamiques de réplicateurs connues.

Preuve :

La forme standard de l'équation des réplicateurs pour une population de stratégies $(1, \dots, n)$ en proportions $\sigma(t) = (p_1^t, \dots, p_n^t)$ est :

$$p_i^{t+1} = \frac{a + f_i(\sigma_t)}{a + \hat{f}(t)} p_i^t$$

avec $\hat{f}(t) = \sum_{i=1}^n p_i^t f_i(\sigma_t)$.

Elle se réécrit :

$$\Delta p_i^t = \left(\frac{a + f_i(\sigma_t)}{a + \hat{f}(t)} - 1 \right) p_i^t$$

La forme la plus appropriée en vue d'une comparaison est l'équation pilote de systèmes métamimétiques :

$$\Delta p_c^t = -p_c^t \cdot F_c + \sum_{c' \neq c} p_{c'}^t \cdot F_{c'}(c)$$

Considérons un jeu métamimétique sur un graphe complet avec une seule métarègle r et un ensemble de comportements correspondant aux stratégies $(1, \dots, n)$ définies précédemment. Les chaînes métamimétiques peuvent alors être désignées par le nom du comportement associé. Tous les agents ont pour voisinage la population entière. Prenons pour r une règle d'imitation aléatoire qui définit pour un agent i l'imitation

aléatoire d'un un voisin j avec la probabilité proportionnelle à $\frac{a + f_j(\sigma_t)}{a + \hat{f}(t)}$. Nous

avons $\forall i, j: F_i^t(j) = \frac{a + f_j(p_j^t)}{a + f(t)} p_j^t$. En remplaçant cette relation dans l'équation pilote

nous obtenons l'équation des réplicateurs dans sa version discrète (pour des raisons de lisibilité, les stratégies sont désignées par leurs indices):

$$\Delta p_i^t = -p_i^t \sum_{j \neq i} \frac{a + f_j(p_j^t)}{a + f(t)} p_j^t + \sum_{j \neq i} p_j^t \frac{a + f_i(p_i^t)}{a + f(t)} p_i^t$$

$$\Delta p_i^t = -p_i^t \frac{1}{a + f(t)} \sum_j p_j^t (a + f_j(p_j^t)) + \frac{a + f_i(p_i^t)}{a + f(t)} p_i^t \sum_j p_j^t$$

$$\text{soit } \Delta p_i^t = \left(\frac{a + f_i(p_i^t)}{a + f(t)} - 1 \right) p_i^t.$$

La dynamique des réplicateurs en temps discret traduite en terme de dynamique métamimétique correspond donc au cas très particulier d'un jeu métamimétique à une seule métarègle, celle-ci pouvant se formuler sous la forme « imite stochastiquement proportionnellement à la fitness ». ■

Annexe III.2.B.a.ii) : Choisir l'opulence, faire vœu de pauvreté

Influence du taux initial de coopération

Nous étudions dans cette annexe les propriétés du sous-ensemble symétrique de règles $\{maxi, mini\}$. L'approche est essentiellement qualitative.

La question que nous nous posons ici est celle de l'influence du taux de coopération initial sur l'attracteur métamimétique sélectionné. Une étude computationnelle révèle un résultat contre-intuitif (Figure 68) : la proportion d'agents utilisant la règle *mini* après réorganisation est d'autant plus forte que le taux de coopération initial est faible. Ainsi, c'est précisément lorsque les agents ont déjà le comportement le plus approprié à leurs buts qu'ils sont les plus vulnérables lors d'un processus de réorganisation. Par ailleurs, et c'est une conséquence de la première constatation, le taux de coopération a tendance à décroître lorsque le taux initial de coopération croît.

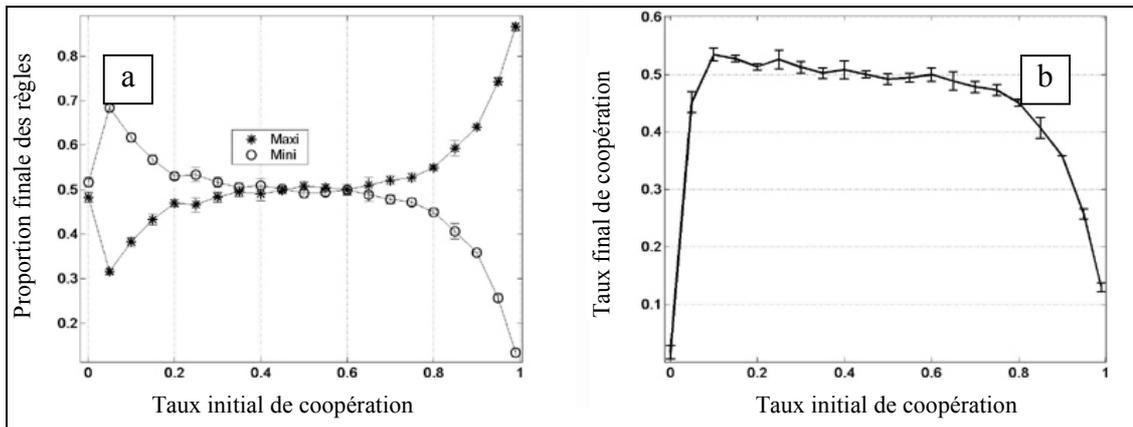


Figure 68: Statistiques sur les attracteurs métamimétiques d'un dilemme du prisonnier métamimétique entre les règles *maxi* et *mini* en fonction du taux initial de coopération (distribution aléatoire), la distribution initiale sur les règles étant aléatoire uniforme. Le taux initial de coopération varie entre 0.001 et 0.99, chaque point est obtenu comme une moyenne de 10 simulations indépendantes (3600 agents). Les barres d'erreur indiquent l'écart type. On remarquera que sur la figure a la proportion d'agents *mini* après réorganisation diminue globalement lorsque le taux initial de coopération augmente, ceci expliquant que sur la figure b, le taux final de coopération a tendance à décroître lorsque le taux initial de coopération augmente, les comportements défecteurs étant favorisés par la présence d'agent *maxi*. Ici, $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$.

Pour comprendre ce phénomène, il faut regarder l'évolution dans le temps des comportements. Commençons par considérer le cas où le taux initial de coopération est proche de 1 et regardons ce qui se passe au voisinage d'un agent *A mini* défecteur. Celui-ci se retrouve entouré d'agents coopérateurs *maxi* ou *mini*, et se trouve donc être l'agent dont les gains sont les plus élevés. Ceci va avoir pour conséquences, d'une part, que *A* va être insatisfait et va redevenir coopérateur, d'autre part, que ses voisins *maxi* vont être insatisfaits et vont l'imiter. Comme *A* est un agent *mini*, ses voisins *maxi* vont imiter sa règle en devenant

également *mini* mais ne vont pas changer leur comportement (*C*) puisqu'il fournit effectivement un gain minimal. Ce phénomène a pour effet de rehausser localement la densité des agents *mini*.

En revanche si *A* est *D-maxi*, ses voisins *maxi* vont l'imiter en devenant également défecteurs. Il va alors y avoir diffusion du comportement défecteur autour de *A* (voir annexes web pour l'animation). Pour comprendre en quoi cela peut influencer la proportion d'agents *mini*, il faut étudier la progression du front d'onde, que nous avons schématisée sur la Figure 69. Imaginons donc la propagation dans un réseau d'une onde plane se propageant de gauche à droite. L'espace à gauche du front d'onde comporte des agents *mini* coopérateurs et *maxi* défecteurs. L'espace à droite du front d'onde comporte des agents *mini* et *maxi* tous coopérateurs (taux initial de coopération proche de *I*).

Les agents situés à droite du front d'onde (zone 4) qui ne sont pas dans le voisinage du front d'onde ont tous leurs voisins coopérateurs. Ils gagnent donc 24 ($T=5, R=3, P=1, S=0$). Les agents qui sont dans le voisinage du front d'onde à droite (zone 3) ont un certain nombre de leurs voisins de la zone 2 qui sont *D-maxi* et trois voisins coopérateurs de zone 4. Leurs gains varient donc entre 15 et 24. Ceci va avoir pour effet de rendre insatisfaits ceux de leurs voisins *mini* qui se trouvent en zone 4 (et donc à une distance 2 du front d'onde) et qui vont imiter des agents de la zone 3. Dans ce processus, certains agents *C-mini* vont devenir *C-maxi*, ce qui va appauvrir la zone 4 en agents *mini*. C'est la raison pour laquelle nous observons une proportion moindre d'agents *mini* dans l'état final. Mais il faut encore montrer que le front d'onde avance.

Les agents *D-maxi* situés dans le voisinage du front d'onde à gauche (zone 2) vont se trouver avoir trois voisins coopérateurs appartenant la zone 3, plus *n* voisins *C-mini* leur apportant un gain de 5, le reste étant constitué de *D-maxi*. Leur gain sera donc $15+5n+(5-n)$, il variera donc entre 20 et 40. Si les agents de la zone 3 ont pratiquement toujours un gain inférieur à ceux de la zone 4, ceux de la zone 2 auront un gain supérieur ou égal à ceux de la zone 4, pour peu qu'ils aient au moins un voisin coopérateur (donc *mini*) dans les zones 1 ou 2. Les agents *C-maxi* de la zone 3 imiteront avec une forte probabilité les agents *D-maxi* de la zone 2, ce qui fera progresser les comportements défecteurs dans le sens du front d'onde (cf. annexes web pour l'animation).

Si donc dans un premier temps, l'apparition de défecteurs dans des régions de coopérateurs rehausse la densité de *mini*, une fois une onde de défection constituée dans une région de coopérateurs *mini* et *maxi*, celle-ci fait baisser la densité d'agents *mini*. Ces ondes ont la possibilité d'avoir une grande portée lorsque le taux initial de coopération est élevé et

qu'il existe effectivement des populations de *maxi* coopérateurs. Lorsque le taux initial de coopération diminue, les agents *maxi* ont tendance à devenir défecteurs avant la mise en place des ondes, ce qui fait disparaître les régions mixtes de coopérateurs *mini/maxi* avant que les ondes n'aient pu se propager. Enfin mentionnons que ce phénomène de diffusion est favorisé par la mise à jour parallèle synchrone, mais persiste si cette mise à jour est asynchrone (cf. annexes web).

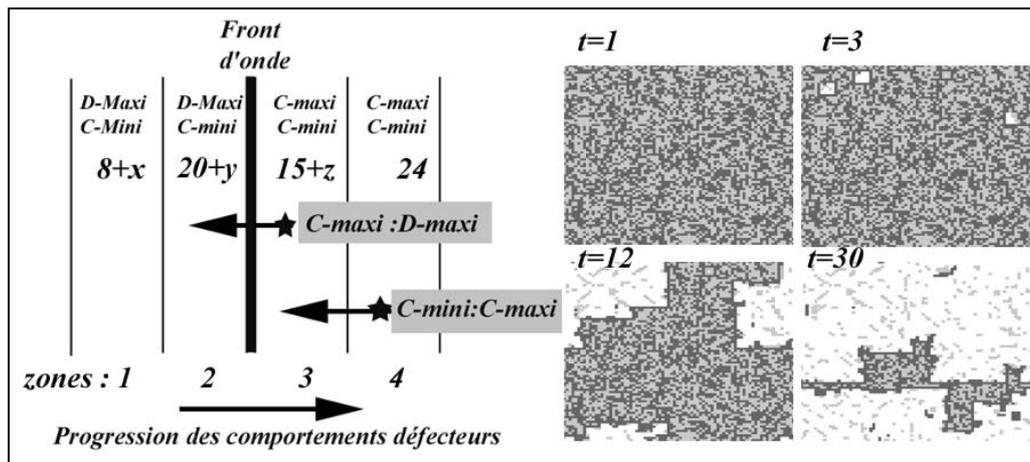


Figure 69 : Modélisation du front onde de la propagation de comportements défecteurs dans une population de *maxi/mini* coopérateurs (taux initial de coopération 0.1%). Les agents de la zone 3 ont des gains inférieurs aux agents *maxi* de la zone 2 et aux agents *mini* et *maxi* de zone 4. Ceci a pour conséquences que les agents *C-mini* vont imiter des agents *maxi* de la zone 3 (*C-mini:C-maxi*), et des agents *maxi* de la zone 3 vont imiter le comportement défecteur d'agents *maxi* de la zone 2 (*C-maxi:D-maxi*). Les extraits de simulations ci-contre montrent la progression de comportements *D-maxi* (en blanc) dans une population de *C-maxi* (en gris foncé) et *C-mini* (gris clair). Ce type de diffusion n'est pas altéré par une mise à jour asynchrone (cf. animation en annexes web).

La situation symétrique où le taux de coopération initial est très bas s'explique de la même manière. Cependant, dans ce cas-là le front d'onde est plus fragile et se brise avant que le comportement coopérateur ne diffuse dans toute population (voir l'animation en annexe web). La raison en est que, comme on peut le voir sur la Figure 70, le front d'onde ne peut se propager que si les agents *D-mini* de la zone 3 imitent les agents *C-mini* de la zone 2. Or un agent *D-mini* de la zone 2 ne deviendra coopérateur que si un de ses voisins *C-mini* de la zone 3 gagne moins que ses voisins de la zone 4 (dont le gain est 8). Un agent de la zone 2 entouré de n coopérateurs gagne $3.n$, n variant entre 0 et 5. Son gain est donc inférieur à 15 et sera inférieur à 8 si et seulement si, il a au plus deux voisins coopérateurs. Du fait de la conversion d'agents *maxi* en *mini* dans la zone 4, les agents *mini* sont prédominants dans les zones 1, 2 et 3. Il y a donc une probabilité assez faible pour qu'un agent de la zone 2 ait strictement moins de 3 coopérateurs dans son entourage, et l'onde s'évapore assez rapidement. Ceci explique

l'asymétrie observée sur la Figure 68 entre un taux initial de coopération faible et un taux initial de coopération fort.

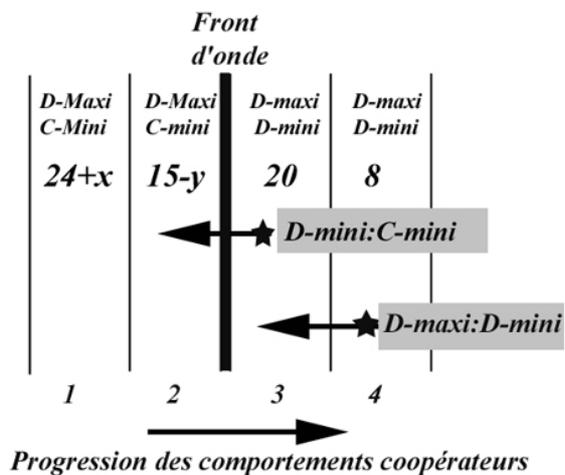


Figure 70 : Modélisation du front d'onde de la propagation de comportements coopérateurs dans une population de *maxi/mini* défecteurs.

Annexe III.2.B.a.iii) : Devenir maximisateur par conformisme

Nous étudions dans cette annexe le comportement d'un jeu métamimétique où les agents ont le choix entre être *maxi* ou *conformistes*. L'approche est essentiellement qualitative.

De la même manière qu'en *ii)*, nous pouvons étudier l'influence du taux initial de coopération sur l'état final. La Figure 71 montre le résultat d'une étude computationnelle dans le cas où la distribution des règles dans la population initiale est aléatoire uniforme. La première chose à constater est que la variance sur les proportions des différents types de règles et de comportements dans l'état final est très faible. Cela signifie qu'étant donné les caractéristiques de la distribution aléatoire de départ, les attracteurs métamimétiques atteints à partir de cette classe de conditions initiales ont des propriétés statistiques similaires.

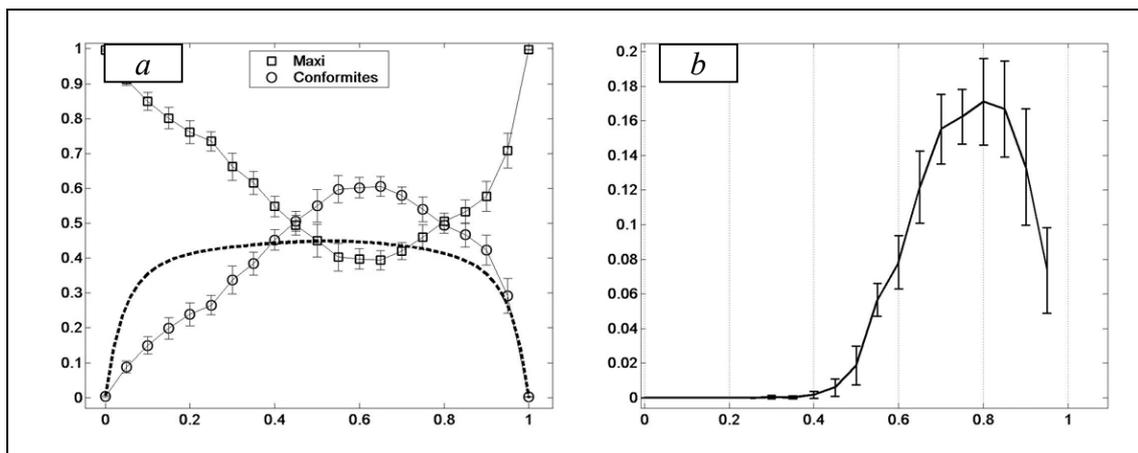


Figure 71: Evolution de l'état final d'un jeu métamimétique entre agents *maxi* et agents conformistes en fonction du taux initial de coopération (celui-ci varie entre 0 et 1). *a* : Evolution des proportions finales des règles en fonction du taux initial de coopération. Sur le même graphe en pointillé courbe donnant la l'insatisfaction moyenne d'un agent *maxi* dans l'état initial en fonction du taux initial de coopération. On peut remarquer la corrélation du succès des comportements conformistes avec cette courbe. *b* : évolution du taux final de coopération pour un taux initial de coopération variant entre 0 et 0.95. Chaque point est une moyenne sur 10 populations de 6400 agents chacune. Les barres d'erreur indiquent la déviation standard.

Pour comprendre la dépendance des caractéristiques des attracteurs en fonctions de l'état initial, commençons par remarquer que lorsque la population initiale est composée entièrement de coopérateurs ou entièrement de défecteurs, la proportion finale de conformistes est pratiquement nulle. En effet, dans ce cas, tous les gains sont identiques, ce qui fait que des agents qui sont initialement *maxi* le restent. En revanche, les conformistes qui dans l'état initial ne sont pas en général dans une situation stable vont changer de règle. Seuls

les agents conformistes qui dès l'état initial sont dans une configuration stable seront présents dans l'état final. Nous avons déjà mentionné le fait que la configuration stable de taille minimale d'un groupe de conformistes est une croix constituée de 12 cellules. Nous pouvons estimer l'ordre de grandeur de la probabilité pour qu'un conformiste appartienne initialement à une telle structure. Chaque cellule peut appartenir à 12 croix différentes, une croix ayant une probabilité de formation de $0,5^{12}$ dans l'état initial. En négligeant les corrélations entre les probabilités de formation des 12 croix, la probabilité pour un agent conformiste d'appartenir à une structure stable sera donc de l'ordre de $(1-(1-0,5^{12})^{12})=2,9.10^{-3}$. Ceci est assez proche de la proportion finale de conformistes pour des populations à comportements homogènes, dont la moyenne sur 20 simulations est de $2,95.10^{-3}$.

Il faut ensuite expliquer la forme en cloche de la courbe représentant la proportion d'agents conformistes en fonction du taux initial de coopération. Nous ne donnerons qu'une explication qualitative, la dynamique étant extrêmement complexe du fait du caractère spatial du jeu. Le taux initial de coopération n'a pas d'influence directe sur l'insatisfaction des conformistes. Étant donné une configuration initiale avec une distribution uniforme sur les règles, certains conformistes vont se trouver localement en majorité et vont donc être stables, d'autres vont se trouver localement en minorité et vont devenir *maxi*. Statistiquement, un peu moins de 50 % des conformistes vont changer de règle dès la première période.

En ce qui concerne les agents *maxi*, deux phénomènes vont influencer leur insatisfaction. Le principal phénomène est la tendance accrue à la formation de petits groupes de conformistes coopérateurs à l'intérieur de groupes conformistes défecteurs lorsque le taux de coopération augmente. Même quand ils sont amenés à disparaître, ce qui est le cas lorsque le taux de coopération initial est inférieur à 50 % (Figure 71-b), leur présence rehausse temporairement les gains de leurs voisins conformistes défecteurs qui deviennent ainsi des modèles pour les agents *maxi*. Ce phénomène étant asymétrique au regard des règles, il biaise l'imitation *maxi* en faveur des conformistes.

Le deuxième phénomène est l'influence de la dispersion des gains dans l'état initial. La probabilité pour qu'un agent *maxi* soit insatisfait dans l'état initial est égale à la probabilité pour que, dans la configuration initiale, un agent ait un gain strictement inférieur à son voisin. Or nous pouvons facilement calculer la distribution des gains dans l'état initial. Si on note γ taux initial de coopération et $\rho(k)=C_8^k \gamma^k (1-\gamma)^{8-k}$ la probabilité d'avoir k voisins coopérateurs,

- le gain d'un coopérateur est égal à $g_c(k)=(k.R+(8-k)S)$ avec une probabilité $\rho(k)$

- le gain d'un défecteur est égal à $g_d(k) = (k.T + (8-k)P)$ avec une probabilité de $\rho(k)$

Nous pouvons donner une estimation de la probabilité moyenne qu'un agent i gagne moins que son voisin dans l'état initial par la probabilité pour que i gagne moins qu'un agent tiré au hasard dans la population. En notant $1_{a < b}$ le nombre qui vaut 1 si $a < b$ et 0 sinon, cette probabilité est égale à :

$$\sum_{i=0..8} \sum_{j=0..8} \rho(i)\rho(j) [\gamma \cdot (1_{\{gc(i) < gc(j)\}} \cdot \gamma + 1_{\{gc(i) < gd(j)\}} \cdot (1-\gamma)) + (1-\gamma) \cdot (1_{\{gd(i) < gc(j)\}} \cdot \gamma + 1_{\{gd(i) < gd(j)\}} \cdot (1-\gamma))]]$$

Somme des probabilités pour que le gain de i soit inférieur au gain d'un agent j pris au hasard, étant données toutes les possibilités sur le nombre de voisins coopérateurs de i et j .

Ce faisant, nous négligeons les corrélations entre les gains d'agents voisins mais cela donne une idée de la manière dont varie l'insatisfaction initiale d'un agent *maxi* en fonction du taux de coopération. Pour appuyer cette intuition, nous avons tracé sur le même graphe (Figure 71-a) la courbe de l'évolution des proportions finales des agents conformistes en fonction du taux initial de coopération ainsi que la courbe de la probabilité pour d'un agent se retrouve avec un gain strictement moindre que l'un de ses voisins.

Annexe III.2.C.a- i) : Pourquoi l'erreur sur les actions favorise-t-elle le conformisme ?

Proposition :

Dans un dilemme du prisonnier métamimétique spatial composé d'agents myopes défecteurs maxi ou conformistes, avec un niveau de bruit ε sur les actions, s'il existe un îlot stable de conformistes, la distribution limite sur les états du système est caractérisée par une population uniformément conformiste. De plus, lors du régime transitoire vers cette distribution limite, la vitesse de croissance des îlots est, au premier ordre, proportionnelle au produit de leur périmètre externe par ε .

Preuve :

Commençons par remarquer que si le taux initial de coopération est nul, l'équilibre au niveau des comportements restera globalement défecteur pour tout p . En effet, un coopérateur isolé gagne strictement moins que tous ses voisins. Les agents qui par l'erreur deviendraient coopérateurs redeviendraient défecteurs à la période suivante en imitant le plus riche voisin, alors que les conformistes qui par erreur deviendraient coopérateurs, redeviendraient défecteurs à la période suivante par conformisme. Les agents coopérateurs dans ce système ne peuvent être qu'isolés et instables.

Il est facile de voir qu'un groupe conformiste stabilisé, ne peut que croître. Le niveau de bruit sur les règles étant nul, un *conformiste* ne peut pas changer de règle par erreur. Nous avons déjà vu (*cf. III.2.B.a.*) que la taille minimale d'un tel groupe dans un réseau carré avec un voisinage de Von Neumann est de douze agents organisés en croix. Par ailleurs, les conformistes ne sont pas sensibles aux erreurs sur les actions. Leur insatisfaction dans un îlot où chacun est entouré d'une majorité de *conformistes* est donc nulle. Comme par ailleurs, des agents *maxi* se convertissent régulièrement au conformisme sous l'effet du bruit, l'insatisfaction relative des conformistes est strictement positive à tout instant tant qu'il reste des maximisateurs. Symétriquement, l'insatisfaction relative des maximisateurs est strictement négative à tout instant. Leur population disparaît donc.

En ce qui concerne la vitesse de croissance, nous avons vu que la conversion d'un agent maximisateur i en agent conformiste venait du fait que l'un des ses voisins

conformiste avait eu dans son voisinage, à un moment donné, plus d'agents coopérateurs que tous les voisins maximisateurs de i . Notons donc $B(t)$ la longueur de la frontière à t entre les régions conformistes et les régions *maxi*. Pour $\varepsilon \ll 1$, la majeure partie des conversions se fait suite à la présence d'un seul agent coopérateur parmi les seconds voisins conformistes d'un agent *maxi*.

Soit i un agent *maxi* à la frontière d'un groupe conformiste, deux cas de figure sont possibles (Figure 72):

- 1- Un second voisin situé à l'intérieur d'un groupe *conformiste* commet une erreur, rehaussant les gains de ses voisins conformistes.
- 2- Un second voisin lui-même à la frontière d'un groupe *conformiste* et *maxi* commet une erreur, rehaussant les gains de ses voisins conformistes et *maxi*.

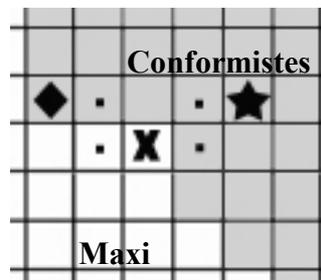


Figure 72 : un second voisin conformiste d'un agent i *maxi* (croix) peut avoir que des voisins conformistes en commun avec i (étoile) ou bien avoir également des voisins *maxi* en commun (losange).

Dans le premier cas, l'agent i deviendra conformiste. Dans le deuxième cas, l'agent i aura parmi ses meilleurs voisins des *conformistes* et des *maxi* qu'il copiera aléatoirement, conformément aux descriptions des règles d'imitation que nous avons données. Il restera donc *maxi* avec une probabilité c correspondant à la proportion de *maxi* parmi les meilleurs agents.

Soit donc v le nombre moyen de seconds voisins conformistes d'un agent i *maxi* entrant dans le cas 1 (pour le cas particulier de la Figure 72, i a 9 seconds voisins de ce type) ; et v' le nombre moyen de seconds voisins de i entrant dans le cas 2 (pour le cas particulier de la Figure 72, i a 1 second voisin de ce type). Dans les situations appartenant au cas 2, notons c la proportion moyenne de conformistes parmi les voisins communs entre i et un second voisin conformiste (sur la figure $\frac{1}{2}$). v , v' et c dépendent de la topologie du réseau et de la forme des îlots. Le calcul de leurs valeurs

est difficile et nous ne le ferons pas ici. Nous en donnerons une estimation plus loin. Le développement au premier ordre de la probabilité pour que i devienne conformiste est alors⁷⁷ : $p(\varepsilon)=(v+cv')\varepsilon+O(\varepsilon^2)$. Nous rappelons que les agents *maxi* choisissent au hasard en cas d'égalité de gains. En définissant la *frontière externe* d'un groupe conformiste comme étant le nombre d'agents maximisateurs qui ont parmi leurs voisins des agents du groupe, le nombre moyen $M(t)$ d'agents *maxi* qui à t deviendront conformistes est donc, : $M(t)=B(t).\left((v+cv')\varepsilon+O(\varepsilon^2)\right)$. L'insatisfaction de la règle *maxi* lorsqu'il existe un îlot stable de conformistes est donc $F(\text{maxi},t)=\frac{B(t).\left((v+cv')\varepsilon+O(\varepsilon^2)\right)}{N.p_{\text{maxi}}}>0$. Etant donné que dans ce cas, l'insatisfaction des conformistes est nulle, l'insatisfaction relative des agents maximisateurs sera donc strictement positive et nous aurons :

$$\Delta p_{\text{maxi}}^t=B(t).\left((v+c.v')\varepsilon+o(\varepsilon)\right) \blacksquare$$

⁷⁷ Nous rappelons que dans le cas où il ne ferait pas partie des meilleurs agents, un agent *maxi* choisit au hasard parmi les meilleurs en cas d'égalité des gains, même si un des meilleurs agents est du même type que lui. Dans le cas où les agents *maxi* auraient une préférence pour les agents du même type qu'eux, il faudrait négliger c , ce qui ne changerait rien qualitativement au résultat.

Annexe III.2.C.a- ii) : Pourquoi l'erreur sur les métarègles favorise-telle les comportements maximisateurs ?

Proposition :

Dans un dilemme du prisonnier métamimétique spatial composé d'agents myopes *maxi* ou *conformistes*, avec un niveau de bruit ε_r sur les méta-règles, la distribution limite sur les états du système est caractérisée par une proportion $(1-\varepsilon_r/2)$ d'agents *maxi* et une proportion $\varepsilon_r/2$ de *conformistes*. De plus, durant le régime transitoire, il existe un temps T_c tel que pour $t < T_c$ la vitesse de disparition des îlots *conformistes* est égale à $\varepsilon_r/2$ le processus s'accélérant pour $t > T_c$.

Preuve :

Supposons donc un niveau de bruit ε_r sur les métarègles uniquement. Commençons par remarquer qu'une règle *conformiste* isolée qui apparaît au sein d'un groupe *maxi* ne peut se maintenir plus d'une période, par définition du conformisme. Cela est également vrai sur une grande partie de la frontière (sur les bords rectilignes et en escalier par exemple). En revanche, ceci devient faux pour un agent *conformiste* qui adopterait la règle *maxi*. Les agents *maxi* n'étant pas sensibles à la composition de leur environnement au niveau des métarègles, la seule façon pour un agent *maxi* de devenir *conformiste* est de commettre une erreur.

De ceci, nous déduisons que l'insatisfaction de la règle *maxi* est égale à $\varepsilon_r/2$. Pour calculer celle de la règle *conformiste* nous remarquerons que la proportion d'agents *maxi* frustrés se divise en deux termes : $p^1(t)$ et $p^2(t)$. Le premier est relatif aux agents *conformistes* qui deviennent *maxi* suite à une erreur. Nous avons donc⁷⁸

$$p^1(t) = \varepsilon_r / 2 \cdot p_{conformistes}$$

Le deuxième est égal à la proportion d'agents *conformistes* dont la majorité des voisins utilisent la règle *maxi*, qui de ce fait deviennent *conformistes*. Ce sont les *conformistes* dont le nombre de voisins *maxi* est strictement supérieur à 4. Participent à $p^2(t)$:

⁷⁸ Nous rappelons que la moitié des erreurs sont corrigées suite à un choix aléatoire.

- d'une part les agents *maxi* qui après être devenus *conformistes* par erreur se retrouvent dans la majorité des cas isolés et redeviennent *maxi*, compensant ainsi l'erreur faite à la période précédente,
- d'autre part, les agents *conformistes* qui vont se retrouver en minorité suite à la conversion de leurs voisins. Ce dernier terme va participer à des effets de cascades de conversions au sein de la population conformiste.

Nous voyons donc que la plupart des transformations qui influencent la taille des groupes *conformistes* se situent à l'intérieur des groupes *conformistes* et non plus à la frontière comme c'était le cas dans l'étude précédente.

Pour prouver la proposition ci-dessus, nous aurons besoin du lemme suivant :

Lemme : Dans un groupe conformiste initialement homogène et défacteur de taille infinie, soumis à un bruit sur les règles de niveau ε_r , avec la règle *maxi* comme alternative, l'insatisfaction relative de la règle conformiste vérifie :

$$\hat{F}_{conf}(t) \geq (1 - p_{maxi}(t)) \cdot g(t) - p_{maxi}(t) \cdot \varepsilon_r / 2 \text{ avec } g(t) > \varepsilon_r / 2 \text{ pour } t > 1.$$

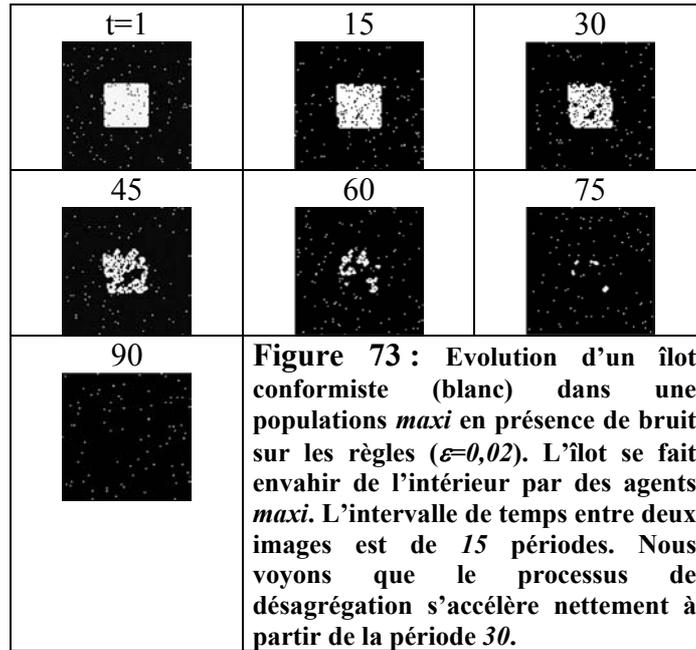
Preuve

Soit $g(t)$, la probabilité pour qu'un agent conformiste adopte la règle *maxi* à t . Nous allons décomposer $g(t)$ en deux parties. Etant donné qu'un conformiste apparaissant au sein d'un cluster *maxi* redeviendrait immédiatement *maxi* par conformisme, nous pouvons faire l'approximation que les agents conformistes devenant *maxi* par conformisme le resteront car ils s'inséreront alors dans un cluster de *maxi*. Nous pouvons alors décomposer la population en deux parties :

P_1 : Une population mixte *conformistes* comportant des *maxi* isolés, représentant une proportion p_1 de la population totale.

P_2 : la population de *maxi* clusterisés représentant une proportion p_2 de la population totale.

Nous avons alors $p_1(0) = 1$ et $p_2(0) = 0$, $p_1(t) + p_2(t) = 1$. En notant $p_{maxi}^1(t)$ la proportion d'agents *maxi* dans la population P_1 , nous avons : $p_{maxi}(t) = p_2(t) + p_{maxi}^1(t)$.



En faisant l'approximation que les agents *maxi* sont uniformément distribués au sein de la population P_1 et en considérant toutes les configurations spatiales possibles autour d'un agent conformiste, nous pouvons calculer d'une part, la probabilité $g_1(t)$ pour qu'un conformiste devienne *maxi* par erreur sachant que la majorité de ses voisins sont conformistes ; d'autre part la probabilité $g_2(t)$ pour qu'un conformiste devienne *maxi* suite à un changement de majorité dans son voisinage, sachant qu'il ne commet pas d'erreur. Nous avons en effet :

$$g_1(t) = \varepsilon_r / 2 \cdot \sum_{k=0}^4 C_8^k p_{\text{maxi}}^1(t)^k \cdot (1 - p_{\text{maxi}}^1(t))^{8-k}$$

et :

$$g_2(t) = (1 - \varepsilon_r / 2) \sum_{k=5}^8 C_8^k p_{\text{maxi}}^1(t)^k \cdot (1 - p_{\text{maxi}}^1(t))^{8-k}$$

La composante g_2 est à l'origine de formation de clusters *maxi*. Les agents conformistes en proportion $(1 - p_{\text{maxi}}^1(t))$ dans la population P_1 devenant *maxi* par conformisme avec la probabilité g_2 font diminuer p_1 . Ceci nous donne les relations :

$$p_1(t+1) = p_1(t) \cdot (1 - g_2(t) \cdot (1 - p_{\text{maxi}}^1(t)))$$

$$p_2(t+1) = p_2(t+1) + p_1(t) \cdot g_2(t) \cdot (1 - p_{\text{maxi}}^1(t))$$

Par ailleurs, la proportion d'agents *maxi* augmente dans la population P_1 du fait de g_1 :

$$p^1_{maxi}(t+1) = \varepsilon_r/2 \cdot (1 - p^1_{maxi}(t+1)) + p^1_{maxi}(t+1) \cdot g_1(t).$$

Ceci nous permet de calculer au passage par récurrence l'évolution des proportions d'agents *maxi* dans la population :

$$p_{maxi}(t) = p_1(t) \cdot p_{maxi}^1(t) + p_2(t).$$

Etant donné que les agents *maxi* ne peuvent adopter la règle conformiste qu'à la suite d'une erreur (les comportements sont homogènes et *maxi* n'est pas sensible aux densités), l'insatisfaction relative des conformistes sera donnée par :

$$\hat{F}_{conf}(t) = (1 - p_{maxi}(t)) \cdot g(t) - p_{maxi}^1(t) \cdot \varepsilon_r/2.$$

Avec $p_{maxi}^1(t) \leq p_{maxi}(t)$ nous avons donc :

$$\hat{F}_{conf}(t) \geq (1 - p_{maxi}(t)) \cdot g(t) - p_{maxi}(t) \cdot \varepsilon_r/2$$

D'après la loi des grands nombres, $g(1) \approx \varepsilon_r/2$, la population étant initialement homogène. Nous pouvons alors calculer $g(t)$ par récurrence comme la somme des fonctions g_1 et g_2 . Nous pouvons déjà remarquer que $g_2(t) = O(p_{maxi}^1{}^5)$ pour $p_{maxi}^1 \ll 1$. Au début du processus, nous allons avoir $g(t) \approx g_1(t) \approx \varepsilon_r/2$. Calculons alors la différence

$g - \varepsilon_r/2$ en utilisant la relation $1 = \sum_{k=0}^8 C_8^k p_{maxi}^1{}^k \cdot (1 - p_{maxi}^1)^{8-k}$:

$$g(t) - \varepsilon_r/2 = (1 - \varepsilon) \cdot \sum_{k=5}^8 C_8^k p_{maxi}^1{}^k \cdot (1 - p_{maxi}^1)^{8-k}$$

Nous voyons que cette quantité est strictement positive dès que $p_{maxi}^1 > 0$.

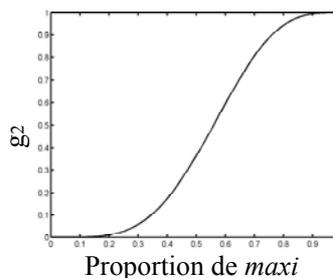


Figure 74 : Courbe décrivant la dépendance de $g_2/(1 - \varepsilon_r/2)$ en fonction de la proportion d'agents *maxi* dans P_1

Or $p_{maxi}^1(2)=\varepsilon_r/2 > 0$ donc $g(2) > \varepsilon/2$. Par ailleurs :

$$p_{maxi}^1(t+1) - p_{maxi}^1(t) = -p_{maxi}^1(t)\varepsilon_r/2 + (1-p_{maxi}^1(t))g(t) > 0 \text{ si } g > \varepsilon_r/2$$

Donc $p_{maxi}^1(t)$ est une suite croissante dans $]0, 1/2[$.

Nous obtenons donc bien que $g(t) > \varepsilon_r/2$ pour $t > 1$. De plus, comme le montre la Figure 74, nous voyons que le terme g_2 augmente très rapidement dès que p_{maxi} est supérieur à 0,3.

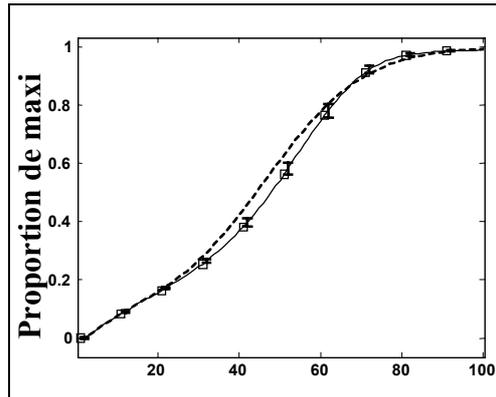


Figure 75 : Adoption de la règle *maxi* dans une population initialement conformiste soumise à un niveau de bruit $\varepsilon=0.02$ sur les règles en fonction du temps. Courbe issue d'une statistique sur 30 simulations en plein et courbe théorique en pointillés. Les deux courbes tendent vers $1-\varepsilon/2$ et montrent un changement de pente vers $Tc=30$ au moment où le phénomène d'adoption en cascade percole.

La Figure 75 monte la différence entre le comportement réel d'une telle population et l'approximation que nous venons d'en faire. Les deux courbes tendent vers $1-\varepsilon/2$ et montrent un changement de pente vers $Tc=40$ lorsque le phénomène d'adoption en cascades de règle *maxi* percole. Enfin, il est assez facile de voir que Tc est une fonction décroissante du niveau de bruit. ■

Nous pouvons maintenant dresser un bilan de l'influence du bruit au niveau des règles sur les insatisfactions des règles *conformistes* et *maxi*. Séparons la population d'agents *maxi* en deux sous populations selon qu'ils sont isolés à l'intérieur d'un groupe *conformiste* ou en clusters. Leur proportion sera notée p_{maxi}^1 et p_{maxi}^2 . Nous ferons la même chose pour la proportion des conformistes. Nous avons alors :

$$\hat{F}_{conf}(t) = \underbrace{-p_{conf}^1(t) \cdot g(t) + p_{maxi}^1(t) \cdot \varepsilon_r/2}_{\text{Frustrabilité dans les groupes conf.}} + \underbrace{p_{maxi}^2(t) \cdot \varepsilon_r/2 - p_{conf}^2(t)}_{\text{frustrabilité hors des groupes conf}}$$

Comme nous l'avons déjà mentionné, les conformistes qui sont au sein d'un groupe *maxi* sont des anciens *maxi* qui ont commis une erreur à la période précédente. Ceux-ci redeviennent *maxi* immédiatement si bien que l'on a $p^2_{maxi}(t) = \varepsilon_r/2 \cdot p^2_{conf}(t)$. Comme $g(t) > \varepsilon/2$ et que par définition $p^1_{maxi}(t) < p^1_{conf}(t)$, nous voyons que le premier terme de l'équation ci-dessus est strictement négatif quelque soit t , alors que le second est nul. Ceci montre que la règle *conformiste* va disparaître, les groupes *conformistes* étant envahis de l'intérieur par des agents ayant adopté la règle *maxi* (cf. Figure 73). De plus, d'après le lemme précédent, il existe un seuil critique de pénétration des agents *maxi* dans les clusters conformistes au-delà duquel le phénomène d'adoption en cascades de la règle *maxi* devient prédominant et provoque une accélération de la formation des clusters. A l'équilibre, la règle *conformiste* ne reste plus qu'à l'état de trace en proportion $\varepsilon_r/2$.

Si maintenant nous faisons tendre ε vers 0, nous obtenons que la distribution limite est caractérisée par une population entièrement *maxi*. ■

Bibliographie

Et où ont-ils pris, tous ces sages, que l'homme avait besoin d'un vouloir normal, d'un vouloir vertueux ? Qu'est-ce qui leur permet de croire que l'homme a absolument besoin d'un vouloir raisonnable, avantageux ? L'homme n'a besoin que d'une chose : d'un vouloir *indépendant*, quel que soit le prix de cette indépendance et de son aboutissement.

Notes d'un souterrain, Dostoïevski

- Abramson G & Kuperman M., Social Games in Social Networks, *Phys. Rev. E* vol.63, 030901 (2001)
- Ahn T. K., Ostrom E. et Walker J.M., Incorporating motivational heterogeneity into game theoretic models of collective action, 2002 meeting of the *Public Choice* Society San Diego, California, March 22-24., 2002
- Ahn, T.K., Ostrom, E., Schmidt, D., Shupp R. and Walker. J., Cooperation in PD Games : Fear, Greed, and History of play., *Public Choice*, 106 (1/2): 137-155, 2001
- Ahn, T.K., Chavalarias, D. & Lazar A., Endogenous Network Formation and Evolution of Preferences, In David Sachar, ed. *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models, and Tools*. Argonne, IL: Argonne National Laboratory., 2002
- Alvard, M. S., The Adaptive Nature of Culture, *Evolutionary Anthropology*, 136-149, 2003
- Arthur B. W., Inductive reasoning and bounded rationality, *Am. Econ. Assoc. Papers and Proc* 84, 406-411, 1994
- Ashby W. R., Principles of the Self-Organizing System, p 255-278, In Heinz Von Foster & H. Zopf (eds), *Principles of Self-Organization*, New-York Pergamon, 1962
- Ashlock D. Smucker, M.D., Stanley, E. A. & Testfatsion, L., Preferential partner Selection in an Evolutionary Study of PD, *Economic report Serie n°35*. Iowa State University, 1995
- Atlan, A., L'émergence du nouveau et du sens, In: *L'auto organisation, de la physique au politique*, J-P Dupuy & P. Dumouchel, Seuil, 1983
- Aumann R. J., Rationality and Bounded Rationality, *Games and Economic Behavior* 21, 2-14, 1997
- Aunger R., Conclusions, in Aunger R. (ed.) *Darwinizing Culture: The Status of Memetics as a Science*. Oxford University Press, 163-173., 2000
- Aunger R., Darwinizing Culture: Introduction, Aunger R. (ed.) *Darwinizing Culture: The Status of Memetics as a Science*, Oxford University Press, 2000
- Axelrod R., *The Dissemination of Culture: A Model with Local Convergence and Global Polarization*, *Journal of Conflict Resolution*, 41, 203-26., 1997
- Axelrod R., *The Evolution of Cooperation*, NY: Basic Books, 1984
- Axelrod R., The emergence of cooperation among Egoists, *The American Political Science Review*, V. 75, issue 2, 3006-318, 1981
- Bala V., Goyal S., Conformism and diversity under social learning, *Economic Theory* 17, 101-120, 2001
- Bala V., Goyal S., Learning from neighbors, *Review of Economic Studies*, 1998
- Bala V., Goyal S., Self-organisation in *Communiation Network*, <http://citeseer.nj.nec.com>, 1997
- Bandura A., *Social Learning Theory*, 1977
- Bendor J., Swistzak P., The evolutionary stability of cooperations, *American Political Science Review*, Vol 91, n°2, 1997
- Bonabeau, E., and Theraulaz, G., *Intelligence Collective*, Hermès, Paris, 1994
- Bourgine, P., Models of autonomous agents and of their coevolutionary interactions, In *entretiens Jacques Cartier*, Lyon, 30 nov.-2 dec., 1994
- Bourgine, P., Walliser, B., La décision individuelle, In : *Leçon de microéconomie évolutionniste*, Ed. Orlean A., Lessourne J., Walliser B., 119-157, 2002

- Bourgine, P., What is Cognitive Economics, In *Cognitive Economics*, Bourguine P, Nadal J-P (ed.), Springer, 2004
- Bowles S., Gintis H., The Origins of Human Cooperation, Peter Hammerstein (ed.) *The Genetic and Cultural Origins of Cooperation*, Cambridge: MIT Press., 2003
- Bowles S., Individual Interactions, group conflicts and the evolution of preferences, In *Steven Durlauf and Peyton Young*, Social Dynamics. Cambridge: MIT Press, 2000
- Bowles S., Gintis H., The Evolution of Strong Reciprocity, *SFI working paper*, 1998
- Bowles S., Gintis, H., Evolution of reciprocal preferences, *SFI*, 2000
- Boyd R., Richerson P.J., Why does Culture increase human adaptability, *Ethology and Sociobiology*. 16: 125–143, 1995
- Boyd R., Richerson P.J., Why Culture is Common, but Cultural Evolution is Rare, *Proceedings of the British Academy*, 88: 77–93, 1996
- Boyd R., Richerson P.J., Culture and the Evolutionary process, Chicago, IL: *University of Chicago Press.*, 1985
- Brauchli K., Killingback T. & Doebeli M., Evolution of Cooperation in Spatially Structured Populations, *J. theor. Biol.* 200, 405-417, 1999
- Byrne R.W., Russon A.E., Learning by Imitation: a Hierarchical Approach, *Behavioral and Brain Sciences*, 1998
- Byrne R.W., Evolution of Primate Cognition, *Cognitive Science*, Vol 24 (3) 543-570, 2000
- Castoriadis, C., La logique des magmas et la question de l'autonomie, In: *L'auto organisation, de la physique au politique*, J-P Dupuy & P. Dumouchel, Seuil, 1983
- Cavalli-Sforza L. L., Feldman M. W., Cultural Transmission and Evolution : a Quantitative approach, *Princeton Univ. Press*, 1981
- Chaminade T., Meltzoff A. N. & Decety J., Does the End Justify the Means? A PET Exploration of the Mechanisms Involved in Human Imitation, *NeuroImage* 15, 318–328 (2002), 2002
- Chavalarias, D., Emergence of cooperation and selection of interactions, proceedings of *International Symposium On Complexity*, Shanghai 6-7 august 2002,
- Cochard, F., Nguyen Van, P. & Willinger, M., Trusting Behavior in Repeating Investment Game, *J. of Economic Behavior and Organization*, in press, 2004
- Cohen M. D., Riolo R.L. & Axelrod R., The Role of Social Structure in the Maintenance of Cooperative Regimes, *Rationality and Society*, 13: 5-32, 2001
- Conte, R., Paolucci, M., Intelligent Social Learning, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 4, no. 1, <<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/1/3.html>>, 2001
- Crubézy, E., Braga, J., Homo Sapiens prend de l'âge, *La recherche*, n°368: 30-35, 2003
- Dal Forno, A., Merlone, U., From Classroom Experiments to Computer Code, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 7, no. 3? <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/3/2.html>>, 2004
- Damasio R. A., *Le sentiment même de soi*, éditions Odile Jacob, 1999
- Damasio R. A., *L'erreur de Descartes*, éditions Odile Jacob, 1995
- Dawkins R., *The Selfish Gene*, Oxford University Press, 1996
- Deneubourg, J. L., Goss. S., Collective patterns and decision-making., *Ethol. Ecol. Evol.* 1: 295 –311., 1989
- Donald M., *Origins of the Modern Mind*, Cambridge, MA: Harward University Press, 1991

Donald M., *Precis of Origins of the Modern Mind: Three Stages in the Evolution of Culture and Cognition*, *Behavioral and Brain Sciences* 16 (4): 737-791, 1997

Donald M., *The Cognitive Foundations of Institutional Knowledge*, *Working paper for the Second KNEXUS Research Symposium*, 2000

Dostoïevski, *Notes d'un Souterrain*, GF-Flammarion, 1864

Dupuy, J-P, et Robert, J., *La trahison de l'opulence*, Puf 1976.

Dupuy J.-P., *Rationality and Self-Deception*, In : *Self Deception and Paradoxes of Rationality*, ed. J.-P. Dupuy, CSLI publications, Stanford, CA., 1998

Dupuy J.-P., *Pour un catastrophisme éclairé*, Seuil, 2002

Dupuy J.-P., *Avions-nous oublié le mal?*, Le temps d'une question, Bayard, 2002

Durán O., Mulet R., *Evolutionary Prisoner's Dilemma in Random Graphs*, *arXiv: cond-mat/0305353 v2* 21 May 2003, 2003

Ebel H., Bornholdt S., *Co-evolutionary games on networks*, *arXiv: cond-mat/0208273 v1* 14, 2002

Epstein J. M., *Zones of Cooperation in Demographic Prisoner's Dilemma*, 1997

Fehr E., Fischbacher U., *The nature of human altruism*, *Nature*, Vol 425, october, 2003

Fehr E., Simon G., *Altruistic punishment in humans*, *Nature*, Vol 415, 137-140, 2002

Feldman M. W., Laland K. N., *Gene-culture coevolutionary theory*, *TREE* Vol 11 n°11 Nov 96 Elsevier, 1996

Ferrer i Cancho & Solé, R. V. (2003). *Optimization in complex networks. Statistical Mechanics of Complex Networks, Lecture Notes in Physics* Vol. 625, Springer (Berlin), pp 114.125.

Fiske S.T., Taylor S. E., *Social Cognition*, McGraw-Hill International Editions, 1991

Foster, D., Young, P., *Stochastic Evolutionary Game Theory*, *Theoretical Population Biology* 38, 219-232, 1990

Frank J., *Natural selection, rational economic behavior, and alternative outcomes of the evolutionary process*, *Journal of Socio-Economics* Vol. 32 - 6 (12), p 601-622, 2003

Frye D., Zelazo P. D. and Palfai T., *Theory of Mind and Rule-Based Reasoning*, *Cognitive Development*, 10, 483-527, 1995

Galam S., *Sous les chemises de la symétrie*, *Pour la Science*, 1998

Gans E., *Mimetic Paradox and the Event of Human Origin*, *Anthropoetics - The Electronic Journal of Generative Anthropology* Volume I, number 2, 1995

Gergely, G., Bekkering, H. & Király, I., *Rational imitation in preverbal infants*, *Nature*, Vol 415, 2002

Giannitsarou C., *Heterogeneous learning*, *Review of Economic Dynamics*, 2003

Gintis H., *Game Theory Evolving*, Princeton Univ. Press, 2003

Gintis H., *The Individual in Economic Theory: A Research Agenda*, 1998

Girard R., *Des choses cachées depuis la fondation du monde*, Ed. Grasset, 1978

Girard R., *Mensonge romantique et Vérité romanesque*, Grasset, 1961

Gould S. J., *An urchin in the storm*, London Penguin, 1987

Gould, S. J., Lewontin R. C., *The Spadrels of San Marco and the Panglossian paradigm : a critique of the adaptationist programme.*, *Poc. R. Soc. London B*: 205: 581-598, 1979

- Grim, P., Undecidability in the Spatialized Prisoner's Dilemma: Some Philosophical Implications, *IEEE International Conference on Computational Intelligence*, combined meeting of ICNN, FUZZ-IEEE, and ICEC, Orlando, June-July, 1994
- Güth W., Yaari M., An evolutionary approach to explain reciprocal behavior in a simple strategic game, In : Witt U (ed) *Explaining process and change - approaches to evolutionary economics*, p23-34. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1992
- Güth W., Kliemt H. & Peleg B., Co-evolution of preferences and Information in Simple Games of Trust, *German Economic Review* 1(1),83-110, 2000
- Haller, H., Sarangi, S., Nash Networks with Heterogeneous Agents,v2, 2003
- Hamilton, W.D., The genetical evolution of social behavior, *J. theor. Biol.*7: 17-52, 1964
- Hammerstein P., Genetic and Cultural Evolution of Cooperation, *Dahlem workshop report*, Hammerstein (ed.), 2002
- Hanaki N., Peterhansl A., Viability of cooperation in evolving interaction structures, published in the *Proceedings of Agent 2002 Conference on Social Agents: Ecology, Exchange & Evolution*, 2002
- Harsanyi J.C., A New Theory for Equilibrium Selection for Games with Incomplete Information, *Games and Economic Behavior* 10, 318-332, 1995
- Hashimoto T., Kumagai Y., Méta-Evolutionary Game Dynamics for Mathematical Modelling of Rules Dynamics, *Proceedings of 7th European Conference on Artificial Life (ECAL2003)*, W. Banzhaf, T. Christaller, and J. Ziegler (Eds.), 2003
- Hauert C., Fundamental clusters in spatial 2x2 games, *Proc. R. Soc. London B* 268, 761-769, 2001
- Hayne H., Thoughts from the Crib: Meltzoff and Moore (1994) alter our views of mental representation during infancy, *Infant Behavior & Development* 25: 62-64, 2002
- Henrich J., Boyd R., Why People Punish Defectors Weak Conformist Transmission can Stabilize Costly Enforcement of Norms in Cooperative Dilemmas, *J. theor. Biol.* (2001) 208, 79-89, 2001
- Henrich J., Boyd R., The Evolution of Conformist Transmission and the Emergence of Between-Group Differences, *Evolution and Human Behavior* 19: 215-241, 1998
- Henrich J. & al., 'Economic Man' in Cross-cultural Perspective: Behavioral Experiments in 15 Small-scale Societies, *American Economic Review*, 91: 73-78, 2001
- Henrich, J., Gil-White, F. J., The Evolution of Prestige, *Evolution and Human Behavior* 22: 165-196, 2001
- Hofbauer J., Sigmund K., *The Theory of Evolution and Dynamical Systems*, London Mathematical Society, Cambridge University Press, 1988
- Hofstadter, D. R., *Goedel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid*, NY: Basic Books, 1979
- Howard R., Atruism and Selfishness, *Behavioral and Brain Sciences*, 25: 2, 2002, 2002
- Huberman, B. A ., & Glance N.S., Evolutionary games and computer simulations, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 90: 7716-7718, 1993
- Jager W., *A conceptual méta-model of human behaviour*, Universal Press, 2000
- Jain S., Krishna S., A model for the emergence of cooperation, interdependence & structure in evolving networks, arXiv, 2000
- Jin E., Girvain M. & Newman M.E.J., The structure of growing social networks

- Johnson, S. C., Booth, A. & O'Hearn K., Inferring the goals of a nonhuman agent, *Cognitive Development* 16 (2001) 637–656
- Kaniovski Y. M., Kryazhinskii A. V. and Young H. P., Adaptive Dynamics in Games Played by Heterogeneous Populations, *Games and Economic Behavior* 31, 50-96, 2000
- Karmiloff-Smith A., Precis of Beyond modularity : a developmental perspective on cognitive science., *Behavioral and Brain Sciences* 17 (4): 693-745., 1994
- Kirman A., General Equilibrium, in *Cognitive Economics*, Bourguine P, Nadal J-P (ed.), Springer, 2004
- Koeslag J. H., Terblanche E., Evolution of cooperation: cooperation defeats defection in the cornfield model, *Journal of Theoretical Biology* 224 399–410, 2003
- Laureti P., Ruch P., Wakeling J. and Zhang Y-C., The Interactive Minority Game: a Web-based investigation of human market interactions, *Physica A* 331 651 – 659, 2004
- Lengfelder A., Gollwitzer M. P., Reflective and Reflexive Action Control in Patients With Frontal Brain Lesions, *Neuropsychology*, by the *American Psychological Association*, Vol. 15, No. 1, 80-100, 2001
- Lessourne J., The Future of Cognitive Economics, in *Cognitive Economics*, Bourguine P, Nadal J-P (ed.), Springer, 2004
- Lestel D., *Les origines animales de la culture*, Ed. Flammarion, 2001
- Lestel D., The Biosemiotics & Phylogenesis of Culture, *Social Science Information*, 35-68, 2002
- Lestel D., *Comportement Animal, Communication Animale et Langage*, in: J.M.Hombert (ed.), *Origines des Langues et du Langage*, Paris: O.Jacob, 2002
- Lieberman M. D., Gaunt, R., Gilbert, D. T., Troope, Y., Reflexion and Reflection : A Social Cognitive Neuroscience Approach to Attributional Inference, *Advances in Experimental Social Psychology*, Vol.34, 199-249, 2003
- Lieberman M. D., Reflexive and Reflective Judgment Processes : A Social Cognitive Neuroscience Approach, J. P. Forgas, K. R. Williams, & W. von Hippel (Eds.), *Social judgments: Implicit and explicit processes* (pp. 44-67). New York: Cambridge University Press., 2003
- Linard, M., Vers un sujet narratif de la connaissance dans les modélisations de l'apprentissage, *Intellectica*, 1994/2, 19, pp. 117-165,
- Lindgren K., Evolutionary Dynamics in Game-Theoretic Models, Talk presented at the workshop : *The economy as an evolving complex system II*, Santa Fe Institute, 1995
- Lindgren K., Johansson J., Coevolution of strategies in n-person Prisoner's Dilemma, In *Evolutionary Dynamics: Exploring the Interplay of Selection, Accident, Neutrality, and Function*, Edited by James P. Crutchfield and Peter Schuster, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Series, 2002
- Longo G., Laplace, Turing et la géométrie impossible du "jeu de l'imitation"! : aléas, déterminisme et programmes dans le test de Turing, *Intellectica*, n.35, 2003
- Masuda N., Aihara K., Spatial prisoner's dilemma optimally played in small-world networks, *Physics Letters A* 313 55–61, 2003
- Michor, F., Nowak, M. A., The good, the bad and the lonely, *Nature* Vol. 419, 2002
- Mounoud, P., From direct to reflexive (self-knowledge: A recursive model. About (self-produced) actions considered as transformations., P. Rochat (Ed.) *The Self in Early Infancy. Theory and Research*. Amsterdam: North Holland. Elsevier Science Publishers., 1995
- Nakamaru N., Matsuda H. & Iwasa Y., The Evolution of Cooperation in a Lattice-Structured Population, *Journal of Theoretical Biology* 184, 65-81, 1997

- Nash, J. F., Equilibrium Points in n-Person Games, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 36, No. 1, pp. 48-49, 1950
- Newman M.E.J., Whos is the best connected Scientist? A study of scientific coauthorship networks, arXiv, *cond-mat*, 0011144, 2000
- Newman M.E.J., The structure of scientific collaboration Network, *SFI working papers*
- Newman M.E.J., Moore C. & Watts D.J., Model of small-world, arXiv, *cond-mat*, 9909165, 1999
- Newman M.E.J., Clustering & preferential attachment in growing networks, arXiv, *cond-mat*, 0104209, 2001
- Noble J., Todd P.M., Is it really imitation? A review of simple mechanisms in social information gathering, *citeseer*, 1998
- Nowak, M. A., May, R.M., Evolutionary Games and Spatial Chaos, *Nature*, 359: (6398) 826-829, 1992
- Nowak, M. A., Sigmund, K., Oscillations in the evolution of reciprocity, *J. theor. Biol.*, 137, 21-26, 1989
- Nowak, M. A., May R. M., The Spatial Dilemmas of Evolution, *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol.3, n°1, 35-78, 1993a
- Nowak, M. A., Bonhoeffer, S. & R. M. May, More Spatial Games, *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol.4, n°1, 35-56, 1994a
- Nowak, M. A., Sigmund, K., Games on Grid, In: *The Geometry of Ecological Interactions: Simplifying Spatial Complexity*, eds. Dieckmann U, Law R & Metz JAJ, pp. 135–150. Cambridge University Press., 2000
- Nowak, M. A., An Evolutionary Stable Strategy May Be Inaccessible, *J. theo. Bio.* 142: 237-241, 1990
- Nowak, M. A., Sigmund, K., Tit For Tat in Heterogeneous Populations, *Nature*, 355: 250-253, 1992
- Nowak, M. A., Sigmund, K., A Strategy of Win-Stay-Lose-Shift that outperform Tit-for-Tat in the Prisoner's Dilemma game, *Nature* 364: 56-58, 1993b
- Nowak, M. A., Bonhoeffer, S. & R. M. May, Spatial Games and the Maintenance of Cooperation, Proc. Natl. Acad. of Sci. USA, Vol. 91, p 4877-4881, may 1994, *Evolution*, 1994b
- Nowak, M. A., Sigmund, K. & El-Sedy E., Automata, Repeated Game and Noise, *J. Math. Bio.* 33: 703-722, 1995
- Nowak, M. A., Sigmund, K., Chaos and the evolution of cooperation, Proc. Natl. Acad. of Sci. USA, Vol. 90, p 5091-5094, june 1993, *Evolution*, 1993c
- Offerman, T., Potters, J. & Verbon, H. A. A., Cooperation in Overlapping Generation Experiment, *Games and Economic Behavior*, 36, 264-275, 2001
- O'Riordan C., IPD : a Review, *Technical report NUI-IT260601*, 2001
- Orléan A., *What is collective Belief?*, in Cognitive Economics, Bourguine P, Nadal J-P (ed.), Springer, 2004
- Orléan A., The evolution of imitation, In Patrick Cohendet, Patrick Llerena, Hubert Stahn et Gisèle Umbhauer (eds.), *The Economics of Networks*, Berlin, Heidelberg et New-York, Springer-Verlag, Chap 15, 325-339, 1998
- Orléan A., Les interactions mimétiques, In : *Leçon de microéconomie évolutionniste*, Ed. Orlean A., Lessourne J., Walliser B., 119-157, 2002
- Orléan A., Bayesian interactions and collective dynamics of opinion: Herd behavior and mimetic contagion, *J. of Economic Behavior and Organization* Vol 28 257-274., 1995
- Ostrom E., Collective Action and the evolution of social norms, *Journal of economic perspectives*, V.XIV, N°3, 137-158, 2000

- Ostrom E., Gardner R. & Walker J., *Rules, Games, and Common-Pool Resources*, University of Michigan Press, 1994
- Pagen, M. K., Nowak M. A., Unifying Evolutionary Dynamics, *J. theor. Biol.* 219, 93–98, 2002
- Perner, J., Lang, B., What Causes 3-year olds' Difficulty on the Dimensional Change Card Sorting Task?, *Infant & Child Development*, 11, 93-105, 2002
- Picq P., Interview, Nous ne descendons pas du singe mais de l'arbre., *Science et avenir*, 682: 58-63, 2003
- Pigliucci, M., Kaplan J., The fall and rise of Dr Pangloss: adaptationism and the Spandrels paper 20 years later, *TREE* vol. 15, no. 2, 2000
- Rabin M., A perspective on psychology and economics, *European Economic Review* 46, 657 – 685, 2002
- Redner S., How Popular is your paper? An empirical study of the citation distribution, arXiv, cond-mat, 9804163, 1998
- Rendell L., Whitehead H., Culture in whales and dolphins, *Behavioral and Brain Sciences* 24 (2): (2001)
- Rogers, A. R., Does Biology Constrain Culture?, *Am. Anthropology* 90: 819–831., 1988
- Roth C., Bourguine P., Binding Social and Cultural Networks: A Model, arXiv: nlin.AO/0309035, 2003
- Rumiati R. I., Bekkering H., To imitate or not to imitate? How the brain can do it, that is the question!, *Brain and Cognition* 53: 479–482, 2003
- Seth. K. A., Interaction, Uncertainty & the evolution of complexity, in Husbands, P., and Harvey, I. (Eds.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, pp. 521-530 Cambridge, MA. MIT Press., 1997
- Smith J.D., The Comparative Psychology of Uncertainty Monitoring and Metacognition, *Behavioral and Brain Sciences*, Volume 26, Issue 3, 261-283, 2003
- Sonnemans J., Arthur Schram A. & Offerman T., Strategic behavior in public good games: when partners drift apart, *Economics Letters* Volume 62, Issue 1, Pages 35-41, 1999
- Sonnemans J., Schram A. and Offerman T., Public Good Provision and public bad prevention : the effect of framing, *J. of Economic Behavior & Organization*, Vol. 34, 143-161, 1998
- Sperber D., Métarepresentations in an evolutionary perspective, *Métarepresentations: A Multidisciplinary Perspective*. Oxford University Press, 2000, pp.117-137, 2000
- Sperber D., Individualisme méthodologique et cognitivisme, Dans: R. Boudon, F. Chazel & A. Bouvier (eds.) *Cognition et sciences sociales*. Paris: Presse Universitaires de France. (1997) 123-136.
- Szilagyi, M. N., An investigation of N-Person Prisoner Dilemma, *Complex Systems* V14 - 2, 2003
- Tarde G., *Les lois de l'imitation*, Les Empêcheurs de Tourner en Rond (2001), 1890
- Tarde G., *Les lois sociales Esquisse d'une sociologie*, Jean-Marie Tremblay (ed), Cégep de Chicoutimi <http://pages.infinet.net/sociojmt>, 1898
- Tomasello M., Primate Cognition: Introduction to the Issue, *Cognitive Science*, Vol 24 (3), pp. 351: 361, 2000
- Tomasello, M., *The Cultural Origins of Human Cognition.*, Harvard University Press., 1999
- Towse, J. N., Redbond, J, Houston-Price, C. M. T. & Cooka, S., Understanding the dimensional change card sort Perspectives from task success and failure, *Cognitive Development* 15: 347-365, 2000
- Trivers, R., The evolution of reciprocal altruism, *Q. Rev. Bio.* 46: 35-17, 1971

Valsiner J., Autoregulation: Dynamic sign hierarchies constraining the Stream of Consciousness, Seminar Presentation at the *Seminar on Symbolic Forms* Ecole Normale Supérieure, Paris February, 6, 2004 Semiotic (http://formes-symboliques.org/article.php3?id_article=51),

Van Damme E., Aumann R., On the State of the Art in Game Theory: An Interview with Robert Aumann, *Games and Economic Behavior* 24,181-210, 1998

Van de Ven J., Endogenous Preferences and Optimal Subsidies, 2000

Varela, F., L'auto-organisation : de l'apparence au mécanisme, In: *L'auto organisation, de la physique au politique*, J-P Dupuy & P. Dumouchel, Seuil, 1983

Varela, F., *Connaître, les sciences cognitives, tendances et perspectives*, Seuil, 1988

Von Neumann, J., Morgenstern, O., *Theory of Games and Economic Behavior*, New York: Willey, [1944], 1964

Watts, D. J., *Small Worlds: The Dynamics of Networks Between Order and Randomness*, Princeton University Press, Princeton, 1999

Weibull J. W., Testing game theory, Stockholm School of Economics, Working Paper Series in Economics and Finance, SSE WP 382, 2002

Weibull J. W., *Evolutionary Game Theory*, MIT press, 1995

Weisbuch, G., Deffuant, G., Amblard, F. & Nadal J-P., Meet, Discuss, and Segregate, Wiley Periodicals, Inc., Vol. 7, No. 3 *Complexity* 55, 2002

Wilson E.O., *Sociobiology: the new synthesis.*, Harward University Press, Cambridge, 1975

Young H. P., Individual Strategy and Social Structure: *An Evolutionary Theory of Institutions*, Princeton Univ. Press., 2001

Young H. P., Bounded Rationality and Learning, On the limits to rational learning, *European Economic Review* 46, 791 – 799, 2002

Young, H.P., Individual learning and social rationality, *European Economic Review* 42: 651-663, 1998

Zelazo P. D., Frye D. and Rapus T., Age Related Dissociation Between Knowing Rules and Using Them, *Cognitive Development*, 11, 37-63, 1996

Zelazo P. D., The development of conscious control in childhood, *TRENDS in Cognitive Sciences* Vol.8 No.1 January 2004, 2004

Zelazo P.D., Lourenco S.F., Imitation and the dialectic of representation, *Developmental Review* 23: 55–78, 2003

Zimmermann M.G., Eguiluz, V. M., Cooperation, adaptation & emergence of a leadership, V2, *arXiv: nlin.AO/0105004*, 2001

Index

A

abulic dissociation · 116
anthropologie évolutionniste · 63
anticonformiste · 202
Apply · 174
apprentissage social · 80
attracteur · 188
 métamimétique · 192
auto-cohérence · 177, 192
auto-constitution · 175
autonomie · 175
auto-organisation · 131, 133, 135, 169, 247

B

bassin d'attraction · 188
best reply · 186
biosémiotique · 93
bipolarisation · 286
bord élémentaire · 203
borne cognitive · 156, 199
bruit · 194, 256
 modélisation du - · 230
 structuration par le - · 193

C

cadre de référence · 111, 125, 145
CCC · 110
chaîne
 métamimétique · 153
changement d'espace des phases · 194,
 256, 285
clôture opérationnelle · 192, 248
co-évolution · 251, 254, 282
co-évolution gènes-culture · 58, 61, 263
cognition · 9
cognition sociale · 9, 143, 193, 220, 256,
 269, 272
cognitive complexity and control theory ·
 110
Common Pool Ressources · 24
compromis exploration/exploitation · 18,
 194, 240
conformisme · 61, 202, 292

constructivisme · 120
contextualisation · 122
contrefactuel · 109, 151, 164, 170, 177,
 186, 219, 280
contrefactuellement stable · 186
coopération · 21, 220, 271
couplage
 par clôture · 134, 135, 176, 193
 par input · 134, 174
 ponctuel · 134
culture · 55, 65, 193
cybernétique · 131

D

différenciation · 251, 286
diffusion du bruit · 248
dilemme du prisonnier · 22
 métamimétique · 158, 198
dilemmes sociaux · 21, 24
dissonance cognitive · 165
distribution endogène · 247
dynamique des réplicateurs · 57, 182, 263

E

éducation · 163, 170, 178
émergence · 248
 de la coopération · 254, 270
énaction · 137
ensemble stochastiquement stable · Voir
 SSS
équilibre
 de Nash · 184, 186
 métamimétique · 186
 métamimétique, exemple · 209
 stochastiquement stable · 184
espace des phases · 257
espace produit · 168, 280
ESS · 184, 188
évolution
 biologique · 263
 culturelle · 58, 67, 78, 263
 lamarkienne · 59

F

facilitation sociale · 80
fait stylisé · 21
fausse croyance · 110
fitness · 57, 182
fonction de modification · 150
 exemple · 202
fonction de sélection · 150
 exemple · 201
fonction de valuation · 150, 182
 exemple · 200
fonction exécutive · 113
forme institutionnelle · 285
frontière externe · 306
frustré · 188, 215

G

gestion biens communs · 24

H

hiérarchie de règles · 9, 152
holisme · 8

I

imitation · 93, 99, 141, 167, 178
 critère · 142
 règle d'· · 150
individualisme méthodologique · 8
individualisme méthodologique complexe ·
 8, 131, 193
inférence · 163
 endogénéisation des règles d'· · 262
insatisfaction · 178, 179
 relative · 180
institution · 285
intelligence collective · 7, 15
invariant · 122, 167, 175

J

jeu métamimétique · 157
 cas minimal · 187, 189
jeux évolutionnistes · 183

M

Markov
 processus de - · 180
 processus de - perturbé · 181, 192
maxi · 202, 291
médiation sémiotique · 122
meilleur · 182
meilleure réponse · 186
méta-cognition · 85, 116, 157
métadynamique · 9, 193, 220, 269, 272
métadynamique
 exemple · 253
méta-mémoire · 85
métamimétique
 attracteur · 188, 192
 chaîne · 153, 160
 dilemme du prisonnier · 158, 198
 équilibre · 186
 jeu · 157
 règle · 152
 système · 152
méta-organisation · 132
métarègle · 9, 116
méta-stratégie · 172
mini · 202, 292
mise à jour
 parallèle asynchrone · 261
 parallèle synchrone · 230
 trait modifiable · 159
motivations · 145

N

Nash · *Voir* équilibre de -
nativisme · 120
nouveau · 194, 256

O

ontogenèse · 19

P

perturbations · 135, 230
priming · 80
principe de non-exclusion · 24
principe de rivalité · 24
provision de biens publics · 21, 24, 28

R

rachet effect · 78
rationalité · 8
rationalité limitée · 157
réflexivité · 108, 110, 116, 118, 125, 157, 164
règle
 d'imitation · 150
 de comportement · 9
 de transmission culturelle · 58
 d'imitation, réflexivité · 152
 espace des - · 172
 métamimétique, exemple · 202
répicateurs · *Voir* dynamique des répicateurs
réplication par imitation · 181
réseau social · 147

S

sélection naturelle · 266
SSE · *Voir* équilibre stochastiquement stable
SSS · 190
stochastiquement contrefactuellement stable · 190, 282
stratégie · 146, 153, 172
stratégie évolutionnairement stable · 184

système complexe · 8, 15, 17
système opérationnellement clos · 256 *Voir* clôture opérationnelle
systèmes autonomes · 132

T

taux de mutation · 265
théorie de la simulation · 109, 125, 164
théorie de la théorie · 109, 164
théorie de l'esprit · 110
théorie du choix rationnel · 170
trait
 autre · 146
 culturel · 55
 modifiable · 146, 152
 modifiable, mise à jour · 159
 perçu · 147
transmission
 culturelle · 55, 57, 65, 264
 horizontale · 148
 oblique · 148
 verticale · 148

V

voisinage · 147
 de Von Neumann · 31, 199

Notations

Remarque générale: Nous avons repris lorsque cela avait un sens, les notations utilisées par Weibull (1995) dans son ouvrage *Evolutionary Game Theory*.

Lettres latines

$Bc(i)$	Borne cognitive de l'agent i i.e. nombre maximal de niveaux que peut comporter sa chaîne meta-mimétique.				
b	Comportement (ce qui est appelé opportunité en théorie des jeux).				
C	Action de coopérer dans le dilemme du prisonnier				
D	Action de faire défection (ou de trahir) dans le dilemme du prisonnier.				
F	Fonction qui applique en parallèle la règle métamimétique de chacun des agents en fonction de ce qu'ils perçoivent.				
g	Gain d'un agent (g_i : gain de l'agent i)				
i	Agent				
$i_{DC}(\gamma)$	Probabilité pour qu'un défecteur gagne moins qu'un coopérateur dans un dilemme du prisonnier spatial lorsque le taux de coopération dans la population est égal à γ, la distribution spatiale des coopérateurs étant uniforme.				
m	Nombre de traits modifiables.				
N	Nombre de joueurs ou taille du réseau torique dans un jeu spatial à N^2 joueurs.				
p	Paramètre dans la paramétrisation de matrice du dilemme du prisonnier. $p \in]0, .5[$ <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>$(1-p, 1-p)$</td> <td>$(0, 1)$</td> </tr> <tr> <td>$(1, 0)$</td> <td>(p, p)</td> </tr> </table>	$(1-p, 1-p)$	$(0, 1)$	$(1, 0)$	(p, p)
$(1-p, 1-p)$	$(0, 1)$				
$(1, 0)$	(p, p)				
P^0, P^ε	Matrices de transitions associées aux processus de Markov non perturbé et perturbé.				
r	Règle d'imitation.				
R	Ensemble des règles imitation.				
S^N	N-uplet des stratégies. C'est l'état du jeu lorsqu'il y a N agents. En particulier nous avons : $\sigma = (s_i, s_{-i}) \in S^N$ pour tout agent i .				
S	Ensemble des n-uplets de traits modifiables possibles / ensemble des stratégies possibles.				
S_i	Chaîne méta-mimétique composée de l'ensemble des traits modifiables de l'agent i. C'est également la stratégie de l'agent i				
S_{-i}	Ensemble des stratégies des joueurs qui jouent contre le joueur i. C'est un $N-1$-uplet de stratégies $(s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_N)$. Lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté, nous notons pour un agent i quelconque $\sigma = (s_i, s_{-i}) = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_i, s_{i+1}, \dots, s_N)$.				
t	Temps				
T	Ensemble des traits modifiables				
$T_{p,A}$	Ensemble des traits perçus par un agents A (ceux qu'il peut prendre pour éléments dans ses processus de décision comme par exemple les gains, la stratégie, etc.). L'ensemble des traits perçus forme l'équivalent de ce qui est appelé croyances en économie.				
v_i	Fonction de valuation d'un agent i. Cette fonction permet à un agent d'assigner à ses voisins un score qui évalue leur situation.				
$v_i(s_k, s_{-k})$	Gain contrefactuel attribué par l'agent i à la stratégie $s_k \in \sigma_i$, lorsque l'état de la population est $\sigma = (s_k, s_{-k})$ (il y a dans σ les seconds voisins de i, que i ne voit pas mais qui peuvent avoir une influence sur les gains de ses voisins).				

Lettres grecques

$\alpha: (\Omega, t) \rightarrow \{0, 1\}$	Fonction déterminant la fréquence de mise à jour réflexive pour des agents de borne cognitive égale à 1. Cette fonction dit si au temps t , l'agent revoit de manière réflexive sa règle de tête (1) ou non (0) en fonction de son environnement. La révision peut être spontanée ou provoquée par une dissonance cognitive.
ε	Niveau de bruit dans le système. ε_a : niveau de bruit sur les actions, ε_r : niveau de bruit sur les règles.
Γ_i	Voisinage de l'agent i, c'est-à-dire l'ensemble des agents que i peut observer d'une manière ou d'une autre. La fonction Γ détermine le réseau social.
γ	Taux initial de coopération dans les simulations.
Λ	Algorithme de sélection : détermine la manière dont un agent choisit ses modèles à partir d'une fonction de valuation donnée. Cet algorithme représente le processus de décision rationnelle dans sa forme standard.
$K(S)$	Ensemble des catégories de traits modifiables. Par exemple, s'il y a deux catégories de traits modifiables qui sont les métarègles et les comportements, alors $K(S)$ sera l'ensemble à deux éléments {'meta-règle', 'comportement'}.
Φ	État donné un ensemble d'états, Φ est l'ensemble des dynamiques possibles sur ces états.
M	Algorithme de modification d'un trait modifiable (détermine la manière dont un agent change son trait modifiable en fonction
μ_0, μ_ε	Distributions stationnaires associées aux matrices P^0 et P^ε
Σ	Système dynamique
σ	n-uplet des stratégies (ou des chaînes méta-mimétiques) qui définissent les agents dans un jeu méta-mimétique. $\sigma = (S_1, \dots, S_N)$
σ_i	Ensemble des stratégies que peut observer l'agent i dans son voisinage. $\sigma_i = \{S_k, k \in \Gamma_i\}$
σ_{-i}	Ensemble des stratégies des voisins de l'agent i. $\sigma_{-i} = (S_j, \sigma_{-j})$
τ_i	n-uplet des traits de l'agent i. Par exemple $\tau = (b, r, g)$. Trait : - <i>modifiable</i> : le comportement b , la meta-règle r , etc. ; ce sont des éléments de ce qui est appelé stratégie en théorie des jeux. Parmi les traits modifiables figurent les opportunités d'action. - <i>Autres traits</i> : le gain g , l'âge, etc.
τ_{-i}	Ensemble des traits des voisins de i, $\tau_{-i} = \{\tau_k, k \in \Gamma_i\}$.
$\theta: (\Omega, t) \rightarrow \{0, 1\}$	Fonction déterminant la fréquence de mise à jour du trait modifiable contrôlé par une règle métamimétique. Cette fonction dit si au temps t , l'agent revoit le trait modifiable contrôlé par la règle considéré en fonction de son environnement. La révision peut être spontanée ou provoquée par une dissonance cognitive. Si par exemple règle considérée détermine le choix d'une bonne boulangerie, il est possible de manière spontanée de vérifier que c'est effectivement la meilleure boulangerie du quartier, en la comparant à nouveau avec les boulangeries voisines et en discutant avec ses voisins. Il est également possible que la dernière fois le pain était si mauvais que vous cherchez s'il n'y a pas une possibilité d'en obtenir du meilleur.

Relations etc.

$ s $	Nombre de niveaux dans la stratégie définie par s. Par exemple, $s=(b,r)$ alors $ s =2$
$ I_i $	Nombre d'agents dans le voisinage I_i de l'agent i
$S \prec_{V_i} S'$	La chaîne méta-mimétique (ou la stratégie) s' est meilleure que s du point de vue de i. Dans le voisinage I_i de l'agent i , le maximum des scores des agents définis par la chaîne s est inférieur au maximum des scores des agents définis par la chaîne s' .
$G_i(s)$	Gains de i associés à la stratégie s
\in	Symbole d'appartenance. $x \in A$ signifie que x est un élément de l'ensemble A . x appartient à A .
\subset	Symbole de l'inclusion. $X \subset A$ signifie que tous les éléments de X sont aussi des éléments de A .
\mathbb{N}	Ensemble des entiers naturels , c'est-à-dire 1,2,3 ... etc.
\mathfrak{S}_A	Groupe des permutations d'un ensemble de A . C'est l'ensemble des manières dont on peut échanger entre eux les éléments de A .
$\wp(S)$	Espace des distributions de probabilité sur un ensemble S
\mathbb{R}	Ensemble des nombres réels

Métadynamiques en Cognition Sociale

Quels sont les principes fondateurs de l'auto-organisation des sociétés humaines ? Produits d'une évolution culturelle rapide, qui a pris le pas sur l'évolution biologique, celles-ci réclament une approche par des formalismes radicalement différents de ceux utilisés généralement dans l'étude des autres sociétés animales.

Concrètement, la modélisation des rapports entre individus et collectif considère le plus souvent des agents qui peuvent être représentés sous la forme d'une hiérarchie de règles, chacune se plaçant en position méta par rapport aux règles du niveau inférieur. Celles-ci peuvent s'interpréter, selon les niveaux, comme des règles de comportement, des règles de décision, des règles de transmission culturelle ou génétique.

L'émergence de régularités au niveau collectif peut alors s'interpréter comme la sélection d'une distribution particulière sur l'ensemble des règles et métarègles définissant les agents. Dès lors, le problème de l'auto-organisation dans les systèmes économiques et sociaux se reformule autour de la question suivante : « *Peut-on endogénéiser les distributions des métarègles de comportement de manière à ce qu'elles soient le produit des dynamiques collectives qu'elles définissent ?* ».

Nous montrons dans cette thèse que la prise en compte, dans les modèles formels, de la spécificité de l'imitation humaine permet de répondre positivement à cette question, un point essentiel étant qu'une règle d'imitation peut être sa propre métarègle. Nous proposons ainsi un cadre formel pour l'étude de sociétés d'agents mimétiques auto-organisées, les *jeux métamimétiques* ; le concept d'équilibre correspondant est alors *l'état contrefactuellement stable* : aucun agent ne peut s'imaginer mieux qu'il n'est en se mettant contrefactuellement à la place de l'un de ses voisins. Nous étudions ensuite les propriétés de ces jeux en prenant comme champs d'application le problème de l'émergence de la coopération dans un dilemme de prisonnier spatialisé. Nous montrons au passage, que cette approche permet d'échapper au dilemme.

Plus généralement, nous nous plaçons dans le cadre de la *théorie des jeux stochastiques* et nous explicitons le rôle structurant des perturbations dans ce type de système dynamique, les structures spatio-temporelles émergentes étant le produit du couplage entre la dynamique endogène des systèmes métamimétiques et la structure interne des perturbations. En rupture avec l'approche traditionnelle, ceci nous amène à interpréter l'hétérogénéité auto-organisée des systèmes sociaux humains comme une différenciation par un processus de co-évolution d'une multiplicité de critères possibles, plutôt que par un processus d'optimisation global d'un critère unique.

Mots clefs :

Systèmes complexes, méta-dynamiques, réseaux sociaux, systèmes perturbés, **auto-organisation**, autonomie, clôture opérationnelle, endogénéisation, émergence, **cognition sociale**, cognition distribuée, spécificités de la cognition humaine, imitation, réflexivité, méta-cognition, **individualisme méthodologique complexe**, théorie des jeux stochastiques, rationalité limitée, équilibre contrefactuel, hiérarchie de règles, dilemme du prisonnier, **co-évolution culturelle**.

Metadynamics in Social Cognition

What are the principles behind the self-organization of human societies? Studying the self-organization in human societies calls for models that are fundamentally different from those models used in studying other animal societies because cultural evolution occurs faster than biological evolution and is in fact a driving force of biological evolution.

Modelers in the social sciences generally represent agents as a hierarchy of rules, where rules at each level evolve under the dynamics defined by their meta-rules. Depending on the level, these rules can be interpreted as behavioural rules, decision rules, rules for cultural or genetic transmission.

The emergence of patterns at the collective level can, thus, be understood as the selection of a particular distribution on the set of possible rules and meta-rules. The question of self-organization within socio-economic systems can, therefore, be reduced to the following question: "Is it possible to endogenise the distribution of meta-rules of behavior such that this distribution becomes the outcome of the dynamics it defines?"

I try to show that, by taking into account in formal models the specificity of human mimetism, it is possible to answer this question positively. One of the crucial points is that a rule for imitation can be its own metarule. What I propose is, thus, a formal framework for the study of self-organized societies of mimetic agents: metamimetic games, with a corresponding equilibrium concept of counterfactually stable state. In a counterfactually stable state no agent can imagine itself better than it already is when it counterfactually imagine itself in the place of one of its neighbors. I study the properties wof these games, with an application to the problem of the emergence of cooperation in a spatial prisoner's dilemma. I also show that this approach enables the agents to escape the dilemma.

More generally, I reason within the framework of stochastic game theory and clarify the structuring role of the perturbations that take place in these dynamical systems, and the emergent space-time structures resulting from the coupling between the endogenous metamimetic dynamics and the internal structure of perturbations. Departing from the traditional approach, this leads us to interpret the heterogeneity in self-organized human social systems in terms of a differentiation resulting from a co-evolutionary process with a multiplicity of criteria, rather than in terms of a global optimisation process based on a single criterion.

Key words :

Complex systems, metadynamics, social networks, noisy systems, **self-organization**, autonomy, operational closure, endogenisation, emergence, **social cognition**, distributed cognition, specificity of human cognition, imitation, reflexivity, metacognition, **complex methodological individualism**, stochastic game theory, bounded rationality, counterfactual equilibrium, hierarchy of rules, prisoner's dilemma, **cultural co-evolution**.