

# L'énigme de l'articulation entre comportements individuels et collectifs dans les simulations multi-agents

Frédéric Amblard<sup>\*</sup>, Antoine Penciolelli<sup>\*\*</sup>

[\\*frederic.amblard@univ-tlse1.fr](mailto:frederic.amblard@univ-tlse1.fr), [\\*\\* antoine@penciolelli.net](mailto:antoine@penciolelli.net)

## 1.Introduction

Nous soulèverons ici le problème de l'émergence du sens, dont on souhaiterait qu'elle puisse devenir une construction du sens, au sujet des simulations multi-agents ou plus largement des simulations individus-centrées. Ce type de simulation se focalise sur une spécification souvent exclusive des comportements des individus ou agents et de leurs interactions, entre eux ou avec leur environnement. Les effets observés au niveau macroscopique en sortie de simulations posent dès lors une double question au modélisateur : 1) *qu'est-ce que j'obtiens ?* ou comment qualifier, un peu plus précisément qu'en les qualifiant d'émergents, les résultats au niveau macroscopique de comportements et de dynamiques microscopiques et 2) *pourquoi j'obtiens ces résultats ?* ou, nous le verrons plus en détail par la suite, quelle explication est-ce que je mets en place qui me satisfasse pour comprendre l'articulation entre les comportements individuels spécifiés et leurs résultants macroscopiques.

### 1.1. *Quels résultats j'obtiens ?*

La stochasticité de ces modèles aussi bien que leur grand nombre de variables (paramètres globaux, distributions utilisées pour initialiser les ensembles d'individus et éventuellement corrélations de ces distributions à des positionnements spatiaux ou topologiques dans le cas des réseaux sociaux), conduisent en pratique à la non-exhaustivité de toute exploration qui serait tentée sur ces modèles. On pourrait évoquer la trop grande dimension de l'ensemble des possibles. Au niveau macroscopique, quand on s'intéresse alors aux formes générées par le modèle, il faut donc se résoudre à considérer que les observations réalisées ne peuvent prétendre à l'exhaustivité. Le manque de preuves formelles liées aux simulations multi-agents et l'inutilisabilité de méthodes de vérifications formelles (de type model-checking) nous rapproche alors irrésistiblement des sciences expérimentales pour caractériser le comportement de notre modèle, comme argumenté par Guillaume Deffuant (Deffuant et al., 2003). Aussi nous devons nous contenter d'un processus de construction du sens fluctuant au grès des observations réalisées, ces observations dépendant 1) *de ce que l'on mesure*, et en ceci fait écho à notre première question, et 2) *des valeurs effectives de ces mesures*.

Notre perplexité augmente encore d'un cran à la lecture de Bergson concernant la création du possible par le réel : « *Au fur et à mesure que la réalité se crée,*

*imprévisible et neuve, son image se réfléchit derrière elle dans le passé indéfini ; elle se trouve ainsi avoir été, de tout temps, possible ; mais c'est à ce moment précis qu'elle commence à l'avoir toujours été, et voilà pourquoi je disais que sa possibilité, qui ne précède pas sa réalité, l'aura précédée une fois la réalité apparue.* » De manière presque similaire dans le cadre des simulations individus-centrées, les comportements macroscopiques observés sont rendus possibles *ab initio* par leur observation. Nous devons cependant concéder qu'une différence principale concerne le déterminisme de la simulation (la stochasticité n'étant au final qu'émulée par des générateurs pseudo-aléatoires). Cependant, et pour renforcer ce que l'on avait déjà énoncé, l'ensemble des possibles concernant les résultats de la simulation ne peut être dans notre cas ni énuméré (ensemble possiblement infini), ni borné (pratiquement les techniques de model-checking qui pourraient le permettre ne sont pas possibles à mettre en place), on doit donc souvent s'en remettre aux statistiques des expérimentateurs. Au delà de cet ensemble de sorties de simulation non quantifiable, sa caractérisation pose également problème, on pourrait même considérer que le type de mesure ou d'indicateur choisi pour caractériser l'observation multiplie d'autant l'ensemble de ces sorties. Mais nous reviendrons sur le point de la définition ou de la caractérisation de ce qui est observé après avoir abordé la deuxième question, la construction d'une explication sur le comportement du modèle co-évoluant avec les indicateurs choisis pour observer les simulations. Les indicateurs interviennent ainsi en pourvoyeurs de fondements pour l'explication et l'explication en construction orientant le type de mesures à réaliser sur la simulation, soit en imposant son cadre, soit en cherchant à l'éviter (pour chercher, la réfutation, le contre-exemple).

### *1.2. Pourquoi j'obtiens ces résultats ?*

Pour répondre à cette question qui oscille entre construction instrumentalisée et émergence du sens, le modélisateur, au regard des observations qu'il fait de la simulation (on remarquera au passage que ces observations de départ orientent sans doute déjà l'explication qui sera élaborée), va construire progressivement une théorie liant ce qu'il observe. Il va construire une théorie de l'articulation entre niveau individuel et niveau collectif, une théorie pour abstraire, généraliser les simulations particulières qui ont été réalisées. Cette théorie correspond bien à une explication construite, possiblement formalisée, qui tend à s'abstraire du cadre du modèle dans lequel l'explication a été construite pour s'appliquer de manière générique à des classes de modèles équivalents. Sans volonté de construction de cette théorie, on se contente de considérer le modèle comme une boîte noire et d'essayer de construire un lien, dès lors équivalent à un lien statistique, liant entrées et sorties de la boîte, on reste alors sur l'attitude descriptive proposée par les lois physiques, sans proposer d'outils génériques de compréhension des phénomènes, de théories de l'articulation entre

comportements individuels et comportements collectifs à même de produire au niveau du modèle particulier des explications.

Il serait décevant de s'arrêter à ce stade, le modélisateur doit pouvoir, on le sent, pousser plus loin. Les résultats macroscopiques observés ne sont pas émergents, du moins au sens de Morin pour qui « *l'émergence est irréductible phénoménalement et indéductible logiquement* ». Malgré sa longueur, une chaîne logique, un algorithme déterministe, mène dans notre cas des conditions initiales au résultat observé. Même si cette chaîne est complexe, elle existe, *c'est écrit ...*

Un point que nous devons mentionner même si nous ne le discuterons pas, c'est qu'à un moment donné de l'étude, le sens émerge, au sens où l'on est capable de proposer une première explication, ou une nième explication, en accord avec les observations réalisées... Mais si l'on ne sait pas comment émerge ce sens, il nous faut essayer d'instrumentaliser cette émergence pour qu'elle ait davantage de chances de survenir et que l'on soit capable de proposer une explication.

La dynamique de construction de cette explication correspond du reste au schéma classique (Popper, 1972) « *seule l'expérience [dans notre cas l'expérience de simulation] est capable de nous aider à nous faire une idée sur la vérité ou la fausseté des énoncés portant sur des faits* ». Ainsi, si mon explication rend compte des observations réalisées jusqu'à présent, je peux la conserver (éventuellement parmi d'autres), sinon il me faut en construire une nouvelle. Cette réfutabilité est d'autant plus intéressante en simulation qu'il est parfois beaucoup plus réalisable de chercher la réalisation d'un contre-exemple par un processus de simulation que dans les sciences expérimentales classiques. Orienter l'algorithme de simulation pour trouver ce qui ne vérifie pas la théorie, à défaut d'être systématiquement réalisable est tout de même pratiquement envisageable dans certains cas.

### *1.3. Co-construction de l'explication et de l'observation*

Comme nous l'avons souligné, l'indépendance entre observation et construction du sens, posée par les deux questions est évidemment factice. Il nous faut cependant mentionner que comme dans la plupart des domaines scientifiques, il y a interdépendance entre construction du sens et observation empirique *in silico*. Les observations appuyant ou réfutant les théories existantes, voire suggérant de nouvelles explications, et l'explication orientant par le cadre qu'elle impose ou le paradigme dont elle est issue, les mesures qui sont réalisables.

Pour illustrer notre propos, nous allons maintenant présenter l'exploration d'un modèle particulier en insistant rétrospectivement sur la manière dont se sont co-construits les explications sur ce modèle et ses observations.

## 2. Au départ était ... le modèle ?

Le départ n'est en fait bien évidemment pas le modèle formalisé tel que nous allons le présenter. Il a été précédé par presque trois ans de réflexions sur la manière dont les agriculteurs adoptent des mesures agri-environnementales et en particulier quels en sont les déterminants et quels sont les mécanismes sociaux sous-jacents qui expliquent la diffusion ou non de ces adoptions dans une population. Ce travail a été mené dans le cadre du projet européen IMAGES<sup>1</sup>. Le modèle résultant de ce projet étant particulièrement volumineux (en terme de nombre de variables comme de lignes de code), nous nous sommes focalisés un peu après sur une partie de ce modèle, la dynamique d'influence sociale, que nous allons présenter et que nous avons en quelque sorte décontextualisée pour la considérer comme un objet à étudier.

Nous considérons donc une population de  $N$  individus, chaque individu  $i$  étant caractérisé par deux variables réelles : son opinion  $x_i$  et son incertitude  $u_i$ . Les opinions sont initialisées à partir d'une distribution uniforme sur  $[-1;+1]$  et les interactions par couples d'individus sont sélectionnées aléatoirement parmi la population. Soit  $s_i = [x_i - u_i, x_i + u_i]$ , le segment d'opinion de  $i$ , le changement d'opinion de  $j$  sous l'influence de  $i$  est proportionnel à la superposition entre leurs deux segments d'opinions (l'accord), divisée par l'incertitude de  $i$ . Le changement d'opinion est de plus conditionné par un accord suffisant entre les deux individus. Si les deux individus sont suffisamment proches en opinion, ils s'influencent et se rapprochent davantage, sinon ils sont indifférents l'un à l'autre et ne modifient pas leurs opinions. Le lecteur pourra se référer à (Deffuant et al., 2002) pour plus de détails.

En considérant ce modèle, et avant même d'en exécuter une simulation, déjà, nous sommes en mesure d'anticiper ce qui peut s'y produire. Si les individus ont deux tendances : se rapprocher ou ne pas changer d'opinion, l'on devrait observer dans la simulation la formation de clusters d'opinions. Ce qui, en exécutant la simulation est avéré (cf. fig.1).

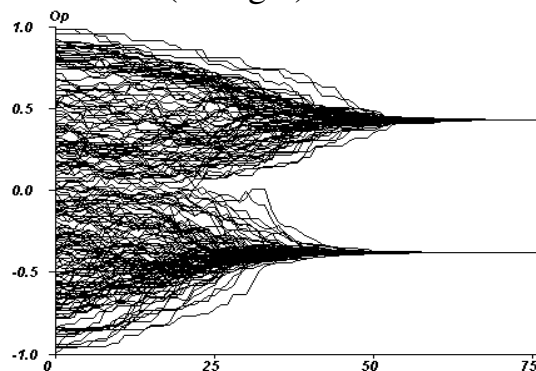


Figure 1 : Trajectoire des opinions des individus dans le temps avec une incertitude identique pour l'ensemble de la population (ici  $u=0.4$  et  $w=2.0$ ).

---

<sup>1</sup> Nous tenons en particulier à remercier ici Guillaume Deffuant et Gérard Weisbuch qui ont dirigé cette recherche.

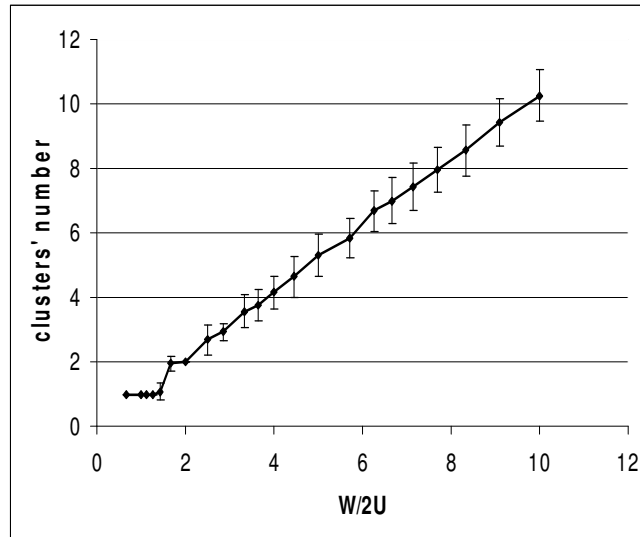


Figure 2 : Tracé du nombre moyen de groupes en fonction de  $w/2u$  ( $w$  est la largeur de la distribution initiale et  $u$  l'incertitude des individus). Chaque point représente le nombre final de groupes moyennés sur 50 simulations (les individus isolés n'étant pas considérés comme des groupes). Le nombre de groupes moyen est proche de  $w/2u$  ( $r^2=0.99$ ).

L'explication qualitative fournie précédemment pourrait être raffinée ici (cf. fig.2), mais elle reste valable, l'observation ne donnant pas d'éléments qui soient inexplicables. Les observations présentées en figure 2 permettent cependant d'agrémenter l'explication en donnant la relation statistique qui lie linéairement le nombre de cluster au rapport  $w/2u$ , la largeur de la distribution divisée par 2 fois l'incertitude. Ce rapport conduit, lui, à affiner l'explication en précisant que les clusters mis en place le sont dans des bandes régulières de largeurs  $w/2u$ . Par interactions entre les individus un voisinage local d'interactions exclusives se crée progressivement au cours de la simulation. Si l'on reprend la figure 1, on observe du reste ces deux bandes se former assez rapidement au dessus et en-dessous de 0, les individus se positionnant alors exclusivement sur l'une ou l'autre de ces bandes.

### 3. Ensuite vint ... un autre modèle !

A partir du modèle précédent, nous avons formulé de nouvelles hypothèses que nous souhaitons explorer. Il est à noter ici, que contrairement au cas où si le modèle avait été conçu pour rendre compte précisément d'une réalité particulière et d'un phénomène défini sur lequel nous aurions pu mener des mesures, un raffinement du modèle aurait pût être justifié par un manque explicatif du phénomène observé, une construction du sens trop appauvrie en somme, ici, les hypothèses ajoutées le sont essentiellement

dans un but spéculatif pour tester *in silico* des hypothèses concernant la structuration d'une population.

Pour étendre notre modèle, nous introduisons donc des extrémistes dans notre population en supposant que ces derniers, situés aux extrémités de la distribution d'opinions, sont plus sûrs d'eux (ont une incertitude plus faible). Nous notons  $p_e$  la proportion d'extrémistes dans la population,  $u_e$  l'incertitude des extrémistes et  $U$  l'incertitude des modérés, on suppose donc que  $u_e < U$ .

Avec ces nouvelles hypothèses et de la même manière que précédemment, nous pouvons produire un comportement attendu des simulations. Les règles d'interaction favorisant les individus plus certains, les extrémistes vont donc se comporter comme des attracteurs aux extrémités de la distribution d'opinions. Un premier cas attendu, en fonction des paramètres choisis évidemment, correspond donc au cas où chaque extrême va attirer à lui une partie de la population. Un second cas attendu, si l'on considère une incertitude de la population centrale plus faible va correspondre au fait que la population va se regrouper en une bande centrale et ne pas être influencée par les extrémistes.

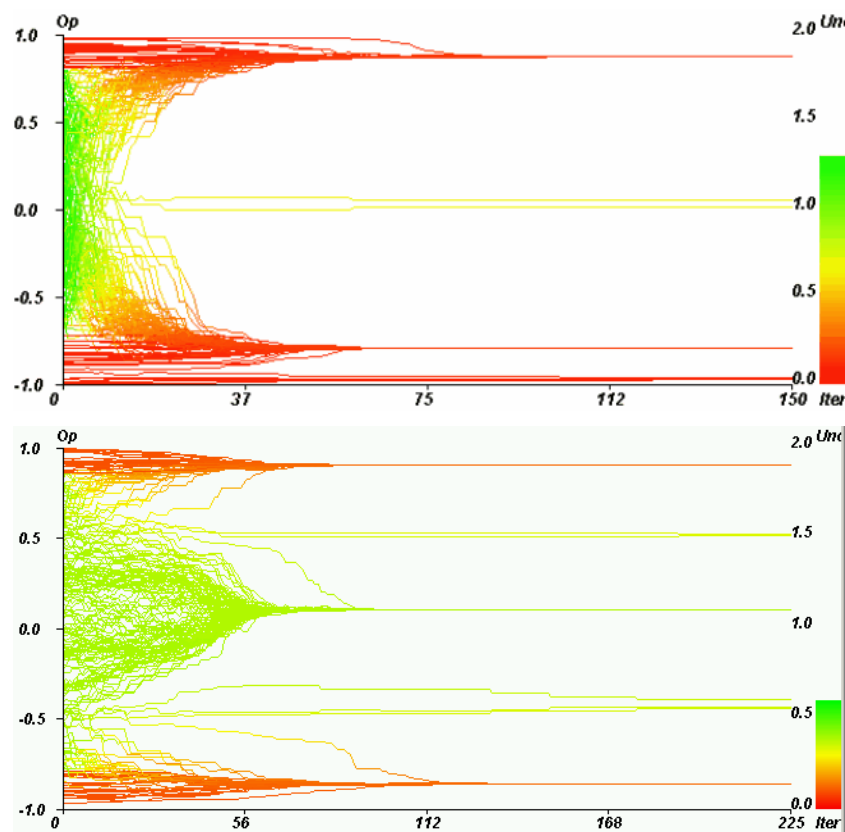


Figure 3 : Deux cas typiques attendus et observés, la convergence double extrême et la convergence centrale. Les figures représentent les trajectoires d'opinions dans le temps des individus de la population, les couleurs représentant l'incertitude des individus de rouge (incertitude proche de 0) à vert (incertitude proche de l'incertitude initiale des modérés).

Cependant, au cours de cette exploration, certains cas typiques et inattendus a priori ont été observés (cf. Fig.4), il s'agit de la convergence massive de l'ensemble de la population vers un seul des extrêmes. La question qui se pose dès lors face à cette observation est : est-ce notre explication est capable de rendre compte de ce phénomène ou bien est-ce que nous devons en réaliser une explication particulière, pour ensuite tenter de la généraliser ?

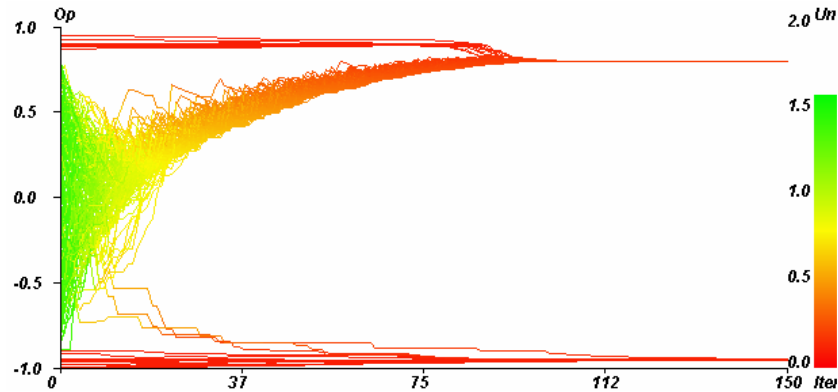
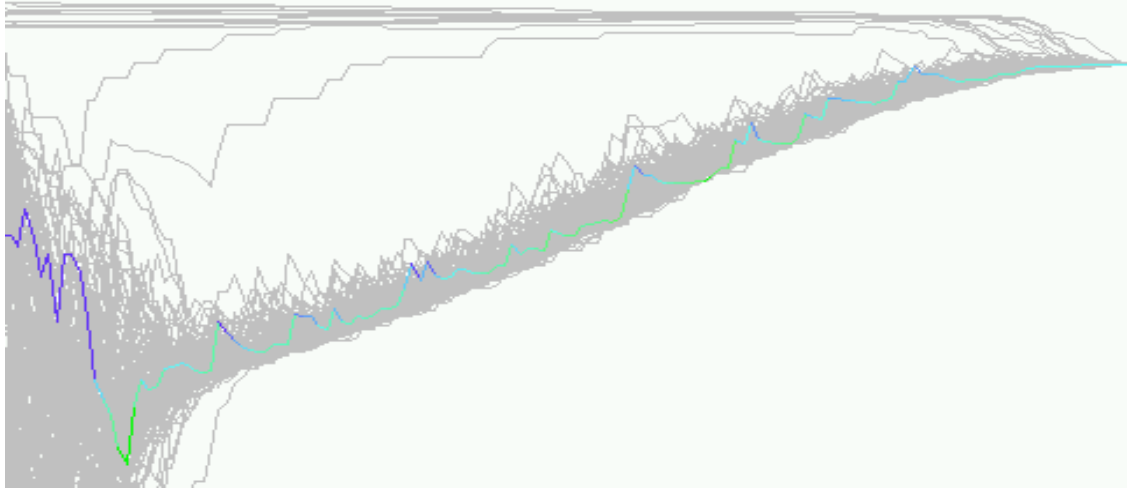


Figure 4 : Le cas inattendu de la convergence vers un seul extrême.

Pour produire une explication, nous devons ici changer notre point de vue sur le système. Il est à noter que recréer la démarche de compréhension du comportement du modèle comme nous sommes en train de le faire est particulièrement périlleux puisqu'il nous faut tenter d'examiner ces résultats avec le regard que nous avons alors, de manière non déformée par l'explication que nous possédons au jour d'aujourd'hui, mais par celle bien imparfaite, que nous avons à l'époque. Pour obtenir de nouvelles informations en jetant un regard nouveau sur ce cas particulier, nous avons donc mis au point un indicateur (cf. eq. 1) qui représente l'influence moyenne à laquelle chaque individu est soumis ou plus exactement la proportion de l'influence à laquelle est soumis l'individu qui provient des extrémistes.

$$E_j = \frac{\sum_{i=\text{extremist}} \delta x_{ij}}{\sum_i \delta x_{ij}} \quad (\text{Eq. 1})$$

où  $\delta x_{ij}$  est la modification virtuelle de l'opinion de l'individu  $A_j$  sous l'influence de l'individu  $A_i$ . En suivant un individu particulier de la population dans ce processus de convergence vers un seul extrême (cf. fig. 5) nous obtenons ainsi de nouveaux éléments qui nous permettent de construire notre explication. Il est à noter que dans ce cadre, le fait de changer de point de vue, de niveau d'organisation et de passer à l'observation d'un comportement individuel particulier participe grandement à la construction réussie d'une explication dans ce cas.



*Figure 5 : Zoom sur une trajectoire individuelle correspondant au cas de la convergence vers un seul extrême. Toutes les trajectoires sont en gris à l'exception d'une seule pour laquelle la couleur indique le poids des extrémistes dans l'influence moyenne.*

Ainsi, nous observons tout d'abord un processus de regroupement central des modérés. Un mouvement dû à une pression majoritaire des modérés qui pèsent par leur nombre et leur dispersion initiale, dans le processus de regroupement. Une fois ce regroupement central opéré, l'influence des individus du groupe est relativement faible du fait de leur proximité en opinion, ils agiront davantage comme une inertie au mouvement. Après le processus de regroupement central les individus fluctuent au cours de la dérive vers l'extrême. Au cours du temps ils peuvent être attirés par un extrémiste et s'en rapprocher en opinion, puis sous l'influence de la majorité se rapprocher à nouveau du groupe tout en influençant certains éléments de ce dernier. Ce qui conduit à un changement progressif de la majorité vers une opinion extrême. Il y a ainsi oscillation entre influence forte de l'extrême et co-influence entre l'individu et la majorité qui ramène l'individu vers le groupe mais qui tire également progressivement le groupe vers l'extrême.

Au regard de cette explication, des détails de la figure 4 prennent sens, ainsi la diminution progressive de l'incertitude des modérés au cours de la phase de regroupement central, qui est due à quelques interactions des individus avec les extrémistes, est sans doute à l'origine du mouvement vers un seul extrême. Ainsi au cours de ce regroupement central, la diminution de l'incertitude coupe le groupe central d'un des deux extrêmes, ce qui conduit le groupe à être massivement attiré par l'autre. Une hypothèse qui est confirmée par la figure suivante (cf. Fig. 6a) obtenue pour des valeurs de paramètres identiques à ceux de la figure 4 et qui trouverait son explication dans le fait que lors du regroupement central, l'incertitude du groupe diminuant, les individus se coupent des deux extrêmes à la fois. Ainsi que par la figure 6b sur laquelle la représentation



conjointe de l'opinion et du segment d'incertitude (le seuil au delà duquel les individus ne peuvent plus s'influencer) montre effectivement une rupture dans l'influence du regroupement central par un des deux extrêmes.

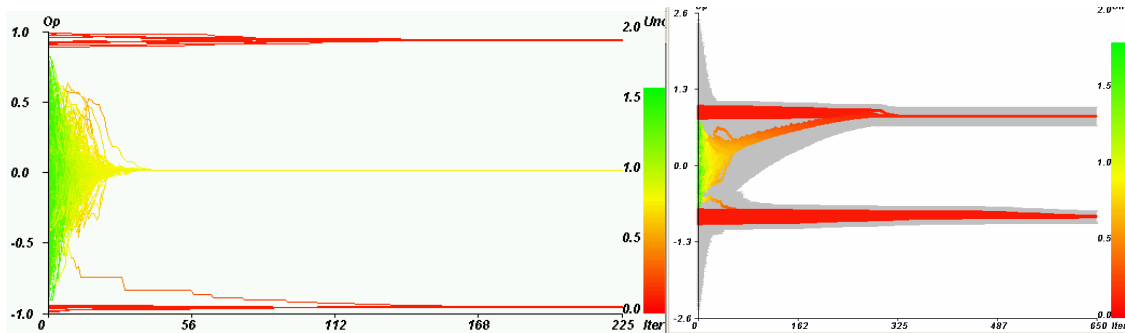


Figure 6 : a) à gauche : une convergence centrale particulière observée pour des valeurs de paramètres identiques à celles de la convergence vers un seul extrême b) à droite, une représentation de la convergence vers un seul extrême visualisant les incertitudes associées aux opinions des individus.

L'observation de ces différents cas et les explications fournies conduisent à se poser une nouvelle question : dans quels cas est-ce que l'on observe quel type de convergence ? Cette question permettrait à nouveau de jeter un regard neuf sur le modèle et de proposer de nouveaux éléments permettant de comprendre plus finement pourquoi l'on observe ces formes.

Pour observer dans quels cas apparaissent chacun des types de convergence, nous devons donc conduire une exploration du comportement du modèle, comportement synthétisé comme étant le type de convergence moyen résultant, dans l'espace des paramètres. Ce problème pose donc celui de la création d'un indicateur permettant de synthétiser le type de convergence observé.

#### 4. Construction de l'indicateur

Pour exprimer les résultats de l'exploration plus aisément, nous utilisons un indicateur de type de convergence, noté  $y$  :  $y = p'_+ + p'^-$  où  $p'_+$  et  $p'^-$  sont les proportions d'agents initialement modérés qui deviennent extrémistes (respectivement positifs et négatifs). Ainsi :

- Si aucun des agents modérés ne devient extrémiste (cas de convergence centrale), alors  $p'_+$  et  $p'^-$  sont nuls et  $y = 0$ .
- Si les agents modérés convergent équitablement vers les deux extrêmes, nous avons alors  $p'_+ = 0.5$  et  $p'^- = 0.5$ , d'où  $y = 0.5$ .
- Si les agents modérés convergent vers un seul extrême, par exemple le positif, nous avons  $p'_+ = 1$  et  $p'^- = 0$ , d'où  $y = 1$ .

Les valeurs intermédiaires de  $y$  correspondant à des situations intermédiaires, la valeur de cet indicateur nous permet aisément de déterminer le type de convergence.

## 5.Exploration de l'espace des paramètres

La mise au point de cet indicateur nous a permis de catégoriser automatiquement les simulations en différents cas de convergence et qui plus est de manière continue, l'indicateur prenant ses valeurs entre 0 et 1. Pour l'exploration de l'espace des paramètres qui a été ainsi réalisée (cf. Fig.7) nous avons choisi deux dimensions qui nous ont semblé être, suite à l'expérience acquise au cours de l'exploration un peu artisanale qui a précédée, celles qui influaient le plus sur le comportement observé du modèle. Une analyse de sensibilité conduite auparavant nous aurait peut-être permis de choisir ces dimensions de manière plus judicieuse. Toujours est-il que cette exploration conduite sur les dimensions  $U$  (incertitude des modérés) et  $pe$  (proportion d'extrémistes dans la population) nous a permis de comprendre un certain nombre de points. En particulier le fait que pour des incertitudes faibles des modérés, l'occurrence de convergences centrales à l'exclusion de tout autre, confortait notre explication selon laquelle pour des incertitudes faibles des modérés, ceux-ci sont moins sensibles aux influences des extrémistes.

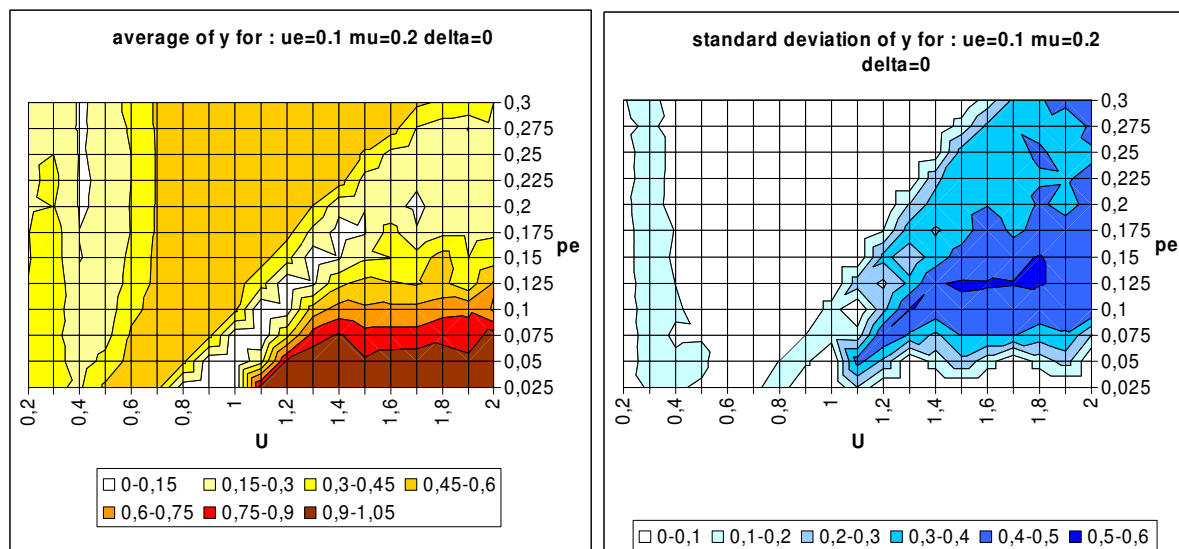


Figure 7 : Formes typiques de la moyenne et de l'écart type de l'indicateur  $y$  (50 répliquions en chaque point du graphe) en fonction de l'incertitude des individus modérés ( $U$ ) et de la proportion globale d'extrémistes dans la population ( $pe$ ). Les autres paramètres sont fixés : incertitudes des extrémistes  $ue = 0.1$ , intensité des interactions  $\mu = 0.2$ . Sur le graphe des moyennes de  $y$ , les zones jaunes et blanches à gauche correspondent à la convergence centrale, les zones oranges, typiquement au milieu à la convergence vers les deux extrêmes, et la zone marron en bas à droite correspond au simple extrême.

Une explication plus détaillée des comportements observés est disponible dans (Deffuant et al. 2002). Le point important ici étant que l'on utilise un nouvel outil, un nouveau point de vue, pour comprendre le comportement du modèle et

ainsi se donner des outils pour construire du sens et plus exactement pour construire du sens à propos de l'articulation, dans le cadre de ce modèle particulier, entre comportements individuels et comportements collectifs.

Ce processus de construction du sens semble ici sans fin tant nous pourrions solliciter de nouveaux outils qui nous permettraient de discuter nos hypothèses. Il s'agit bien alors de sélectionner pertinemment les outils susceptibles de mettre cette explication en danger, d'utiliser les points de vue susceptibles d'illuminer d'un jour nouveau le comportement du modèle et ainsi d'amener des connaissances qui sont aussi différentes que possibles des observations précédemment réalisées. Ainsi en tendant toujours vers l'asymptote que serait la preuve formelle des propriétés qui sont jusque là uniquement intuitées sur ces modèles, le modélisateur peut solliciter indéfiniment de nouveaux outils, de nouveaux regards sur son modèle, construisant au fur et à mesure son exploration. Comme l'écrit Antonio Machado :

*« Voyageur, le chemin  
C'est les traces de tes pas  
C'est tout; voyageur,  
il n'y a pas de chemin,  
Le chemin se fait en marchant »*

## **Remerciements**

Derrière le nous utilisé dans le texte se cachent souvent d'autres personnes qui ont participé au travail plus large qui est présenté : Thierry Faure, Jean-Pierre Nadal, ou qui l'ont dirigé : Guillaume Deffuant et Gérard Weisbuch. Ils n'auront cependant certainement pas vécu le processus de construction du sens de la même manière tant cette construction est subjective et individualisée.

## **Références**

Bergson, H., *La pensée et le mouvant*, PUF, 2003.

Morin, E., *La méthode tome 1 : La Nature de la Nature*, Seuil, 1977.

Popper, K., *La connaissance Objective*, Flammarion, 1999.

Deffuant, G., Amblard, F., Duboz, R. et Ramat, E., "Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée", *Actes des 10èmes Journées de Rochebrune 2003, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, épistémologie de la simulation*, janvier 2003, Rochebrune, France, pp.45-64.

Deffuant, G., Amblard, F., Weisbuch, G. et Faure, T., "How can extremism prevail? A study based on the relative agreement model", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol.5, n°4, 2002.