



HAL
open science

NOBEL, LE JEU DE LA DECOUVERTE SCIENTIFIQUE

David Chavalarias, Sylvain Charron, Vincent de Gardelle, Paul Bourguine

► **To cite this version:**

David Chavalarias, Sylvain Charron, Vincent de Gardelle, Paul Bourguine. NOBEL, LE JEU DE LA DECOUVERTE SCIENTIFIQUE : Une Approche Analytique, Expérimentale et Computationnelle. 2005. halshs-00005009

HAL Id: halshs-00005009

<https://shs.hal.science/halshs-00005009>

Preprint submitted on 16 Oct 2005

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.

NOBEL, LE JEU DE LA DECOUVERTE SCIENTIFIQUE

UNE APPROCHE ANALYTIQUE, EXPERIMENTALE ET COMPUTATIONNELLE

Chavalarias D.¹, Charron S., Roger de Gardelle V. & Bourguine P.

Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée (CREA), Ecole Polytechnique, 1, rue Descartes 75005, Paris, France
David.Chavalarias@polytechnique.edu, Sylvain.Charron@shs.polytechnique.fr,
vincent.Gardelle@shs.polytechnique.fr; bourguine@poly.polytechnique.fr

RESUME : *Popper a rompu avec une tradition épistémologique ancienne en introduisant une dissymétrie entre vérifiabilité et réfutation. Cette conception a d'importantes répercussions sur la manière d'envisager la croissance des connaissances scientifiques et l'activité du chercheur. La vérité, qui avait pu être considérée comme un but pour la recherche scientifique, est placée hors d'atteinte. Sans indicateur évident pour marquer le terme de ses recherches, le chercheur doit alors faire, en fonction de ses motivations, un compromis entre l'exploration des théories possibles et des manières de les tester, et l'exploitation de théories qui auront été suffisamment corroborées. Si les thèses épistémologiques de Popper sont pertinentes, ce compromis exploration/exploitation au niveau du chercheur a des conséquences notables sur le développement des connaissances scientifiques et notamment, sur la fiabilité des théories acceptées. Ce sont ces conséquences que nous nous proposons d'étudier par une approche analytique, expérimentale et computationnelle, dont nous présentons ici les grandes lignes et les premiers résultats. Au delà de préoccupations purement épistémologiques, cette étude cherche à proposer un schéma générique pour l'approche d'un vaste ensemble de phénomènes d'élaboration collective et distribuée de connaissances ou d'artefacts.*

MOTS-CLES : *découverte collective, développement de la connaissance, compromis exploration/exploitation, épistémologie popperienne, knowledge management distribué.*

1 INTRODUCTION

« Nous ne savons pas, nous ne pouvons que conjecturer ». Popper, 1934.

Que peut-on dire des facteurs qui influencent le développement de nos connaissances scientifiques ? Quelles sont les dynamiques sous-jacentes à l'élaboration collective d'un corpus de théories scientifiques ? Qu'elle est la part du jeu social dans ces dynamiques ? Ces questions sont fondamentales lorsqu'il s'agit de coordonner des activités de recherche ou de choisir des heuristiques concernant sa propre activité de chercheur. Elles ne peuvent cependant se poser qu'une fois donnée une épistémologie, c'est-à-dire précisément des hypothèses quant à la nature de la connaissance. Nous allons montrer dans cet article que l'épistémologie de Karl Popper se prête particulièrement à ce genre de questionnement et qu'elle permet de proposer un modèle opérationnel de l'activité d'une communauté scientifique. Comme Popper le suggérait (1934) nous diront que cette démarche est susceptible de tester la consistance du choix de cette épistémologie.

Les premières théories épistémologiques, encore fortement influencées par la pensée religieuse, défendaient l'idée du caractère manifeste d'une vérité. La science et la technique moderne sont ainsi nées sous le signe d'une épistémologie optimiste dont Bacon et Descartes furent les principaux représentants. Celle-ci avait toute confiance en l'Homme et dans sa capacité de discerner le vrai et d'accéder à la connaissance, par l'observation pour Bacon, par le raisonnement pour Descartes. La plupart des systèmes épistémologiques proposés par la suite ont refusé le caractère manifeste de la vérité, que les quelques révolutions scientifiques ont manifestement discrédité (les « vérités » de la mécanique newtonienne ont par exemple été remplacées par celles de la théorie de la relativité).

dité (les « vérités » de la mécanique newtonienne ont par exemple été remplacées par celles de la théorie de la relativité).

L'épistémologie de Popper (1934, 1962) s'est distinguée de ses contemporaines principalement par deux aspects. Elle soutient d'abord que la question de l'origine des connaissances est un faux problème. Elle trouve par ailleurs une solution pour considérer comme scientifiques les démarches empiriques tout en refusant le principe de l'induction dans la justification des connaissances. Pour cela, Popper a rompu avec une tradition épistémologique ancienne en introduisant une dissymétrie entre vérifiabilité et réfutation, et en remplaçant le concept de vérité par celui de corroboration. Pour Popper, une théorie est d'autant plus proche de la vérité qu'elle a résisté longtemps à l'épreuve de tests rigoureux, qu'elle a été corroborée par l'expérience, mais il n'est donné à aucune théorie d'atteindre la vérité de manière certaine. D'autre part, une théorie ne peut pas être justifiée par les méthodes qui ont permis de l'élaborer. Cette justification ne peut que provenir des succès que rencontre cette théorie lors de sa confrontation avec des phénomènes observables.

Cette conception a d'importantes répercussions sur la manière d'envisager la croissance des connaissances scientifiques et l'activité du chercheur. La vérité, qui avait pu être considérée comme un but pour la recherche scientifique, est placée hors d'atteinte. En conséquence, le chercheur doit lui-même décider du terme de ses recherches. En fonction de ses motivations, il effectue alors un compromis entre l'exploration des théories possibles et des manières de les tester, et l'exploitation de théories qui auront été suffisamment corroborées (publications, etc.).

Si les thèses épistémologiques de Popper sont fondées, ce compromis exploration/exploitation au niveau du chercheur doit avoir des conséquences importantes sur le développement des connaissances scientifiques et notamment, sur la fiabilité du corpus des théories acceptées. Ce sont ces conséquences que nous nous proposons d'étudier.

Pour ce faire, nous allons tracer les grandes lignes d'un modèle inscrivant ce compromis exploration/exploitation au cœur d'un processus d'élaboration collective et distribuée de connaissances. Cela nous amènera à prendre en compte la construction sociale de traditions de recherche, à regarder les relations entre dynamiques individuelles et dynamiques collectives, ainsi que la manière dont on peut modéliser la dynamique de l'ensemble des connaissances scientifiques.

L'intérêt de ce modèle dépasse largement le cadre de préoccupations purement épistémologiques, puisque la modélisation de l'activité d'une communauté scientifique de servir de paradigme pour l'approche d'un vaste ensemble de phénomènes d'élaboration collective et distribuée de connaissances et d'artefacts tels que le développement collectif de logiciels (ex. Linux), le déploiement de contenus sur Internet (blogs, Wikipedia, etc.), le knowledge management ou la sélection collective d'articles de consommation sur Internet via des traces laissées par les consommateurs.

Notre démarche s'inscrit dans le cadre d'un dialogue étroit entre modèles formels et données expérimentales. Nous commençons par décrire un modèle de l'activité d'une communauté scientifique proposé par Chavalarias (1998), dont nous évoquerons les premiers résultats analytiques. Nous exposerons ensuite les protocoles expérimentaux que ce modèle a suggéré ainsi que les premières observations. Enfin, nous reviendrons sur la modélisation, mais cette fois computationnelle, afin de donner un aperçu du comportement d'un système artificiel construit sur les principes de l'épistémologie popperienne. Ces trois approches seront à confronter avec des données empiriques dans de futurs travaux.

Le modèle exposé ici est un schéma stylisé de la théorie de Popper. Comme tout modèle, il s'appuie sur des simplifications qui n'ont pas prétention à résumer l'essence de l'épistémologie popperienne, mais qui auront l'avantage de l'efficacité. Nous voulons attraper ici les premiers faits stylisés d'une formalisation de la découverte collective, qui pourra être complétée par de futurs travaux.

2 NOBEL : LE JEU DE LA DECOUVERTE COLLECTIVE

"Un savant qu'il soit théoricien ou praticien, propose des énoncés et les teste pas à pas. Dans le domaine des sciences empiriques plus particulièrement, il bâtit des hypothèses ou des systèmes théoriques et les soumet à l'épreuve de l'expérience par l'observation et l'expérimentation." Popper, 1934

Quiconque s'est impliqué dans la recherche est familier du dilemme relatif à l'opportunité d'une publication : l'article est-il suffisamment bien ficelé ? Les théories avancées sont-elles suffisamment corroborées ? Mais par rapport à quoi est évalué ce « suffisamment » ? Popper semble suggérer que l'opportunité d'une publication se fait en partie en fonction de considérations d'utilité, celles-ci prenant en compte notamment des facteurs sociaux et les intérêts individuels. Les questions qui se posent alors sont de savoir de quelle manière sont liés le développement des connaissances d'une communauté et les comportements individuels des agents ; et quel est l'influence, à travers les compromis exploration/exploitation individuels, des paramètres sociaux et environnementaux sur le développement de la connaissance.

Schématisons la vision popperienne de la production de théories. Un scientifique (ou une équipe de recherche) formule des conjectures et les teste pas à jusqu'à ce qu'elles soient réfutées ou qu'elle soit suffisamment corroborée pour mériter d'être proposées à la communauté. C'est la partie privée du processus de production de connaissances. Vient alors la partie publique. Lorsqu'une théorie est acceptée, celle-ci figure parmi l'ensemble des théories partagées par la communauté jusqu'à ce qu'elle soit réfutée (nous noterons cet ensemble CP pour connaissances partagées). En se plaçant dans le cadre de la théorie des jeux, un modèle minimal de production distribuée de connaissances découle immédiatement de ce schéma (Chavalarias 1998).

2.1 Formalisation des idées de Popper

« Les théories sont des filets destinés à capturer ce que nous appelons « le monde » ; à le rendre rationnel, à l'expliquer et le maîtriser. Nous nous efforçons de resserrer de plus en plus les mailles. » (Popper, 1934).

Considérons un ensemble de mondes possibles Θ , un ensemble Φ d'objets que nous appellerons théories, un ensemble N d'agents et un mode d'organisation de ceux-ci (équipes, réseaux, etc.). Un monde possible $\Omega \in \Theta$ est défini par l'ensemble des énoncés ω de faits singuliers décrivant ce monde (ce que Popper appelle *énoncés de base*), ceux-ci pouvant servir de prémisses à une réfutation (ex : l'eau chauffée au gaz sous 1 bar bout à 99.8°).

Les théories sont des assertions concernant le monde $\Omega \in \Theta$ dans lequel évoluent les agents. Elle synthétisent une diversité phénoménale en partageant de manière précise, « la classe de tous les énoncés de base en deux sous classes non vides: celle de tous les énoncés de base avec lesquels elle est en contradiction [...] et celle des énoncés de base avec lesquels elle n'est pas en contradiction. » (Popper, 1934). On peut donc représenter une théorie comme une fonction $\varphi : \{\omega | \omega \in \Theta\} \rightarrow \{0,1\}$. Étant donnée une théorie φ , les agents ont la possibilité au cours d'expériences en temps discret de la confronter à des énoncés de base. Le résultat d'une telle expérience est 0 ou 1 suivant que la théorie a été corroborée ou non.

L'activité des agents consiste à choisir des théories et à les tester de manière privée en vue de sa publication ou, dans le cas d'une théorie déjà publiée, en vue de la publication d'un contre exemple (réfutation). A chaque événement correspond un gain représentant son utilité associée du point de vue d'un agent : gains positifs à la publications d'une théorie (G) et à la publication d'un contre exemple (R), gain négatif lorsqu'il se fait réfuter ($-P$). Ces gains peuvent représenter des gains monétaires mais également des aspects non physiquement quantifiables tels que la réputation ou des éléments culturels. Une théorie une fois publiée devient connaissance publique et tout agent peut chercher à la réfuter. Nous verrons plus loin que ce jeu se ramène en fait à un jeu à deux paramètres. Une théorie une fois publiée devient connaissance publique et tout agent peut chercher à la réfuter. Une théorie une fois publiée devient connaissance publique et tout agent peut chercher à la réfuter.

En nous plaçant dans le cadre de la théorie des jeux et en considérant des agents cherchant à maximiser leur utilité (par exemple, les agents cherchent à obtenir le prix Nobel), nous pouvons nous attendre à voir, d'une part un ajustement des processus de recherche en fonction de l'évolution de l'environnement : combien de temps un agents passe-t-il à tester une théorie nouvelle, combien de coups se donne-t-il pour essayer de trouver un contre-exemple lors d'une réfutation, comment évoluent ses préférences pour la recherche inédite ou la réfutation (Figure 1). D'autre part, une évolution dynamique de l'environnement constitué par les théories dont la partie publique s'enrichit sous l'influence des publications et s'appauvrit sous l'influence des réfutations (Figure 2).

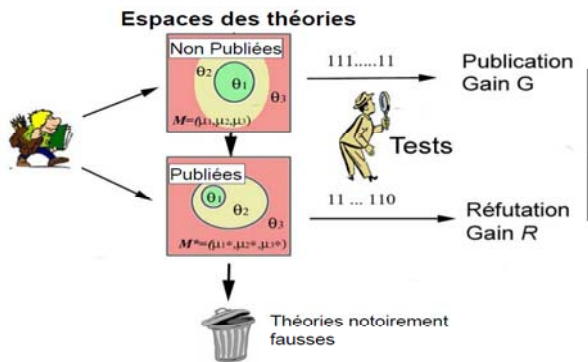


Figure 1. Schéma de l'activité d'un chercheur : au début d'un processus de recherche, un scientifique a le choix entre travailler sur une nouvelle théorie (non publiée) ou tenter de réfuter une théorie existante. Dans le premier cas, il peut publier sa théorie si celle-ci a été suffisamment corroborée par ses tests. Il obtient ainsi un gain G à la publication. Dans le deuxième cas, il peut publier un contre-exemple s'il a réussi à en trouver un dans le temps qu'il s'est imparté.

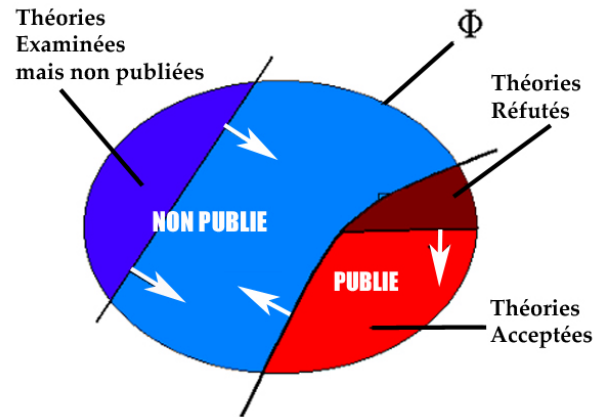


Figure 2. Evolution du statut pour l'ensemble des théories. Une partie des théories non publiées ont déjà été examinées par les agents. Une partie des théories publiées ont déjà été réfutées. Les flèches indiquent le sens de progression des différents ensembles.

2.2 Un modèle minimal

Proposons un modèle minimal fonctionnant suivant les principes décrits plus haut. Considérons un ensemble fini Φ de variables aléatoires φ_i de loi binomiale de paramètres θ_i sur l'espace de probabilité Ω . Un agent peut effectuer une expérience sur une théorie φ_i en observant la valeur de celle-ci sur un événement ω . Il observe donc I avec une probabilité θ_i et 0 sinon. φ_i sera considérée comme vraie si $\theta_i=1$. L'espace des théories se partage en trois domaines disjoints : l'ensemble des théories non publiées (NP), l'ensemble des théories publiées et acceptées constituant les connaissances publiques (CP), l'ensemble des théories réfutées. Les deux types d'activités de recherche en temps discret sont les suivantes :

- **Publication** : un agent tire au hasard une théorie dans NP et se donne λ pas de temps pour la tester. Si à la fin de cette séquence de tests, il n'a obtenu que des I , l'agent publie sa théorie. S'il a obtenu un contre-exemple, il le garde en mémoire afin de pouvoir réfuter éventuellement cette théorie si elle est publiée à l'avenir.

- **Réfutation** : un agent tire au hasard une théorie dans CP et se donne λ' pas de temps pour trouver un contre-exemple. Dès qu'il a trouvé un contre-exemple, il publie est passe à un autre processus de recherche. S'il ne trouve pas de contre exemple, il change de théorie après λ' pas de temps.

Chacun des processus peut s'interrompre prématurément si l'agent se fait devancer par un autre. À la fin d'un processus de recherche, l'agent choisit avec une probabilité ν d'entamer un nouveau processus de type publication et dans le cas contraire entame un processus de type réfutation. La stratégie d'un agent peut donc être décrite comme un triplet (λ, λ', ν) qui détermine ses temps d'arrêt dans chacun des processus de recherche ainsi que sa propension à la réfutation.

Considérons une population de N agents éductifs maximisant leur utilité espérée, sachant qu'à chaque période ils ont une probabilité α de sortir du jeu (taux d'actualisation). Il sont alors remplacés par un nouvel agent. La question est de savoir de quelle manière un agent va déterminer sa stratégie et notamment sa préférence pour la réfutation. Il devra pour cela évaluer :

- le risque de se faire devancer si ses temps d'arrêt sont trop longs (publication ou réfutation),
- le risque de se faire réfuter si ses temps d'arrêt sont trop courts (publication).

Et pour cela, il doit tenir compte :

- le sérieux des autres agents (valeurs des temps d'arrêt),
- la propension des agents à la réfutation.

Nous avons donc un jeu en environnement dynamique où la décision de chacun dépend de la décision des autres. Si nous choisissons $P=R$, il est facile de montrer que la dynamique du jeu ne dépend des paramètres de gains qu'à travers le rapport R/G . Une première approche analytique sur ce modèle (Chavalarias 1998) a permis de calculer l'espérance de gains associée à chaque type de stratégie dans l'hypothèse d'une population d'agents homogènes, puis de trouver numériquement les équilibres de Nash associés à ce jeu. Ceci nous a permis d'avancer les résultats qualitatifs suivant concernant ce modèle :

1. L'espérance de gain diminue généralement avec l'âge d'un domaine de recherche.

2. Le paramètre R/G délimite des zones bien distinctes relativement à la dynamique collective :

- a)* Pour un rapport R/G faible, l'élaboration collective d'un corpus de théories connaît deux phases. Une première phase de découverte où les agents proposent tout azimuts de nouvelles théories sans les avoir beaucoup testées et sans chercher à réfuter (λ & λ' faibles, ν proche de 1). Une deuxième phase de consolidation des connaissances où les agents vérifient plus soigneusement et cherchent de plus en plus longtemps.
- b)* Lorsque le rapport R/G augmente, nous avons une série de bifurcations, la dynamique de découverte étant une alternance de plus en plus rapide de phases de production et de phases de consolidation des connaissances.

La dynamique *a)* est plus proche de ce à quoi l'on peut s'attendre par exemple a propos du fonctionnement des médias. Les dynamiques de type *b)* sont plus proches du fonctionnement des communautés scientifiques.

3. Lorsque le rapport R/G augmente, la qualité moyenne de CP (moyenne des θ_i de CP à un instant donné) augmente mais en revanche, la communauté met plus de temps pour arriver à isoler les meilleures théories. Le

compromis exploration/exploitation au niveau individuel se projette au niveau collectif en un compromis paramétré par R/G entre vitesse de découverte et fiabilité des connaissances.

Ces premiers résultats ont soulevé un certain nombre de questions quant à la modélisation par un agent représentatif éductif aux capacités computationnelles illimitées. Étant donné le caractère manifestement limité de nos capacités cognitives (Simon 1978 ?, Aumann) et les recherches considérables qui ont été menées, notamment en économie (Bourgine & Nadal 2004, Lessourne & al.) en direction d'une modélisation plus réaliste des processus de décision, il nous a semblé indispensable de mesurer l'écart d'une telle modélisation à une situation réelle. Nous avons pour cela mis en place un protocole expérimental permettant d'étudier le comportement de sujets placés dans une situation de découverte collective. Nous le présentons dans la section suivante accompagné des premières observations.

3 UNE APPROCHE EXPERIMENTALE : LE JEU NOBEL-ELEUSIS

Nous avons réalisé, en collaboration avec l'équipe de Jean Sallantin du LIRMM, un protocole expérimental sous la forme d'un jeu multi-joueurs dont la conception se devait de répondre à une double exigence :

- Constituer une implémentation opérationnelle et attrayante du modèle que nous venons de proposer sur l'élaboration collective et distribuée de connaissances.
- Être le socle d'une plate-forme qui permette de tester en condition contrôlées des hypothèses portant sur les processus sociaux.

Nous présentons ici les grandes lignes de ce protocole, ainsi que les résultats d'une première expérimentation. Une description détaillée de cette étude pourra être trouvée dans Charron 2004.

3.1 Description du jeu « Nobel-Eleusis ».

3.1.1 Le principe du jeu

Le jeu Nobel-Eleusis est un jeu Nobel pour lequel les théories sont représentées par un jeu Eleusis.

Le jeu d'Eleusis consiste à découvrir une règle cachée régissant une succession de cartes à jouer (ex : deux cartes successives ne peuvent pas être de la même couleur ; une carte paire suit une carte impaire, etc.). Une règle cachée est proposée à un joueur qui formule des hypothèses la concernant. Il peut ensuite tester de manière répétée ces hypothèses en proposant un couple (carte, carte successeur). Dans notre protocole, ce couple est soumis à un système informatique implémentant la règle qui évalue la validité de la proposition et en informe le joueur.

Les joueurs sont donc placés individuellement devant un ensemble de jeux d'Eleusis relativement auxquels ils peuvent effectuer des tests de manière privée. Une publi-

cation est l'énoncé par un joueur de la règle sensée décrire exactement l'une des règles cachées. Cette règle devient alors connaissance partagée par l'ensemble des joueurs et peut faire l'objet d'une réfutation. Une réfutation de cette règle sera alors la donnée d'un couple de carte dont la validité contredit la prévision de la règle.

Comme au 2.2, un score est associé aux événements de publication (G pour le joueur qui publie) et de réfutation ($-R$ pour le joueur réfuté ; R pour le joueur qui réfute). À la fin du jeu, le joueur ayant obtenu le score le plus élevé remporte une gratification financière (« prix Nobel »), la fin étant définie par une stabilité de l'activité de publication/réfutation dans le temps.

3.1.2 Exemple

Pour un jeu d'Eleusis dont la règle est « une carte chiffre est suivie d'une carte figure et une carte figure d'une carte chiffre », un joueur A peut tester la règle « une carte noire est suivie d'une carte rouge et une carte rouge d'une carte noire ». Si le joueur teste les couples valides (valet de cœur, trois de carreau), (dame de pique, dix de cœur) et (as de cœur, roi de trèfle), il peut choisir de publier sa règle (gain de G). Mais pourra se faire réfuter par un joueur B ayant testé le couple (as de cœur, roi de cœur), valide selon la règle du jeu d'Eleusis contrairement à ce que prévoit la règle publiée. A perd alors R et B gagne R .

3.1.3 Interface de jeu

L'interface de jeu permet aux joueurs de choisir les jeux d'Eleusis sur lesquels ils vont travailler, d'effectuer leurs tests de façon privée et d'en conserver un historique ainsi que d'avoir accès aux informations publiques (Figure 3). L'interface peut être adaptée aux besoins de l'expérimentation au même titre que les paramètres du jeu.

Nous avons choisi rendre publique l'information sur le déroulement du jeu (état des théories : non publiées, publiées ou réfutées), l'information sur les publications et réfutations accessibles (énoncés et contre-exemples) et une information sur les performances des autres joueurs (score moyen et score du meilleur joueur).

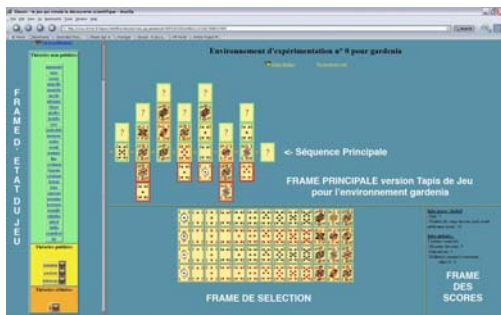


Figure 3. Capture d'écran de l'interface. A gauche, la liste des jeux d'Eleusis avec leur statut. A droite, la plate-forme de test d'une théorie particulière relativement au choix d'un jeu d'Eleusis. (réalisation : Christopher Dartnel, LIRMM)

3.2 Relations entre le modèle théorique et le jeu

Soulignons que le jeu Nobel-Eleusis, à un codage près, correspond exactement à ce qui est décrit en 2.2. En effet, une règle de succession peut se définir comme une application du produit cartésien de l'ensemble E des cartes dans $\{0,1\}$. Un couple de carte (p,s) est alors un énoncé de base et un test associe une valeur de $\{0,1\}$ à ce couple.

Dans un jeu Nobel-Eleusis, l'ensemble Θ est alors l'ensemble des règles de succession de cartes possibles, un monde possible $\Omega \in \Theta$ est constitué d'un nombre fixé de jeux d'Eleusis (désignés par des noms de fleurs au cours de l'expérience), une théorie φ est la formulation explicite d'une règle par un joueur relativement à un jeu d'Eleusis ; et un fait singulier ω est un couple (carte, carte successeur) qui peut être accepté ou rejeté relativement à une règle cachée (corroboration ou un contre-exemple).

Le modèle théorique du jeu Nobel peut ainsi être habillé en fonction des besoins de l'étude. Dans le cas de notre expérimentation, il fallait que les joueurs s'impliquent réellement dans l'activité de recherche, publication et réfutation. Le jeu de Eleusis, de par sa représentation par des cartes à jouer, constitue une interface attrayante que les joueurs peuvent facilement s'approprier.

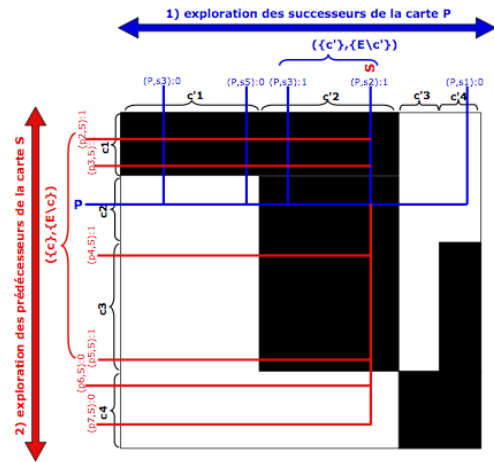


Illustration de l'heuristique de découverte d'une loi de transition

Figure 4. Représentation matricielle d'une règle et des tests. Une règle se ramène à une fonction $\varphi : E \times E \rightarrow \{0,1\}$

3.3 Résultats obtenus par l'expérimentation

3.3.1 L'expérimentation

Dix joueurs volontaires âgés de 22 à 34 ans, étudiants et doctorants en majorité participèrent à l'expérimentation. Le jeu comprenait un ensemble de 34 règles de difficulté variables calibré pour durer 2 heures. La valeur du paramètre R/G a été fixée à 2 à partir des résultats théoriques obtenus par David Chavalarias et d'une expérimentation pilote.

Pour cette première expérience, nous avons pu acquérir les données durant 66 minutes et le jeu n'a pas atteint son horizon.

3.3.2 Stratégies des joueurs

Le premier résultat apporté par l'expérimentation qui rompt avec ce que pouvaient nous apprendre des agents éductifs est la coexistence au cours du jeu de différentes stratégies qui se traduisent par une hétérogénéité des propensions à la réfutation et des temps d'arrêts (Figure 5). S'il peut s'agir d'un effet du manque d'expertise des joueurs sur ce jeu, la typologie de ces stratégies nous conduit à interpréter ce résultat comme la présence d'une hétérogénéité sur les stratégies.

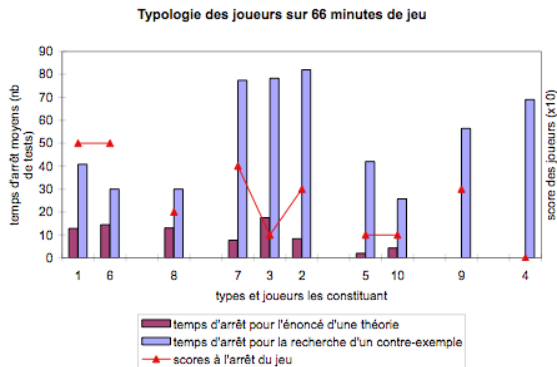


Figure 5. Typologie des joueurs sur 66 minutes de jeu. Nous pouvons classer les joueurs en quatre groupes distincts en fonction des temps d'arrêt à la publication et à la réfutation. Les deux individus 9 et 4 (à droite) travaillent exclusivement à la publication.

3.3.3 Évolution des connaissances

Nous avons étudié le processus de découverte en mesurant de manière agrégée sur la communauté l'évolution au cours du temps de la somme des distances de Hamming entre règles publiées et règles cachées associées. Cette distance a été calculée en utilisant la représentation matricielle évoquée en 3.2.

Nous pouvons caractériser la croissance au cours du temps des connaissances accumulées au niveau de la communauté des joueurs. On observe qu'il y a bien un processus social de découverte et nous pouvons avancer comme conjecture la convergence de ce processus dans le cas du jeu.

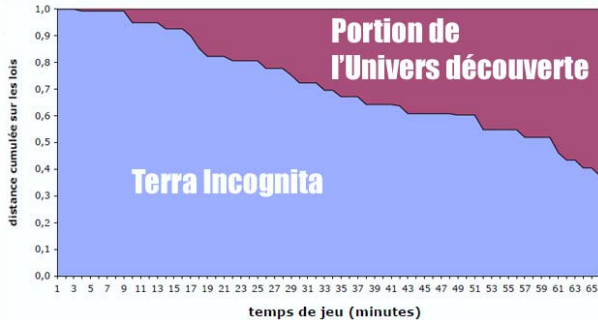


Figure 6. Évolution de la qualité des publications (somme des distances de Hamming entre règles publiées et règles cachées associées).

Puisque le jeu n'atteint pas son horizon, nous n'observons pas l'établissement d'un consensus social sur la qualité des recherches effectuées qui correspondrait à la distance cumulée à l'horizon. Nous pouvons néanmoins mesurer cette valeur à 66 minutes, ce qui constitue une borne supérieure de cette qualité pour les paramètres choisis lors de l'expérimentation.

Nous avons aussi observé, en accord avec les premiers résultats analytiques, un début d'évolution de la qualité des publications. La distance des premières publications décroît fortement au cours des 35 premières minutes de jeu avant de se stabiliser sous les 10% de la distance maximale.

Étant donné l'augmentation au cours du temps de l'information au niveau de la communauté, nous pouvons interpréter ce résultat comme un apprentissage sur les temps d'arrêt dans un compromis exploitation/exploration ou comme l'effet d'une imitation au niveau méta des stratégies des joueurs.

Pour discriminer ces hypothèses, il est nécessaire d'une part de renouveler ce type d'expérience autour du protocole Nobel-Eleusis afin de recueillir des données significatives pour une analyse poussée, d'autre part de proposer des modèles reposant sur ces différentes hypothèses afin d'établir les détails des protocoles en fonction des résultats remarquables supposés être observables.

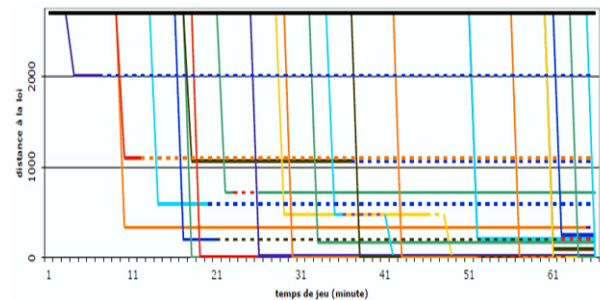


Figure 7. Evolution de la découverte des règles au cours du temps. Chaque ligne correspond à une règle, une publication est marquée par une diminution de la distance, une réfutation par le passage en pointillé de la ligne.

3.4 Apports de l'approche expérimentale

3.4.1 Un premier objectif atteint

Le protocole expérimental Nobel-Eleusis a fait ses premières preuves en montrant que des joueurs pouvaient s'investir réellement dans ce jeu, condition indispensable à la conduite d'une expérimentation, tout en réalisant un processus d'élaboration collective des connaissances.

Cela nous a permis de mettre en lumière l'existence d'une hétérogénéité en terme de stratégies pour les joueurs ainsi que des interactions entre la dynamique des stratégies des joueurs et leur influence sur une variable globale du processus social telle que la qualité des publications.

Ces résultats nous permettent de valider notre approche expérimentalement puisque le jeu Nobel-Eleusis, protocole implémentant un modèle issu de l'épistémologie poppérienne, permet d'étudier de manière effective la manière dont un ensemble de joueurs peuvent constituer une communauté engagée dans un processus de découverte collective.

3.4.2 Autres aspects du jeu Nobel-Eleusis

L'heuristique de découverte au niveau individuel d'une loi de transition dans un monde de carte s'exprime théoriquement comme une exploration dans des treillis de concepts, puis de partitions. Ce cadre conceptuel soutient l'interprétation suivant laquelle l'apport de l'interaction dans un processus social de découverte permet de s'affranchir des biais cognitifs inhérents au processus de découverte individuel. Différents individus peuvent en effet accéder chacun au cours de leur exploration à des portions différentes des treillis. La mise en commun de cette information au niveau de la communauté par des publications et des réfutations permet aux joueurs d'échanger leurs points de vue sur les objets qu'ils étudient et d'acquérir une vision plus complète des treillis.

Nous pouvons de plus décrire le jeu Nobel-Eleusis comme un système social implémentant sous la forme de réfutations la réponse aux requêtes d'équivalences posées comme des conjectures, au sens des travaux d'Angluin (2004) sur l'apprentissage supervisé actif. Cela nous conduit à considérer une communauté réalisant un processus de découverte collective comme fondée sur la distribution sur deux niveaux d'émergence des requêtes d'appartenance et d'équivalence (Charron 2004).

4 UNE APPROCHE PAR AGENTS MIMÉTIQUES

Les premiers résultats expérimentaux que nous venons de présenter confirment l'intuition bien naturelle de l'hétérogénéité des comportements en situations d'élaboration collective de connaissances. En vue d'approfondir ces résultats préliminaires par une étude plus poussée, donc plus coûteuse, et également de mieux comprendre ce type de processus, il s'avère indispensable de compléter la première approche formelle par un type de modélisation susceptible de rendre compte de cette hétérogénéité.

Nous avons donc choisi une approche alternative à la modélisation par agents éductifs (forward-looking) en considérant, comme il a été suggéré en 3.3.3, des agents mimétiques (backward-looking). L'imitation est en effet un processus central dans le mécanisme d'apprentissage social (Conte & Paolucci). Les mécanismes mimétiques sont par ailleurs connus pour leur capacité à générer de l'hétérogénéité (Axelrod 1997 ; Chavalarias 2004, 2005 ; Nowak 1992, pour ne citer que quelques études) et ont l'avantage de requérir des hypothèses moins fortes sur le plan cognitif que la modélisation par agents éductifs.

Le modèle le plus simple que nous pouvons présenter ici considère des agents jouant au jeu décrit en 2.3, placés aux nœuds d'un réseau, avec la capacité d'observer la

stratégie et les gains de leurs plus proches voisins. Étant donné un seuil $s > 0$, ces agents se mettent à imiter de manière bruitée la stratégie de leurs meilleurs voisins lorsque leur score cumulé devient inférieur à s fois le score cumulé moyen dans la communauté. s s'interprète comme un seuil de satisfaction. Nous avons également introduit un taux d'actualisation α correspondant à une atténuation des gains passés (et non des gains futurs comme dans le cas éductif), le score π_i d'un agent i à un instant t étant calculé comme la moyenne géométrique $\pi_i = \sum_{n \leq t} \alpha^{t-n} \cdot g_i^{t-n}$ des gains g_i^k de i aux périodes k précédentes.

Nous présentons ici un bref aperçu de ce que peut apporter une telle approche dans le cas où le réseau est un graphe complet (situation du 2.3). Une approche plus détaillée comportant de nombreux développements (types de réseaux, espace des théories, etc.) pourra être trouvée dans Roger de Gardelle 2005. Le modèle présenté ici a été implémenté de manière concurrente sous NetLogo¹ et sous Matlab pour une plus grande fiabilité.

4.1 Détails du modèle Nobel-mimétique

Nous avons étudié un modèle en temps discret pour lequel chaque période est composée de la succession d'une phase de test, d'une phase d'imitation et d'une phase de sortie de jeu. Comme au 2.2, les stratégies des agents sont décrites par un triplet (λ, λ', ν) qui détermine leur temps d'arrêt dans les processus de recherche et de réfutations ainsi que leur propension à la réfutation.

4.1.1 Phase de test

Durant cette phase chaque agent à l'opportunité d'effectuer un unique test sur la théorie de son choix. Cette phase a été implémentée en prenant chaque agent dans l'ordre croissant de numérotation.

Comme au 2.3, chaque agent peut être engagé dans une activité de recherche ou une activité de réfutation consistant à observer à chaque pas de temps le tirage d'une variable aléatoire de loi binomiale dont le paramètre est caractéristique de la théorie qu'il étudie. Une activité de recherche (resp. de réfutation) s'arrête si le nombre de périodes passées à travailler sur la théorie courante devient supérieur à λ (resp. λ') ou si un autre agent a publié cette théorie (resp. un contre-exemple à cette théorie), ou si l'agent lui-même est tombé sur un contre-exemple à cette théorie.

Lorsqu'un processus de recherche s'arrête, l'agent publie sa théorie s'il n'a pas de contre-exemple à sa théorie. Lorsqu'un processus de réfutations s'arrête sur un contre-exemple, l'agent le publie si la théorie n'a pas déjà été réfutée par un autre. Lorsque plusieurs agents publient au cours de la même période la même théorie (ou un contre-exemple à la même théorie) ils se partagent les gains (G ou R). Un agent qui a trouvé un contre-exemple au cours d'un processus de recherche le garde en mé-

¹ Le code source est disponible sur <http://chavalarias.free.fr>

moire afin de pouvoir éventuellement l'utiliser pour une réfutation.

Après l'arrêt d'un processus de recherche, dans la même période, un agent i de stratégie $(\lambda_i, \lambda'_i, v_i)$ tire au hasard une nouvelle théorie de NP avec une probabilité v_i (ou au hasard une théorie de CP avec la probabilité $(1-v_i)$) qu'il commencera à tester à la prochaine période.

À la fin d'une phase de test, le score de chaque agent i à la période t est réévalué en fonction des gains qu'il a effectués : $\pi_i^t = g_i^t + \alpha \pi_i^{t-1}$.

4.1.2 Phases d'imitation

Au cours de cette phase, chaque agent à l'opportunité de modifier sa stratégie par imitation. A chaque période t , chaque agent i évalue l'opportunité d'une imitation selon que son score π_i^t est inférieur ou non à s fois le score moyen dans la communauté. La valeur de ce paramètre permet de régler une certaine marge de liberté pour l'imitation, un certain niveau de compétition dans la communauté. Par exemple, si ce seuil est nul alors les agents sont toujours satisfaits de leur score et ne vont jamais chercher à imiter quelqu'un d'autre qui réussirait mieux. La valeur de 1 pour ce paramètre va correspondre à une comparaison directe avec la moyenne : les agents dont le score est inférieur au score moyen vont chercher à imiter, mais pas les autres. Ce paramètre va donc influencer la fréquence de l'imitation, et donc la dynamique sur les stratégies.

Lorsque $\pi_i^t < s \cdot \sum_k \pi_k^t / N$, l'agent i choisit parmi l'ensemble des autres agents (puisque ici le graphe est complet), un agent de score maximal et copie de manière bruitée sa stratégie. Le bruit permet de traduire le fait que l'imitation d'une attitude engendre généralement des erreurs au niveau de la perception, de l'évaluation, et de la reproduction : l'être humain, dont les capacités cognitives sont limitées, ne peut pas imiter parfaitement. Il est ici modélisé par une perturbation aléatoire de loi gaussienne qui s'ajoute aux valeurs à imiter.

La présence de ce bruit est par ailleurs très importante puisqu'elle introduit la possibilité d'explorer de nouvelles valeurs pour les stratégies des agents, à la manière d'un taux de mutation dans un processus évolutionniste. Le bruit lorsque son niveau n'est pas trop élevés est structurant pour le processus de découverte.

4.1.3. Phases de sortie de jeu

Au cours de cette phase, chaque agent a une probabilité $1/\tau$ de sortir du jeu. Il est alors remplacé par un nouvel agent dont la mémoire est vierge.

4.2 Un exemple de simulation de Nobel-mimétique

Regardons sur une simulation particulière comment ces spécifications individuelles font émerger un comportement de découverte au niveau collectif. Nous prendrons les paramètres suivants 40 chercheurs, un réseau totalement connecté, 5000 théories à étudier, dont 90% ayant un θ égal à 0.9 (elle résistent à 90% des tests), les 10 %

restants étant des théories vraies ($\theta=1$). Le rapport R/G est quant à lui égal à 2 et $s=0.9$. Les conditions initiales pour les triplet (λ, λ', v) pour ces simulations sont tirées suivants une loi aléatoire de distribution uniforme sur $[0,40] \times [0,40] \times [0,1]$.

4.2.1. Deux régimes dynamiques pour un processus de découverte

Intéresserons-nous d'abord à l'évolution du statut des différentes théories (non-publié, publié, réfuté). Nous regarderons ensuite l'évolution des stratégies des agents qui réalisent ce processus. La Figure 8 représente à gauche l'évolution du nombre de théories dans chaque état et à droite l'évolution de la qualité des théories publiées.

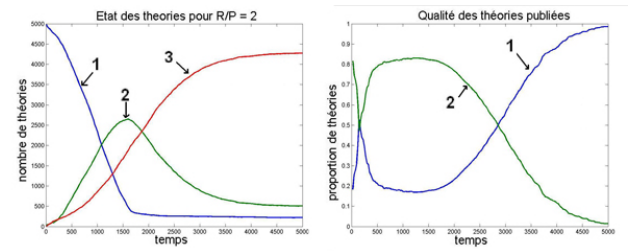


Figure 8. Évolution de l'état des théories (à gauche) et évolution de la qualité des théories publiées (à droite). $R/G=2$

Nous observons sur ces figures deux phases distinctes : $temps < 1500$, *phase de publication intensive*. les agents publient massivement : le nombre de théories publiées augmente (à gauche, courbe 2 : nombre de théories publiées). Durant cette période des mauvaises théories vont également être publiées (à droite, courbe 2 : proportion de mauvaises théories dans le corpus publié), ce qui diminue la qualité du corpus de théories publiées. $temps > 1500$: *phase de consolidation* Dans un second temps, le rythme de publication ralentit nettement (à gauche, courbe 1 : nombre de théories non publiées), alors que les mauvaises théories publiées sont réfutées peu à peu, ce qui augmente la qualité du corpus de théories publiées (à droite, courbe 1 : proportion de bonnes théories dans le corpus publié).

Regardons maintenant comment les agents qui réalisent ce processus se comportent au cours du temps, c'est-à-dire quelles sont leurs stratégies : temps d'arrêt de recherche, de réfutation, et propension à la recherche.

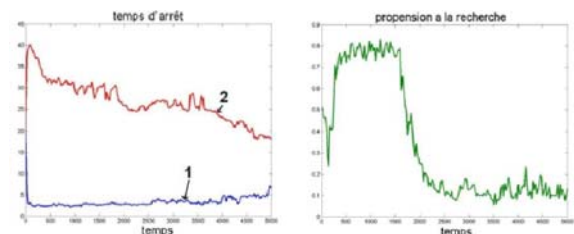


Figure 9. Évolution des stratégies au cours du temps. À gauche la moyenne des temps d'arrêt λ pour la recherche (1) et λ' pour la réfutation (2). A droite, l'évolution de la moyenne des propensions v à la recherche.

Dans cette simulation, on observe (Figure 9) que la moyenne sur les temps d'arrêt de recherche est quasi-constante alors que celle sur les temps d'arrêt de réfutation décroît constamment. La moyenne de la propension à la recherche est corrélée avec le découpage de la simulation en deux phases précédemment présentée.

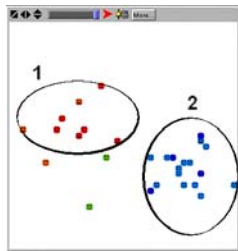
Ainsi, au début du processus les agents sont majoritairement portés sur la recherche de nouvelles théories, qu'ils testent avec des temps d'arrêt assez courts, ce qui ne leur permet pas de discriminer bonnes et mauvaises théories. Les temps d'arrêt de réfutation présents ne sont alors pas pertinents car ils ne participent pas au processus. Ensuite, alors que beaucoup de théories ont été publiées, les agents se tournent vers la réfutation, avec des temps d'arrêt de réfutation qui s'adaptent alors (ici à la baisse).

Il faut souligner que si la place nous permet pas d'exposer de manière détaillée ces résultats, nous avons pu montrer statistiquement que la présence de ces deux phases pour ces valeurs de paramètres est un résultat robuste (Roger de Gardelle 2005)

4.2.2 L'hétérogénéité des comportements

La question de l'hétérogénéité dans la population est une des questions soulevées par l'expérimentation (3.3.2). En effet, l'approche analytique par un agent représentatif ne permet pas d'obtenir une population hétérogène, alors que l'expérience de jeu multi-joueurs Nobel-Eleusis a clairement mis en évidence la coexistence de différents groupes de joueurs pratiquant des stratégies bien distinctes. Nous pouvons attendre à ce que l'imitation bruitée telle que nous l'avons envisagée permettent d'obtenir une certaine hétérogénéité. Nous pouvons regarder la distribution des stratégies dans la communauté

Nous avons représenté ci-contre une photographie, à un instant donné du déroulement du jeu, d'une communauté dans l'espace des stratégies. La simulation a été faite sur des paramètres proches des précédents (il y a juste plus de joueurs). Chaque point représente un chercheur i , dont l'abscisse et l'ordonnée sont données par (λ_i, λ_i') . La couleur correspond à la propension à la recherche (rouge pour les agents réfuteurs, groupe 1, bleu pour les agents chercheurs, groupe 2).



Nous voyons clairement apparaître sur cette figure deux groupes d'agents distincts, qui coexistent à un moment donné. La communauté est donc hétérogène, et on observe que les sous-groupes d'agents se stabilisent et évoluent au cours du jeu. Les agents sont tous connectés entre eux, aussi à chaque instant il n'y a qu'un seul et même meilleur voisin à imiter pour tous. Mais si ces deux stratégies ont dans cet environnement des performances proches, ce meilleur agent est tantôt un chercheur, tantôt un réfuteur. De plus, le fait que toute une partie des agents puisse être satisfaits (s'ils ont un score supérieur à s fois la moyenne des scores) permet d'éviter

l'ensemble de la communauté se rabatte d'un coup sur une même stratégie.

Il serait intéressant de tenter de prédire par des méthodes analytiques ou des simulations systématiques sur des domaines de paramètres, l'apparition de ces sous-groupes, et leurs importances relatives dans la communauté. On sait que dans le cas d'environnements stationnaires, les ESS sont des équilibres de Nash et que ce type de comportements mimétiques converge vers les mêmes équilibres que s'il s'agissait d'agents éductifs (Hofbauer & Sigmund 1988 ; Weibull 1995). Si ces théorèmes ne s'appliquent pas ici à cause de la non stationnarité de l'environnement, on peut penser que l'hétérogénéité des stratégies observée ici est néanmoins analogue à l'implémentation d'une stratégie mixte au niveau collectif.

Au sein de la communauté, l'exploration de l'espace des stratégies et l'imitation permettent de trouver un compromis global entre exploration et exploitation à la fois de manière instantanée par la coexistence de plusieurs stratégies et au cours du temps par la présence de deux régimes dynamiques distincts. Nous voyons sur cette simulation que ce comportement des agents établit un véritable processus de découverte collective puisque les agents arrivent collectivement à ne retenir que la bonne théorie. Le modèle computationnel que nous venons de présenter est donc susceptible de proposer des schémas pour penser que l'élaboration collective de connaissances.

4.3 L'effet du coût relatif de la réfutation

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'approche computationnelle a également pour but d'être en mesure de proposer des expériences discriminantes pour les protocoles expérimentaux en mettant en évidence des propriétés qualitatives remarquables des systèmes étudiés. Déterminant cet article en proposant exemple. Comme nous l'avons déjà évoqué lors de la présentation des résultats de l'étude analytique, nous pouvons attendre à ce que le paramètre R/G influe largement sur la dynamique de découverte. Une étude extensive de l'influence de ce paramètre a confirmé cette intuition. La simulation que nous présentons ici a été faite sur les mêmes paramètres que celle du paragraphe précédent, à la différence que la valeur de R/G est égal à 8.

La Figure 10 montre à gauche l'évolution des états des théories, et à droite l'évolution de la qualité du corpus publié. Comme au 4.2.1. nous pouvons observer deux types de régimes dans cette simulation en remarquant les alternances dans le graphe de droite de phases de publication de théories (quand la courbe 1 qui correspond à la proportion de bonnes théories dans le corpus publié chute) et de vérification des connaissances publiées (quand la courbe 1 remonte). Cependant, ces deux types de régimes s'enchaînent cette fois-ci en alternances. En regardant plus précisément l'influence R/G , on peut constater que cette alternance de phases augmente R/G , ce qui rejoint les prédictions de l'approche analytique.

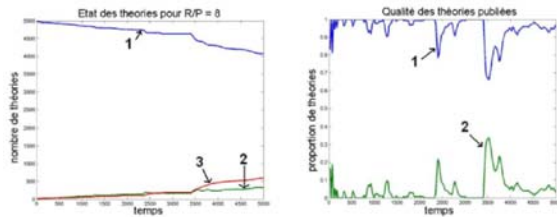


Figure 10. Évolution de l'état des théories (à gauche) et évolution de la qualité des théories publiées (à droite). $R/G=8$

Par ailleurs, lorsqu'on regarde le corpus des théories publiées, on s'aperçoit qu'elles sont moins nombreuses mais plus contrôlées et de meilleure qualité tout au long du processus. On observe ici une gestion globale du compromis vitesse de production/qualité des théories publiées très différente de celle observée lorsque le coût relatif de la réfutation est moins important. L'observation de l'évolution des états des théories laisse même à penser que les phases de publication et de réfutation se chevauchent dans certains cas.

Nous pouvons dès lors nous pencher sur l'observation des stratégies des agents dans cette simulation (Figure 11). Nous pouvons alors remarquer une alternance de phases portées majoritairement soit sur la publication soit sur la réfutation.

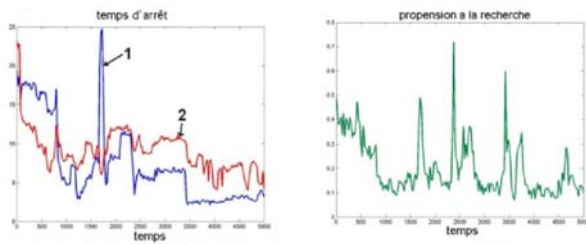


Figure 11. Évolution des stratégies au cours du temps. À gauche la moyenne des temps d'arrêt λ pour la recherche (1) et λ' pour la réfutation (2). À droite, l'évolution de la moyenne des propensions v à la recherche.

De plus, la valeur des temps d'arrêt de recherche est globalement plus élevée, et celle des temps d'arrêt de réfutation est plus faible, ceux-ci rentrant tout de suite dans le jeu de la sélection. La propension à la recherche est globalement moins élevée dans cette simulation, ce qui correspond à un rythme de publication moins important.

Nous pouvons donc observer un net effet du paramètre R/G qui peut être associé à un « niveau de sérieux » dans la communauté. Il serait intéressant de pouvoir retrouver, voire de chercher à quantifier cet effet dans une approche expérimentale à venir, ce qui permettrait de corroborer ou de réfuter ce modèle, tout en accélérant la recherche de propriétés intéressantes dans un cadre expérimental pour lequel le coût des expériences est non négligeables.

Parallèlement, remarquons que nous avons retrouvé qualitativement les résultats analytiques de David Chavalarias, qui mettent en évidence l'émergence des phases

distinctes décrites ci-dessus. Cette pratique de ces allers-retours entre approche analytique, approche expérimentale, et approche computationnelle constitue un élément essentiel de notre stratégie de recherche.

4.4 Perspectives

Le modèle multi-agents Nobel-mimétique a permis de reproduire des résultats analytiques et expérimentaux intéressants, tels que l'effet du paramètre R/G sur la dynamique de découverte, et l'apparition de sous-groupes d'agents de stratégies distinctes. De la même manière, un grand nombre de questions pourront être adressées dans le cadre de cette étude computationnelle comme par exemple la question de l'influence de la topologie du réseau, de la taille de la communauté, de la difficulté du champ de théories, etc. Ces questions seront autant de ponts pour se retourner vers une approche expérimentale ou analytique en vue de consolider la démarche globale.

5 CONCLUSIONS

Par le jeu Nobel, nous avons présenté un modèle inspiré de l'épistémologie popperienne qui se veut être un schéma générique pour penser les situations d'élaboration collective de connaissances. Nous avons montré comment il pouvait se décliner sous une approche analytique, expérimentale et computationnelle, en essayant de mettre en évidence la manière dont ces trois approches peuvent s'enrichir mutuellement. Nous avons ainsi privilégié un point de vue global sur ces approches, d'autres articles à venir ayant pour vocation de fournir des études plus détaillées sur chacun de ces aspects.

Alors que beaucoup de travaux se sont intéressés au problème de la diffusion des connaissances, nous avons souhaité participer avec cette proposition à l'étude des processus d'élaboration collective de connaissances sous l'aspect de la production, dans le cadre d'un dialogue entre sciences expérimentales et sciences formalisées. Nous avons ainsi exposé un protocole expérimental pour l'étude de ce type de processus et évoqué des prédictions qualitatives des modèles formels susceptibles de guider les futures expériences.

Pour des raisons de clarté, nous avons souhaité proposer les modèles les plus simples possibles. De nombreuses variations sont néanmoins possibles et nous espérons par cet aspect avoir provoqué l'imagination de notre lecteur.

REFERENCES

- Axelrod R. (1997). *The Dissemination of Culture: A Model with Local Convergence and Global Polarization*, *Journal of Conflict Resolution*, 41, 203-26.
- Angluin D. (2004) Queries revisited. *Theoretical Computer Science*, (313) :175–194, 2004.
- Charron S. (2004). *Un protocole pour l'étude d'un processus social de découverte : le jeu Nobel-Eleusis*, mémoire de DEA, dir. Bourguine P. & Sallantin J., Sciences Cognitives, Ecole Polytechnique, France. (en ligne : <http://chavalarias.free.fr>)
- Chavalarias, D. (1998). *La thèse de Popper est-elle réfutable ?*, mémoire de DEA, dir. Bourguine P., Sciences Cognitives, Ecole Polytechnique, France. (en ligne : <http://chavalarias.free.fr>)
- Chavalarias, D. (2004) *Metadynamiques en Cognition Sociale – Quelle définition de meilleure est la meilleure ?*, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique (en ligne : <http://chavalarias.free.fr>)
- Chavalarias, D. (2005). Metamimetic games - Modeling metadynamics in social cognition, *JASSS* - under revision.
- Conte, R., Paolucci, M. (2001) 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>>.
- Hofbauer J., Sigmund K. (1988). *The Theory of Evolution and Dynamical Systems*, London Mathematical Society, Cambridge University Press.
- Nowak, M. A., May, R.M., Evolutionary Games and Spatial Chaos, *Nature*, 359: (6398) 826-829, 1992
- Popper, K. (1934). *La logique de la découverte scientifique*, Ed. Payot.
- Popper, K. (1962). *Conjectures et réfutations*, ed. Payot.
- Roger de Gardelle V. (2005) *Modéliser et simuler la dynamique de la découverte collective de connaissances. Une approche poppérienne et multi-agents de l'activité de la communauté scientifique*, mémoire de DEA, dir. Chavalarias, D. & Bourguine se P., Sciences Cognitives, Ecole Polytechnique, France. (en ligne : <http://chavalarias.free.fr>)
- 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
- Weibull J. W. (1995) *Evolutionary Game Theory*, MIT press.

REMERCIEMENTS :

Nous tenons remercier toute l'équipe du CREA avec qui nous avons eu des discussions fructueuses et l'Ecole Polytechnique qui nous a permis d'effectuer ces recherches. Nous remercions également vivement Jean Sallantin et Christopher Dartnel du LIRMM ainsi que l'entreprise Normind avec qui nous avons collaboré pour la mise en place de la partie expérimentale.

ⁱ Correspondance à adresser à David Chavalarias, david.chavalarias@polytechnique.edu, <http://chavalarias.free.fr>