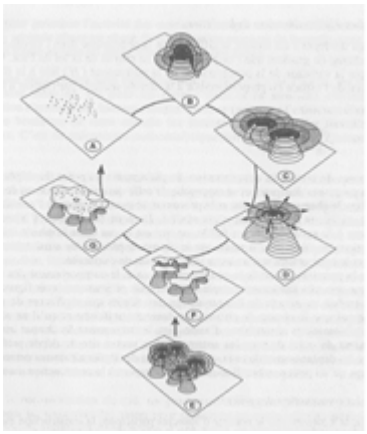
Cahiers
#Costech

> Charles Lenay

Causalité circulaire dans les systèmes de systèmes

Un modèle inspiré par les animaux sociaux



> #Numéro 2
> Varia
> Working papers
> CRED - Cognitive Research and Enactive Design (Costech-UTC)
> Biocontrôle - > Epistémé et subjectivité - > Philosophie - > Sciences cognitives

Citer cet article

Lenay, Charles. "Causalité circulaire dans les systèmes de systèmes. Un modèle inspiré par les animaux sociaux", 21 novembre 2018, *Cahiers Costech*, numéro 2.
URL https://www.costech.utc.fr/CahiersCostech/spip.php?article66

Il s'agit là d'une version largement corrigée et améliorée à la suite des remarques critiques et constructives de Hugues Choplin, Xavier Guchet et Gunnar Declerck. Une discussion est ouverte avec Hugues Choplin par cette note de travail :
http://www.costech.utc.fr/CahiersCOSTECH/spip.php?article91

Résumé

A l'aide des modèles biologiques de la stigmergie et de la formation du visa colonial chez certains insectes sociaux, on propose ici un schème explicatif de l'émergence dans les systèmes de systèmes. Ce schème de causalité circulaire entre le tout et les parties, s'explique par une dualité des marques laissées dans un milieu intérieur, à la fois perçues, modifiées et saisies par les parties.

Auteur(s)

Charles Lenay, Professeur de sciences cognitives et de philosophie des sciences, ex-directeur du COSTECH . Habilité à diriger les recherches en Philosophie (17^{e}) et en Histoire des sciences (72^{e}), il consacre l'essentiel de ses recherches aux technologies cognitives : comment les outils participent à l'activité cognitive : raisonnement, mémorisation, perception, interaction,…

Plan

Introduction
1. Stigmergie
2. Polyéthisme
3. Visa colonial
4. Schème explicatif de la causalité circulaire
Conclusion

Introduction

Un système est un ensemble organisé d'éléments en interaction qui présente des propriétés ou fonctions propres à cet ensemble. Un système de systèmes (SdS) est un système de second ordre composé de systèmes de premier ordre relativement autonomes, généralement hétérogènes, et qui par leurs interactions réalisent des fonctions générales complexes, généralement distribuées spatialement (Maier, 1998). Les recherches actuelles en SdS engineering visent la conception ou la gestion de systèmes complexes comme les systèmes de défense militaire, les systèmes de gestion des transports aériens, l'exploration spatiale, les systèmes de santé, etc. (Autran et al., 2008 ; Boardman & Sauser, 2006 ; DeLaurentis, 2005 ; Jamshidi, 2008).

Dans tous les cas, l'affirmation la plus générale, toujours répétée, pour les systèmes comme pour les SdS, est que "le tout est plus que la somme de ses parties". Pour des systèmes artificiels cela signifie simplement que les parties ont été assemblées dans la finalité de remplir telle fonction propre à l'ensemble. Mais si l'on veut rendre compte de l'émergence de phénomènes globaux plus ou moins inattendus, il faut expliquer comment le système peut fonctionner comme un tout dont le comportement pourrait échapper au contrôle ou à la prédiction (P. N. Kugler & Turvey, 1988). Il semble alors que cette relative autonomie du système se réalise par une *causalité circulaire* dans laquelle le tout rétroagirait sur les relations entre les parties qui le composent. Il faudrait donc comprendre les mécanismes de cette causalité circulaire et son lien

avec une forme d'autonomie du système. Notons aussi que, dans le cas d'une autonomie accomplie, le système semble définir lui-même ses frontières en maintenant son identité et en réagissant aux perturbations de son environnement.

Dans le cadre de l'émergentisme anglais du XIXéme siècle, on parlait de « downward causation » (John Stuart Mill) : il n'y aurait "émergence" à proprement parler que si le tout du système considéré pouvait jouer un rôle causal dans le maintien de son existence. Dans le cas contraire, si les propriétés du tout étaient seulement les conséquences causales directes des interactions entre les parties, elles ne seraient que des "épiphénomènes" (Jean, 1997). L'objectif ici n'est pas de réactiver un tel débat épistémologique sur la question de l'émergence mais plutôt de présenter un modèle, inspiré du monde biologique, permettant de donner un sens précis a une causalité circulaire qui associerait causalité "ascendante", bottom-up, des parties vers le tout et causalité "descendante", top-down, du tout vers les parties.

Notre objectif est donc théorique. Il y a de nombreuses recherches sur les phénomènes d'auto-organisation dans les systèmes physiques (dynamique des systèmes complexes, ordre par fluctuation, structures dissipatives (P. N. Kugler & Turvey, 1988)). Mais dans ces cas, même si l'on peut considérer l'existence de dynamiques différentes suivant les niveaux d'organisation, il n'y a pas de réelles causalité descendante du tout vers les parties dans la mesure où les structures émergentes (attracteurs de la dynamique du système) sont directement déterminées par les interactions des éléments qui le composent. Nous travaillerons ici plutôt à partir de systèmes biologiques qui permettront de dégager des modèles suffisamment simples pour comprendre le fonctionnement d'une telle causalité circulaire, et ceci, sans faire intervenir des causes finales ou même des comportements guidés par des représentations. Nous espérons que les schèmes explicatifs proposés pourront être utiles pour l'étude et la conception des SdS. Mais, bien sûr, savoir s'ils seront applicables aux situations concrètes socio-techniques, restera une question à tester empiriquement.

Le monde du vivant propose de nombreux cas propices pour donner un sens précis aux notions d'autonomie et de causalité circulaire. Si le modèle biologique par excellence d'un système isolé est la cellule vivante, il nous semble que pour un SdS le meilleur modèle est plutôt celui des animaux sociaux.

Pour la cellule, en tant qu'unité vivante la plus simple possible, on doit admettre que l'ensemble du métabolisme est nécessaire pour produire chacun des éléments spécifiques (protéines enzymatiques) qui régulent localement les différentes interactions chimiques qui, ensemble, réalisent ce métabolisme. De même, la membrane qui définit la frontière de la cellule et permet l'existence du métabolisme est sans cesse produite par ce métabolisme1. Ces idées de causalité circulaire ont été approfondies, développées et généralisées dans la théorie de l'autopoïèse initiée par Humberto Maturana et Francisco Varela dans le contexte de la cybernétique de second-ordre(F. J. Varela, 1979 ; F. J. Varela, Thompson, & Rosch, 1991).

Si maintenant on considère des systèmes encore plus complexes comme les colonies d'insectes sociaux, chaque individu étant déjà lui-même un système multicellulaire autonome extrêmement sophistiqué, on pourrait douter qu'ils puissent servir de modèle d'intelligibilité pour comprendre la causalité circulaire dans les SdS. Cependant, la répartition spatiale des individus qui composent la colonie est au contraire un avantage pour une compréhension précise de leurs interactions et de la façon dont elles conduisent à l'émergence d'une organisation globale suffisamment stable. C'est du moins le pari adopté par de nombreux travaux dans les Systèmes Multi-Agents (SMA). Un SMA (ou agent-based model (ABM)) est composé d'unités de comportement, les « agents », qui sont relativement autonomes (règles de décision locales, comportements possiblement partiellement aléatoires) et qui interagissent dans un environnement partagé (Ferber, 1997). Ce domaine de recherche est le lieu d'un dialogue interdisciplinaire dans lequel des propositions théoriques d'explication en éthologie, sociologie, ou sciences cognitives, sont confrontées à des modélisations et simulations informatiques et robotiques (Niazi & Hussain, 2011 ; Brooks, 1991 ; Lenay, 1994a, 1994b). En retour, ces recherches permettent des innovations sur les méthodes informatiques de calcul et de résolution de problèmes (Drogoul, Vanbergue, & Meurisse, 2002 ; Ferber, 1999). Dans chaque cas, il s'agit de vérifier si des facteurs explicatifs ne définissant que des règles d'interaction locales, sont suffisants pour rendre compte des phénomènes collectifs observés ou espérés. Par exemple, des SMA ont permis de modéliser des sociétés de cellules dans un tissu (Harous, Djoudi, & Boulanouar, 2006), les comportements de populations de fourmis (E. Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999 ; E. Bonabeau, Theraulaz, Deneubourg, Aron, & Camazine, 1997), des groupes structurés de singes (Picault & Collinot, 1998), la propagation de maladies, la gestion des

ressources (Bousquet et al., 2002), le trafic routier, l'ensemble d'avions à l'approche d'un aéroport, des groupes de robots dans un atelier, etc.

Une démarche particulièrement fructueuse de ce domaine de recherche consiste à conduire les modélisations en prenant des agents les plus simples possibles pour vérifier si la dynamique de leurs interactions suffit ou non pour l'émergence de comportements collectifs riches, dépassant les capacités individuelles. Dans ce cas, on parle d'agents « réactifs », par opposition à des agents « cognitifs ». Un agent réactif est une unité de comportement stimulus–réponse dénuée de capacités de représentation et de calcul complexe. Nous nous plaçons ici dans une telle perspective minimaliste qui nous semble plus propice pour dégager des conditions suffisantes de l'émergence de phénomènes collectifs. Elle permettra en même temps de préciser le sens en lequel on peut dire que des propriétés collectives se différencient et dépassent les propriétés individuelles des agents.

Mais, bien sûr, « qui peut le plus peut le moins ». Les agents peuvent fort bien être par ailleurs des systèmes complexes. Si l'on a expliqué les conditions d'une forme d'émergence en ne considérant que des composantes simples de leur comportement, on sera en meilleure position pour analyser la façon dont elles peuvent être ensuite compliquées par des capacités locales de calcul et de représentation internes. On comprendra aussi mieux que certains de ces phénomènes collectifs puissent échapper aux agents qui composent le SdS. Ajoutons qu'en se plaçant dans le domaine des SMA réactifs on échappe au danger de se donner trop facilement ce qu'il faut démontrer. Si l'on admet des capacités représentationnelles complexes, on pourra expliquer une « causalité descendante » à travers la perception individuelle des phénomènes collectifs (Dessalles, Ferber, & Phan, 2008). Or, il nous semble au contraire que les phénomènes d'émergence sont intéressants dans la mesure où ils s'expliquent en l'absence d'accès direct des parties au tout qui les englobe.

Dans tous les cas, il nous semble que le champ de recherche sur les SMA pourrait contenir des modèles explicatifs utiles pour la compréhension des phénomènes d'émergence que l'on observe dans les SdS. C'est cette démarche que nous adoptons ici. Pour cela on considérera qu'une colonie d'insectes est un SdS et que les individus qui la composent sont eux-mêmes des systèmes relativement autonomes, systèmes que dans ce contexte nous appellerons "agents".

Après un bref rappel d'un résultat général bien connu de ces recherches, le principe de "stigmergie", nous examinerons plus précisément le cas particulièrement révélateur du "visa colonial" chez les fourmis Ponérines. Nous pourrons ensuite proposer un possible schème explicatif général de la causalité circulaire dans les SdS.

1. Stigmergie

La question générale que se posent les entomologistes devant les colonies d'insectes sociaux est de comprendre comment elles peuvent réaliser des structures complexes (nids, différenciation des rôles sociaux, clôture de la colonie, capacités de résolution de problème, communication à distance, etc.). Et ceci alors que les individus sont relativement simples, qu'ils semblent poursuivre leur propre agenda et qu'ils n'ont pas d'accès à un point de vue d'ensemble. Par exemple, une termitière peut mesurer plus de 6 mètres, peser plus de 10 tonnes alors qu'elle est produite par la participation de 5 millions de termites. Si l'on se refuse la facilité d'admettre l'existence d'un super-organisme qui tiendrait sa cohérence d'une mystérieuse causalité holistique (Herbert Spencer, Alfred Espinas, William Morton Wheeler, Alfred E. Emerson), il faut bien que ce soient en dernier ressort les activités des individus qui expliquent les structures et fonctions collectives. Mais comment les activités individuelles peuvent-elles être coordonnées pour produire cette organisation globale alors qu'ils ne possèdent pas de point de vue de surplomb ?

Le principe explicatif simple et puissant proposé par Pierre Paul Grassé en 1959 pour rendre compte de cela est le principe de stigmergie (Eric Bonabeau & Theraulaz, 1999). Le terme "Stigmergie" est construit à partir des mots grecs στιγμα (*stigma*) « marque, piqure » et εργον (*ergon*) « travail, action ». L'idée est que le travail des individus est déterminé par les productions de ce travail : " La coordination des tâches, la régulation des constructions ne dépendent pas directement des ouvriers, mais des constructions elles-mêmes. L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui. C'est à cette stimulation d'un type particulier que nous donnons le nom de STIGMERGIE " (Grassé, 1959).

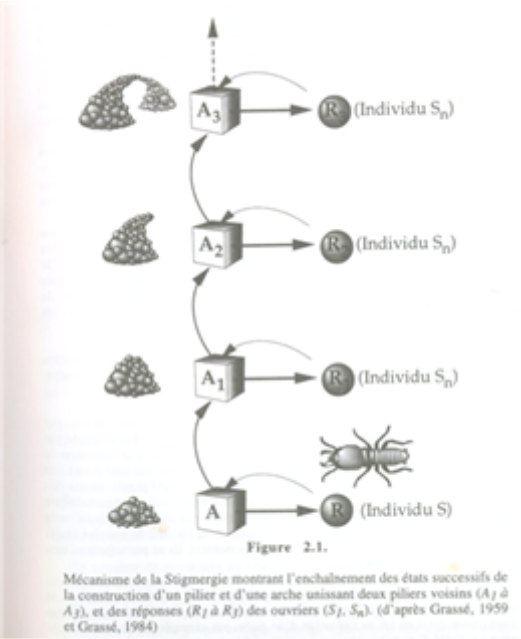


Figure 2.1.

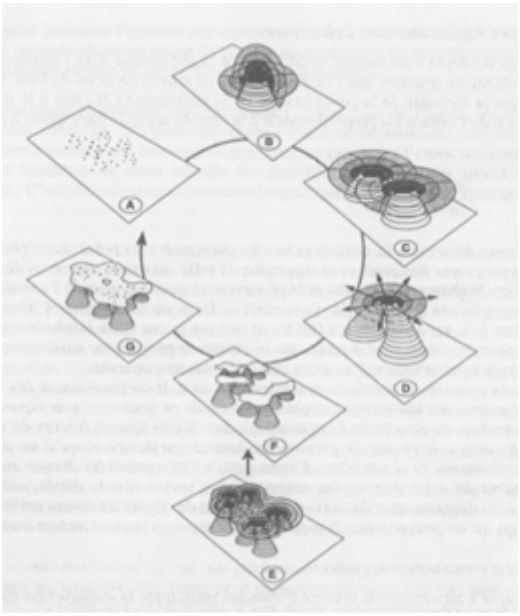
Mécanisme de la Stigmergie montrant l'enchaînement des états successifs de la construction d'un pilier et d'une arche unissant deux piliers voisins (A_1 à A_3), et des réponses (R_1 à R_3) des ouvriers (S_1, S_n). (d'après Grassé, 1959 et Grassé, 1984)

J'emprunte cette figure à (Ferbert, 1994)

Pierre Paul Grassé prend l'exemple de la construction d'une termitière. A chaque étape, l'état de la construction correspond à une stimulation qui déclenche chez les termites qui la rencontrent des actions de construction, actions qui conduisent à un nouvel état de la construction correspondant à une stimulation possiblement différente qui déclenche à son tour de nouvelles actions de construction, jusqu'à l'achèvement de la termitière. Pour cela il suffit d'accorder aux termites deux règles individuelles.

(a) Fabriquer une boulette de terre, l'imprégner d'une phéromone spécifique et se déplacer pour remonter le gradient de phéromone présent dans l'environnement.

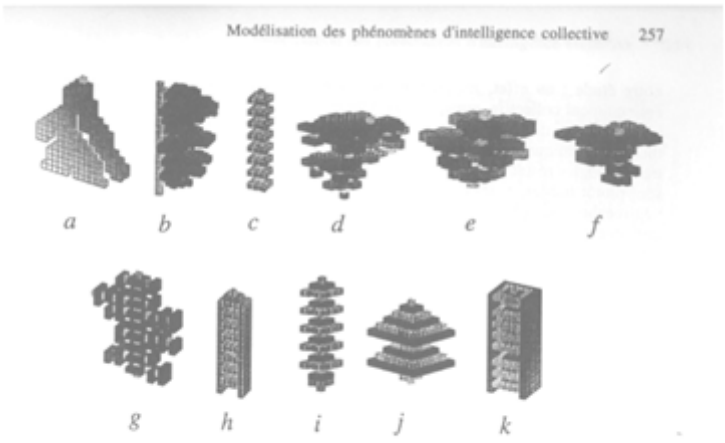
(b) Déposer cette boulette de terre au point de concentration en phéromone maximum (Ferbert, 1994).



J'emprunte cette figure à (Ferbert, 1994)

Au départ les termites déposent leurs boulettes de façon aléatoire. Si elles sont peu nombreuses l'évaporation assez rapide des phéromones ne permet pas l'apparition de structures. Mais si la concentration de termites dans un même territoire est suffisante, quelques premiers regroupements de boulettes pourront se produire, créant des points attracteurs augmentant la probabilité que d'autres boulettes y soient déposées. Ce feedback positif produit la formation de piliers : par le jeu de la vitesse d'évaporation des phéromones et des parcours moyens des termites, on peut montrer que les piliers devront se répartir à des distances approximativement égales puis croitre en se rejoignant par des arches pour former une plateforme uniforme sur laquelle peut démarrer une nouvelle phase de construction de piliers. Dès 1977, Jean-Louis Deneubourg a proposé un modèle de réaction-diffusion pouvant rendre compte de l'émergence de la répartition régulière des piliers. Puis d'autres modélisation ont pu compléter et valider cette explication (P. Kugler, Kelso, & Turvey, 1982).

Suivant cette méthode, en considérant un plus grand répertoire de stimuli provoquant des réponses différentes, on peut rendre compte de constructions très complexes comme les nids de guêpes (avec par exemple une paroi externe et une structure spirale interne). Chaque individu possède un répertoire de séquence stimuli-réponse Sn Rn. Les réponses Rn changent la nature et la configuration des stimuli présents dans l'environnement2.



J'emprunte cette figure à (Ferbert, 1994)

Chaque étape de la construction réalisée par les actions de construction Rn fait apparaitre un stimuli Sn+1 provoquant une réponse Rn+1 qui conduira à une nouvelle étape porteuse de stimuli Sn+2, jusqu'à l'achèvement de la construction. Ceci étant valable pour tous les individus de la même population, il y a une coordination indirecte des activités individuelles. Lors de la construction de la structure du nid (termitière, fourmilière ou nids de guêpes), la coordination des activités individuelles est réalisée par cette structure. Les modélisations montrent que ces règles locales suffisent pour rendre compte de l'émergence de structures complexes. Les simulations les plus intéressantes sont réalisées par la marche aléatoire d'automates asynchrones dans un espace discret tridimensionnel. Elles permettent d'explorer systématiquement le champ des structures globales stables possibles dont bon nombre (mais pas toutes) se retrouvent dans la nature (G. Theraulaz & Bonabeau, 1995 ; Guy Theraulaz, Bonabeau, Goss, & Deneubourg, 1994).

Bilan intermédiaire

Les agents réactifs ne font que répondre de façon déterminée à leur environnement en produisant des actions qui le modifient. Leurs interactions à travers cet environnement collectivement modifié donnent lieu à une dynamique collective complexe possédant des états stables attracteurs pour lesquels les comportements déterminent un environnement qui a justement pour effet de reproduire ces comportements. Ce sont ces états collectifs que l'on appelle organisation, structure, ou fonctionnalité, émergentes (Drogoul, Ferber, Corbara, & Fresneau, 1992 ; G. Theraulaz & Deneubourg, 1994).

Peut-on dire que l'on a là une causalité circulaire ? On voit bien le rôle des traces laissées par les actions individuelles dans le milieu partagé par les agents : le tout, matérialisé par la fourmilière en cours de construction, est la cause structurante des actions individuelles qui ensemble réalisent cette construction et son maintien face aux perturbations.

Cependant, la forme émergente est en définitive entièrement déterminée pour chaque espèce de fourmi. Etant données les règles individuelles de comportement que l'on peut supposer génétiquement programmées, telle espèce, dans des conditions normales, produira toujours le même type de fourmilière. Il y a bien émergence d'une structure globale, mais une variation de cette structure n'est pas stable : on ne voit pas qu'une modification de la forme globale de la colonie puisse aboutir à un nouvel équilibre. Au contraire, face à une perturbation (par exemple une entaille de la termitière), il y a un attracteur de la dynamique du système qui permettra une réparation et aboutira toujours au même type d'état final. Il n'y a donc pas ici de causalité descendante au sens strict.

Voyons donc un autre cas de propriété émergente chez les insectes sociaux : la différenciation sociale des rôles individuels, c'est-à-dire une forme de division du travail.

2. Polyéthisme

Les insectes sociaux se caractérisent par une différenciation des rôles joués par les individus qui composent la colonie, ce qu'on appelle polyéthisme. En premier lieu, il y a différenciation entre les organismes qui participent à la reproduction et les organismes stériles qui réalisent seulement le maintien de la colonie. Parmi ces derniers, en particulier dans de nombreuses espèces de fourmis, on observe une spécialisation individuelle. Certains individus se consacrent aux soins aux œufs, d'autres aux soins des larves, d'autres aux soins des cocons, d'autres à la recherche de nourriture ou encore d'autres au combat pour la protection de la colonie. Dans certaines espèces, ce polyéthisme est entièrement déterminé par l'âge, chaque individu adoptant successivement différents rôles. Mais dans d'autres espèces, la différenciation est le résultat d'un mécanisme de régulation sociale donnant à la colonie d'importantes capacités adaptatives (Corbara, Lachaud, & Fresneau, 1989 ; A. Lenoir & Ataya, 1983). On parle ainsi d'homéostasie sociale (Emerson, 1956). Les études sur le terrain, ou avec des colonies de fourmis élevées en laboratoire, permettent de suivre chaque fourmi individuellement pour

mesurer ses activités. On vérifie ainsi que les individus restent attachés à des tâches spécifiques et peuvent être répartis en différentes castes. En traçant le sociogramme donnant la répartition des individus suivant les castes dans une colonie, on vérifie sa stabilité dans l'espèce (Lachaud & Fresneau, 1987). On est alors étonné de découvrir que, contrairement à la fameuse fable de Jean de La Fontaine, il existe une caste assez nombreuse et remarquablement stable d'individus inactifs : des fourmis qui se déplacent de lieu en lieu mais qui ne réalisent jamais une tâche quelconque.

Pour étudier la régulation de cette organisation sociale, on peut alors réaliser des « sociotomies », c'est-à-dire, soit la séparation artificielle de la colonie en deux groupes, soit la destruction d'une caste. On observe alors la rapide reconstitution de la répartition sociale. Des individus quittent leur ancienne caste pour acquérir une nouvelle spécialisation. Toutes les castes contribuent à ce renouvellement, y compris, mais pas beaucoup plus, la caste des inactifs. D'ailleurs, si c'est cette caste qui est spécifiquement détruite, elle vient rapidement à se reconstituer à partir des autres castes.

Les modélisations par des systèmes multi-agents réactifs montrent que ces observations peuvent s'expliquer suivant un mécanisme très simple (Drogoul et al., 1992 ; Guy Theraulaz, Bonabeau, & Deneubourg, 1998) :

1. Chaque agent peut réaliser les différentes tâches possibles (soins aux œufs, soins aux larves, aux cocons, etc.) : T1, T2, T3, …
2. Pour chacune de ces tâches correspond un stimulus spécifique (différentes phéromones émises, par les œufs, les larves, les cocons, etc.) : S1, S2, S3, …
3. Tant que la tâche n'est pas réalisée, ce stimulus augmente progressivement.
4. Au contraire quand un agent réalise une tâche donnée, le stimulus correspondant est diminué.
5. La tâche est réalisée par un agent si le stimulus qu'il reçoit dépasse un seuil donné spécifique : $\Theta 1, \Theta 2, \Theta 3, \ldots$
6. On considère de plus que ces seuils de sensibilité sont modulés en fonction de l'activité : quand une tâche donnée est réalisée par un agent, le seuil de sensibilité correspondant est légèrement diminué : cet agent sera donc plus sensible au stimulus en question. Inversement, si une tâche n'est jamais réalisée, le seuil de sensibilité remonte progressivement jusqu'à son maximum. Ce sont là des feedbacks positifs qui tendront à spécialiser de plus en plus les agents.

En ajustant ces paramètres, on peut retrouver les structures de population et les capacités de régulation observées dans la nature

(Dorigo, Bonabeau, & Theraulaz, 2000 ; Drogoul et al., 1992 ; Ferbert, 1994). Si une caste vient à disparaitre, le stimulus correspondant à la tâche qu'elle réalisait croitra progressivement jusqu'à un niveau tel que même les agents spécialisés pour une autre tâche seront mobilisés. En réalisant cette nouvelle tâche, leur sensibilité augmentera (leur seuil de sensibilité diminuera) et ils seront progressivement entrainés vers cette nouvelle spécialisation jusqu'à ce que par leurs actions ils réussissent à diminuer le stimulus anormal et que l'on retrouve la structure de population initiale.

On peut alors aussi comprendre l'existence et la robustesse d'une caste d'agents inactifs, c'est-à-dire d'agents dont les seuils de sensibilité sont tels que les stimuli d'aucune tâche sont suffisants pour déclencher leur activité. C'est ce qui se produira nécessairement s'il y a assez d'agents pour réaliser l'ensemble des tâches nécessaire et donc pour maintenir les stimuli suffisamment bas. Les agents les moins spécialisés (les moins sensibles) auront de moins en moins l'occasion de réaliser une tâche et seront donc de moins en moins sensible aux stimuli de leur environnement.

On voit là encore le fonctionnement du principe de stigmergie : la régulation et la coordination générale qui permet la différenciation des rôles sociaux se réalise via les modifications de l'environnement partagé, environnement conçu comme ensemble de stimuli spatialement répartis, modifiés suivant l'activité des agents. Comme dans le cas de la construction du nid, cette coordination indirecte se réalise bien par une forme de causalité circulaire : les actions de chaque agent sont déterminées par l'état de son environnement, état de l'environnement résultant de la somme des actions de l'ensemble des agents. Notons aussi que la régulation de cette organisation sociale exige de plus que les stimuli reçus puissent modifier la sensibilité aux stimuli qui pourront ensuite être perçus. Ainsi la rétroaction du tout sur les parties ne se réalise pas seulement via les stimuli de la structure de l'environnement partagé, mais aussi via une modulation des sensibilités des différents agents à ces stimuli.

Il y a bien émergence d'une structure de population mais là encore, elle est strictement déterminée pour chaque espèce. On ne voit pas qu'une modification artificielle de cette structure globale puisse produire les conditions de son maintien. Il n'y a donc toujours pas ici de causalité descendante au sens strict.

Une autre propriété des animaux sociaux, qui semble plus propice à la compréhension d'une causalité circulaire complète, est celle de l'émergence de la frontière du SdS : comment la frontière d'un système peut être produite par les éléments qu'elle circonscrit ?

3. Visa colonial

Chez certaines fourmis (Fourmis Ponérines du genre Pachycondyla), les différentes colonies d'une même espèce qui partagent un même territoire restent cependant bien séparées. Les fourmis d'une colonie ne participeront jamais aux activités d'une autre colonie (Fresneau & Errard, 1994 ; Lahav, Soroker, Hefetz, & Vander Meer, 1999 ; Alain Lenoir, Fresneau, Errard, & Hefetz, 1999 ; Lucas, Pho, Jallon, & Fresneau, 2005). Nous ne proposons ici qu'une description très simplifiée de ce phénomène en ne conservant que les éléments les plus importants nécessaires à son explication.

La clôture des colonies s'explique par ce que l'on appelle un "visa colonial". Il s'agit d'une signature chimique commune, faite d'un mélange de molécules secrétées par les fourmis (différents hydrocarbures) qui est portée sur la cuticule de tous les individus d'une même colonie (Soroker, Fresneau, & Hefetz, 1998). Il permet à chaque fourmi de discriminer les fourmis d'autres colonies de la même espèce. Lors d'une rencontre entre deux fourmis, si, après palpation antennaire, les odeurs des visas se révèlent différentes, un comportement de rejet ou de combat se produit[4]. Deux modes d'explication de cette discrimination sont possibles.

Soit, selon une approche que l'on peut dire "internaliste", chaque fourmi possèderait un template neuronal correspondant au visa de sa colonie, template neuronal qui lui permettrait de reconnaitre l'odeur étrangère. Dans ce cas, le mécanisme de reconnaissance et la règle de décision seraient des mécanismes internes innés ou possiblement appris lors des premières interactions dans la fourmilière.

Soit, selon une approche que l'on peut dire plutôt "externaliste", le template de la fourmi est le visa qu'elle porte sur sa propre cuticule : lors de la rencontre d'une autre fourmi, son comportement est déterminé par la comparaison entre le visa qu'elle porte et celui de la fourmi rencontrée. S'ils sont différents, il y a un conflit, s'ils sont semblables, la relation reste amicale.

L'intérêt de cette seconde approche est de permettre d'expliquer la formation et la spécificité du visa colonial (et l'on verra qu'elle est confortée par des données empiriques expérimentales). Notons tout d'abord que dans une colonie de ces fourmis Ponérines, les individus peuvent être légèrement génétiquement différents (si différents mâles ont contribué à la formation de la spermathèque de la reine lors du vol nuptial). Ainsi, chaque fourmi sécrète différentes proportions des molécules caractéristiques du visa sur leur propre cuticule. Lors des interactions entre congénères, si l'odeur rencontrée est suffisamment semblable à l'odeur portée, il y a échange et mélange des hydrocarbures cuticulaires, ce qui tend à harmoniser les signatures chimiques que chacun porte sur sa cuticule. Par les échanges permanents des fourmis entre elles dans et hors la fourmilière, le visa porté par chaque individu est le produit de toute la colonie. Chaque fourmi ne contribue individuellement que très peu à la composition du visa qu'elle porte.

Dans ce processus de moyennisation permanente, le visa d'une colonie reste globalement stable, alors même que les fourmis meurent et sont remplacées par des nouvelles. Les jeunes fourmis, dès leur passage à l'état adulte, adoptent le visa colonial qu'elles peuvent cependant transformer très légèrement en y ajoutant leur petite touche individuelle. Ce qui assure la stabilité globale du visa, c'est essentiellement son rôle de template déterminant les comportements de rejet des fourmis étrangères. Cependant, ce n'est ni la fourmi, ni même la reine de la colonie qui en prédétermine la nature.

Pour le prouver, une expérience fascinante a été réalisée. Il s'agit du transfert artificiel d'une fourmi d'une colonie à une autre. Une fourmi d'une colonie A est nettoyée pour lui retirer les hydrocarbures qu'elle porte sur la cuticule, puis elle est badigeonnée avec le visa colonial de la colonie B (extrait à partir d'un échantillon du sol à l'entrée de la fourmilière B). On dépose ensuite la fourmi maquillée parmi des représentants de la colonie B. Les premiers contacts peuvent être plus ou moins difficiles et les palpations antennaires peuvent durer plus longtemps que d'ordinaire (la méthode d'extraction ne permet probablement pas d'obtenir une signature chimique qui reflète exactement le visa de la colonie d'accueil). Mais si la fourmi étrangère est acceptée, elle est entrainée au cœur de la fourmilière pour un véritable toilettage. Dès lors, elle est complètement adoptée. Elle intègre définitivement sa nouvelle colonie et participera loyalement aux combats contre les fourmis de colonies étrangères, y compris lors de rencontre

avec ses anciennes congénères de la colonie A ! En effet, la fourmi adoptée règle son comportement sur la visa qu'elle porte puisqu'elle s'en sert pour le comparer à celui de la fourmi rencontrée.

Suivant ce modèle explicatif, le "visa colonial" est une marque externe portée par l'agent, marque qui résulte de la moyenne des contributions de l'ensemble des fourmis de la population. L'adoption d'une nouvelle fourmi ne le modifiera que légèrement en apportant sa touche particulière étant donné ses particularités génétiques.

Généralisation

Si l'on systématise cette explication (en quittant peut-être la plausibilité biologique naturelle) on peut admettre qu'une même fourmi puisse être transférée dans n'importe quelle colonie de son espèce (par maquillage et transfert), ce qui ne produirait qu'un léger déplacement du visa moyen qui marque la différence entre l'intérieur et l'extérieur de cette colonie. Cette transformation complète du comportement individuel permet de penser la possibilité de colonies artificielles stables par recomposition ou fusion de colonies. Et si l'on pouvait modifier artificiellement le visa moyen (en modifiant simultanément le visa porté par les agents de la population), une nouvelle frontière intérieur/extérieur serait définie, certains agents acceptés, d'autres rejetés. Etant données les particularités individuelles des agents composants la population conservée, le visa devrait évoluer vers un nouvel état stable.

Dès lors, on voit bien que le visa n'est pas déterminé par un agent particulier, mais par l'ensemble de la population, et les limites de cette population sont déterminées par ce visa. On peut dire qu'il y a émergence du visa colonial dans la mesure où il détermine les interactions locales entre agents… et que ce sont ces interactions (rejet ou adoption) qui en retour assurent la stabilité de ce visa et le distingue des autres visas possibles. Ce serait là la causalité circulaire que l'on recherche, ni simple causalité descendante (le visa détermine les limites de la colonie), ni simple causalité ascendante (le visa est déterminé par les individus qui composent la colonie), mais les deux simultanément.

4. Schème explicatif de la causalité circulaire

A partir de ces propositions théoriques tirées du monde biologique, on peut tenter d'abstraire quelques principes généraux d'un type de causalité

circulaire dans les systèmes de systèmes. Reprenons tout d'abord les leçons que l'on peut tirer des modèles biologiques considérés plus haut.

Dans les trois cas que nous avons examinés, la construction du nid, le polyéthisme et la clôture de la colonie, on voit à l'œuvre un principe de stigmergie puisque c'est bien le produit de l'ensemble des activités des agents (la construction en cours, la répartition des phéromones, ou le visa colonial) qui en retour détermine ces activités.

Stigma

Mais quel est le "stigma" de cette "stigmergie" ? L'intérêt de la racine grecque du terme "stigma" (στιγμα) est de désigner à la fois la marque (la marque au fer rouge sur le corps des esclaves, ce qui donnera « stigmates » et « stigmatisation ») et la piqure (ce qui donnera le terme "stimulus"). Donc le « stigma » est à la fois une marque (une inscription) et un input sensoriel possible. Input sensoriel qui, suivant les règles de comportement des agents, déclenchera des actions produisant ou modifiant ces marques.

1. Dans le cas des constructions de nid, le "stigma" est une configuration locale de la construction en cours.
2. Dans le cas du polyéthisme, le "stigma" correspond à la répartition spatiale des différents stimuli émis dans la colonie.
3. Dans le cas du visa colonial, le "stigma" est une trace matérielle, physico-chimique, portée par chaque individu.

Dans les trois cas, les propriétés émergentes (la construction achevée, la structure sociale ou la frontière de la colonie) sont produites par itération (récursivité) des actions distribuées entre les individus dans l'espace et dans le temps. Dans les trois cas, les marques produites ou modifiées par les actions des agents, déterminent ou modulent ces actions.

Milieu intérieur

L'émergence des propriétés du SdS se fonde sur un "milieu intérieur".

1. Du point de vue des agents, les marques qu'ils produisent ou modifient sont dans un environnement *extérieur* : elles perdurent pour être rencontrées par d'autres agents ou par le même agent plus tard. De plus, elles ont leur propre causalité indépendante des agents : évaporation des phéromones, collage des boulettes de terre entre elles, emboîtement des éléments de construction, émission des phéromones par les œufs ou les larves, mélange des odeurs, etc.

2. Du point de vue du SdS de la colonie, ces marques sont *intérieures* : le nid collectif en construction est à l'intérieur de la colonie, comme les phéromones sont à l'intérieur du nid. Ceci est encore plus clair pour le visa colonial qui est bien à la fois extérieur pour les agents qui le portent mais qui est intérieur à la colonie, spécifique aux agents qui la composent, différent des visas des autres colonies.

En déterminant les frontières de la colonie, ce milieu intérieur définit alors une différence avec un milieu extérieur pour cette colonie en tant que telle.

La marque saisie

On a vu qu'une pleine causalité circulaire ne pouvait être mise en évidence que dans le cas du visa colonial. Il est alors particulièrement intéressant de noter qu'ici, contrairement au cas de la construction du nid, la règle de comportement de l'agent n'est pas inscrite en lui de façon innée. Déjà, dans le cas de la régulation de la différenciation sociale, on a vu que les rétroactions du tout sur les parties consistait en une modulation des sensibilités individuelles des différents agents. Dans le cas du visa colonial, la marque portée définit le comportement individuel.

En effet, l'opération de comparaison entre les visas lors de l'interaction entre deux fourmis peut être décrite suivant deux conceptions profondément différentes. Soit on la conçoit comme une opération de décision, soit comme une opération de perception.

1. **Décision** - Lors d'une rencontre, la fourmi recevrait deux stimuli : celui correspondant à la marque qu'elle porte et celui correspondant à une marque posée sur la cuticule de sa partenaire. Elle prendrait ensuite une décision par comparaison entre ces deux stimuli (partage des visas ou combat et séparation).
2. **Perception** - Le visa porté par la fourmi définit les stimuli auxquels elle est sensible. Ce visa sature ses récepteurs olfactifs et n'est donc pas pour elle un stimulus : les odeurs dans l'environnement ne sont des stimuli que dans la mesure où elles sont différentes du visa porté (on ne perçoit pas un stimulus constant comme on ne perçoit pas sa propre odeur). Ces stimuli provoquent alors justement des actions qui visent à réduire cette différence, soit par moyennisation, soit par séparation (éloignement du stimulus).

Dans la première conception, il y aurait séparation entre d'une part les perceptions et d'autre part, la comparaison et l'action. Les fourmis percevraient toutes deux les mêmes choses et les mêmes différences. Les stimuli sont pensés comme des données « objectives » partagées par

l'ensemble des individus de l'espèce.

Dans la seconde approche, l'action est guidée par un jugement directement perceptif. Le visa est une marque *saisie* par la fourmi, marque qui définit sa sensibilité aux stimuli possibles produits par les marques posées dans l'environnement ou sur la cuticule des partenaires. En cela, la marque portée par une fourmi caractérise son monde propre, l'Umwelt, de cette fourmi. Ici, les fourmis ne perçoivent pas les mêmes choses suivant les visa qu'elles portent. Lors d'une rencontre, ce qui est en jeu, c'est un croisement des mondes propres. Si les visas sont suffisamment proches, il y a ajustement de ces mondes propres par moyennisation. Si non, il y a séparation. Les stimuli sont des données « subjectives » constituées d'après les marques portées.

Nous adoptons ici cette seconde conception qui a l'avantage de bien montrer comment la causalité descendante module les comportements individuels. Le stigma n'est pas seulement une marque porteuse d'un stimulus pour autrui, c'est un facteur qui modifie la règle de comportement. La marque portée par la fourmi définit la façon dont elle interprétera la marque portée par une autre fourmi. Il nous semble utile d'insister sur cette dualité de la marque (du stigma de la stigmergie).

1. D'une part, le visa est une marque *posée* sur le sol et sur les cuticules des fourmis. Pour chaque fourmi, c'est une source de stimuli possibles (c'est l'objet de sa perception lors de ses interactions avec d'autres fourmis).
2. D'autre part, le visa est une marque *saisie*, portée sur la cuticule. Pour chaque fourmi, il est comme un instrument dont elle se sert pour évaluer le visa qu'elle perçoit sur une autre fourmi.

D'une part, le visa est une chose *constituée* dans la perception de la fourmi, une marque source de stimuli qui déterminera son comportement. D'autre part, le visa est *constituant* de cette activité perceptive et définit le champ des stimuli possibles.

Schème général de la causalité circulaire

Sur cette base, on peut proposer quelques hypothèses générales sur les conditions d'apparition d'une émergence par causalité circulaire dans les SdS. Ce cadre théorique qui généralise l'idée de stigmergie ne peut concerner qu'un type d'émergence et ne préjuge pas de l'existence d'autres explications pour d'autres formes d'émergence. Il n'est pas ici nécessaire que les règles de décision locales des systèmes de premier

ordre soient très complexes pour que puissent s'observer l'émergence de propriétés globales au niveau du SdS. Et inversement, il est possible que ces systèmes soient en eux-mêmes très complexes et puissent agir avec une relative autonomie sans que cela empêche ces émergences. Nous suivons donc un principe de parcimonie explicative, pour vérifier si des facteurs simples, ne définissant que des règles d'interaction locales, sont suffisants pour rendre compte des phénomènes collectifs observés. Pour cela, on attribuera le minimum de capacité aux systèmes de premier ordre pour expliquer les propriétés émergentes pour le système de systèmes qu'ils composent. Même si l'on peut admettre que les systèmes de premier ordre (les agents) possèdent par ailleurs des capacités cognitives complexes de perception, de représentation et de calcul, il s'agira de voir si une explication de leur comportement simplement déterminé en réaction à leur environnement suffit à rendre compte des phénomènes émergents. Cela permettra d'ailleurs peut-être de comprendre pourquoi diverses formes d'émergence peuvent se produire à l'insu des acteurs insérés dans un SdS.

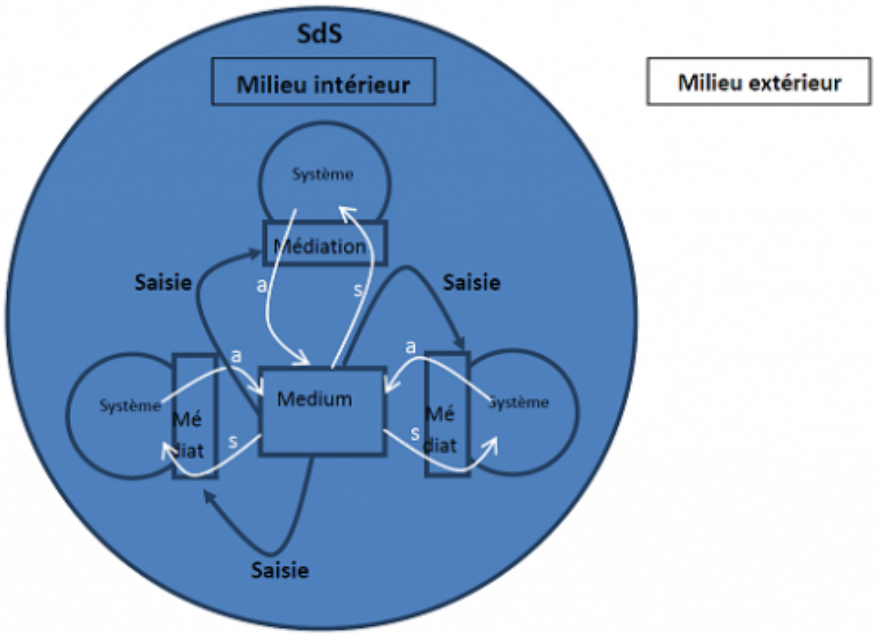
Donc, par abstraction à partir des modèles animaux que nous avons décrits, nous pouvons maintenant proposer un schéma général. Pour que s'observe une émergence au niveau du SdS, il suffit de rassembler les conditions suivantes.

1. Les actions des systèmes de premier ordre doivent être en partie modulées par un environnement qui les dépasse et les contient. Chaque agent interprète son environnement suivant son point de vue local et ses moyens de perception et d'action.
2. Les actions des agents modifient localement cet environnement partagé.
3. L'environnement est le lieu d'agrégation des actions modificatrices locales : par sommation, emboîtement, construction, moyennisation, ou toute autre forme de causalité physique. Il réalise la synthèse concrète des actions et interactions.
4. A tout moment, c'est l'environnement produit ou modifié par l'ensemble des autres agents, que chaque agent soumet à son interprétation. C'est là la condition pour que la dynamique populationnelle ne soit pas une simple juxtaposition de dynamiques indépendantes. C'est via l'environnement que le tout rétroagit sur les parties.
5. La dynamique collective complexe du SdS se réalise par itération de cette causalité circulaire : interprétation de leur environnement local par les agents, - action des agents sur cet environnement, - nouvelle interprétation de l'environnement modifié, - nouvelles actions, etc. Une telle dynamique peut avoir des états stables attracteurs pour lesquels les comportements individuels déterminent un environnement qui a justement pour effet de produire ces comportements. Ces états stables correspondent à

l'émergence de structures ou de fonctionnalités globales.

6. Pour bien comprendre les composantes de cette causalité circulaire, il faut donc définir précisément ce que l'on entend ici par « environnement ». Pour cela la notion de stigmergie est essentielle et permet de définir un milieu intérieur du SdS. Relativement à une explication de l'émergence dans un SdS,
    - pour les systèmes de premier ordre (les agents), ne font sens dans l'environnement que les marques interprétables comme des stimuli ;
    - pour le système de systèmes, n'ont de sens que les stimuli des systèmes de premier ordre qui provoquent des actions produisant ou modifiant des marques qui seront source de stimuli pour au moins un système du SdS.
    - En même temps, ces marques peuvent subir une évolution intrinsèque, propre à leur matérialité. Là encore, n'ont de sens que leurs changements qui, directement ou indirectement, affectent les stimuli pour les systèmes de premier ordre.
7. Le "milieu intérieur" du SdS correspond aux marques matérielles, extérieures aux systèmes qui le composent ; il intègre les actions de ces systèmes et en retour peut moduler leurs interactions et définir la frontière du SdS.
   La leçon la plus importante que nous retenons des modèles biologiques examinés est une dualité de statut de ce milieu intérieur. Il n'est pas seulement une source de stimuli produite par la somme des actions individuelles ; ce que l'on peut appeler le *medium* des interactions ; c'est aussi la source de modulations des perceptions et actions individuelles ; ce que l'on peut appeler la *médiation* des interactions.
    - Le médium est l'ensemble des marques « posées », interprétables comme stimuli possibles. Il est en extériorité pour les systèmes de premier ordre.
    - Mais le milieu est en même temps l'ensemble des marques qui peuvent être « saisies » par les systèmes de premier ordre. En cela, il est une médiation qui définit les stimuli portés par les marques présentes et les actions à réaliser.

Le milieu est constitué comme médium et constituant comme médiation5.



Le médium consiste en des marques sources de stimuli (s) qui provoquent des actions (a) qui modifient ces marques. Les marques peuvent aussi être saisies et devenir les médiations qui définissent les actions et stimuli possibles.

Représentations externes

D'autres approches se proposent d'expliquer l'émergence des structures collectives des SdS en accordant aux systèmes composants le statut d'observateurs internes. Dotés de capacités représentationnelles et d'un langage de description, ils pourraient percevoir et reconnaitre les structures collectives du système qui les englobe. Les individus règleraient leur comportement sur les phénomènes sociaux qu'ils perçoivent. Ici, nous ne nous sommes pas donnés d'emblée cette facilité d'un accès représentationnel des parties aux propriétés du tout. Au contraire, dans notre explication la limitation des agents signifie qu'ils ne disposent que d'un accès local à leur environnement. Cependant, le cas du visa colonial est précieux en ce qu'il permet de concevoir une genèse de ce type de représentation. En effet, on peut dire que le visa porté par les individus est une *représentation externe* de l'identité de la colonie. Une piste pour expliquer comment pourraient fonctionner des représentations symboliques internes serait donc de partir de représentations externes, construites et modulées par leur usage dans les interactions, représentations qui seraient en même temps saisies individuellement pour définir ces modes d'interactions. Pour la fourmi, le visa qu'elle porte est une forme d'accès local au tout du groupe, une « connaissance » de

ce qui est ou n'est pas de la colonie.

Insistons cependant sur le fait que la condition de cette saisie est précisément l'existence *externe* des marques. « L'interprétation » des marques est stable quand elle définit des interactions dont les effets sont précisément de reproduire ces marques. La dualité du "stigma" à la fois marque constituée et caractère constituant de l'activité est donc ce qui permet de maintenir une alternative externaliste vis-à-vis d'autres approches de l'émergence qui exigent des agents cognitifs dotés d'emblée de capacités représentationnelles internes6.

Conclusion

Il ne s'agit pas ici de chercher une quelconque continuité entre « monde insectes » et « monde humain ». Nous avons seulement tenté de dégager un schème explicatif fonctionnel de la causalité circulaire à partir d'un cas d'étude suffisamment simple. Simplicité qui a permis de décrire avec précision un mécanisme bien particulier puisqu'il semble contredire le réductionnisme et le déterminisme qui sont généralement associés au mécanicisme. Une fois doté de cet outil conceptuel, il s'agit seulement de s'en servir et de vérifier s'il fonctionne, ou pas, suivant telle ou telle situation d'usage.

Milieu technique

La clé de la causalité circulaire est dans la dualité du "stigma" à la fois marque constituée comme stimuli et marque constituante. Elle est semblable à la dualité de l'outil technique. A la fois *objet constitué* posé devant nous, fabriqué, échangé - et pouvoir *constituant* quand il est saisi, utilisé pour ouvrir un champ spécifique d'actions et de perceptions possibles. Dans le cas d'un visa colonial, l'outil est dupliqué, partagé entre les individus. Dans le cas de la construction du nid, l'inscription technique correspond à une architecture de l'environnement, là encore à la fois constituée, perçue par les individus, et constituante, régulant ou modulant les activités et interactions individuelles. Dans les deux cas, la rétroaction du tout sur les parties se réalise par le milieu technique intérieur à la société, milieu produit par les activités techniques des agents, et qui peut donc se transformer suivant ces actions.

Modélisation

Dans la mesure où l'ingénierie des SdS vise à concevoir des ensembles de systèmes en interaction, elle en vient le plus souvent à représenter les problèmes sous forme de réseau, c'est-à-dire un ensemble de nœuds (les systèmes) reliés par des liens définissant leur mode d'interaction. Mais, si le modèle bioinspiré que nous venons de présenter peut avoir une pertinence pour la compréhension des systèmes socio-techniques, il faut être attentif à ce qui semble échapper à ce type de modélisation : un environnement partagé, modifiable et saisissable. Ce que nous avons appelé un milieu intérieur. Cette conception de l'émergence est certainement irréductible à une modélisation en terme de dynamique d'un réseau (connexionnisme). En effet, le milieu intérieur ne peut être modélisé, ni comme un agent ou un nœud particulier d'un réseau, ni comme un lien entre ces nœuds. Au contraire, le milieu intérieur module les interactions, les liens entre les nœuds du réseau, il est modifié par ces interactions, et réalise une synthèse répartie dans l'espace suivant des gradients ou des structures.

Milieu intérieur

Il n'est pas certain que tous les SdS non biologiques possèdent un milieu intérieur au sens où nous l'avons défini. Mais c'est au moins un bon point de méthode de se demander, face à un SdS, qu'elle pourrait être le milieu qui assure une causalité circulaire donnant lieu à des phénomènes d'émergence. Suivant les cas, un tel milieu pourrait être soit un environnement physique, soit un espace d'écriture et de symboles matériels… à définir suivant bien sûr les frontières que l'on accorde à ce SdS.

Bibliographie

Le texte transformé a été copié dans le presse-papier : il ne vous reste plus qu'à le coller (Ctrl-V) dans SPIP. Bonne chance !

Autran, F., Auzelle, J.-P., Cattan, D., Garnier, J.-L., Luzeaux, D., Mayer, F., … Ruault, J.-R. (2008). Coupling component systems towards systems of systems. *arXiv preprint arXiv:0805.3196*.

Boardman, J., & Sauser, B. (2006). System of Systems-the meaning of of. In *System of Systems Engineering, 2006 IEEE/SMC International Conference on* (p. 6–pp). IEEE.

Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence : from natural to artificial*

systems. Oxford University Press, USA.

Bonabeau, E., Theraulaz, G., Deneubourg, J. L., Aron, S., & Camazine, S. (1997). Self-organization in social insects. *Trends in Ecology & Evolution*, *12*(5), 188–193.

Bonabeau, Eric, & Theraulaz, G. (1999). A Brief History of Stigmergy. *Artificial Life*, *5*(2), 97–116.

Bousquet, F., Barreteau, O., d'Aquino, P., Etienne, M., Boissau, S., Aubert, S., … Castella, J.-C. (2002). Multi-agent systems and role games : collective learning processes for ecosystem management. *Complexity and ecosystem management : The theory and practice of multi-agent systems*, 248–285.

Brooks, R. A.(1991). Intelligence without representation. *Artificial intelligence*, *47*(1-3), 139–159.

Corbara, B., Lachaud, J.-P., & Fresneau, D. (1989). Individual variability, social structure and division of labour in the ponerine ant Ectatomma ruidum Roger (Hymenoptera, Formicidae). *Ethology*, *82*(2), 89–100.

DeLaurentis, D. (2005). Understanding transportation as a system-of-systems design problem. In *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 123).

Dessalles, J. L., Ferber, J., & Phan, D. (2008). Emergence in Agent-Based Computational Social Science : Conceptual, Formal, and Diagrammatic Analysis. In *Intelligent complex adaptive systems* (p. 255–299). IGI Global.

Dorigo, M., Bonabeau, E., & Theraulaz, G. (2000). Ant algorithms and stigmergy. *Future Generation Computer Systems*, *16*(8), 851–871.

Drogoul, A., Ferber, J., Corbara, B., & Fresneau, D. (1992). A behavioral simulation model for the study of emergent social structures. *Toward a practice of autonomous systems*, 161–170.

Drogoul, A., Vanbergue, D., & Meurisse, T. (2002). Multi-agent based simulation : Where are the agents ? In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation* (p. 1–15). Springer.

Emerson, A. E.(1956). Regenerate behavior and social homeostasis of termites. *Ecology*, *37*(2), 248–258.

Ferber, J. (1997). Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective. InterEditions.

Ferber, J. (1999). Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence (Vol. 1). Addison-Wesley Reading.

Ferbert, J. (1994). Des systèmes multi-agents pour simuler le vivant. *Actes du 2e colloques africain sur la recherche en informatique*, 12–18.

Fresneau, D., & Errard, C. (1994). L'identité coloniale et sa "représentation" chez les fourmis. *Intellectica*, *2*(19), 91–115.

Grassé, P.-P. (1959). La Reconstruction du nid et les Coordinations Inter-Individuelles chez

Bellicositermes Natalensis et Cubitermes sp. La théorie de la Stigmergie : Essai d'interprétation du Comportement des Termites Constructeurs. *Insectes Sociaux*, *6*, 41–82.

Harous, S., Djoudi, M., & Boulanouar, M. (2006). Simulation of a Cell Proliferation Model. In *MSV* (p. 145–154).

Jamshidi, M. (2008). System of systems engineering - New challenges for the 21st century. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, *23*(5), 4-19. https://doi.org/10.1109/MAES.2008.4523909

Jean, M. R. (1997). Emergence et SMA. *JFIADSMA'97*, 324–342.

Kugler, P., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. (1982). On the control and coordination of naturally developing systems. *The development of movement control and coordination*, 5–78.

Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1988). Self-organization, flow fields, and information. *Human Movement Science*, *7*(2-4), 97–129.

Lachaud, J., & Fresneau, D. (1987). Social regulation in ponerine ants. In From individual to collective behavior in social insects : les Treilles Workshop/edited by Jacques M. Pasteels, Jean-Louis Deneubourg. Basel : Birkhauser, 1987.

Lahav, S., Soroker, V., Hefetz, A., & Vander Meer, R. K.(1999). Direct behavioral evidence for hydrocarbons as ant recognition discriminators. *Naturwissenschaften*, *86*(5), 246–249.

Lenay, C. (1994a). Intelligence Artificielle Distribuée : Modèle ou métaphore des phénomènes sociaux. *Revue Internationale de Systémique*, *8*(1).

Lenay, C. (1994b). Organisation émergente dans les populations : biologie, éthologie, systèmes artificiels. *Intellectica*, *2*(19), 9-17.

Lenoir, A., & Ataya, H. (1983). Polyéthisme et Répartition des Niveaux d'Activité chez la Fourmi Lasius niger L. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, *63*(2-3), 213–232.

Lenoir, Alain, Fresneau, D., Errard, C., & Hefetz, A. (1999). Individuality and colonial identity in ants : the emergence of the social representation concept. In *Information processing in social insects* (p. 219–237). Springer.

Lucas, C., Pho, D. B., Jallon, J. M., & Fresneau, D. (2005). Role of cuticular hydrocarbons in the chemical recognition between ant species in the Pachycondyla villosa species complex. *Journal of insect physiology*, *51*(10), 1148–1157.

Maier, M. W. (1998). Architecting principles for systems-of-systems. *Systems engineering*, *1*(4), 267–284.

Niazi, M., & Hussain, A. (2011). Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models : a visual survey. *Scientometrics*, *89*(2), 479.

Picault, S., & Collinot, A. (1998). Designing social cognition models for multi-agent systems through simulating primate societies. In *Multi Agent Systems, 1998. Proceedings. International Conference on* (p. 238–245). IEEE.

Simondon, G. (1989). L'individuation psychique et collective à la lumière des notions de forme, information, potentiel et métastabilité.

Theraulaz, G., & Bonabeau, E. (1995). Coordination in distributed building. *Science*, *269*(5224), 686.

Theraulaz, G., & Deneubourg, J. L.(1994). Swarm Intelligence in social insects and the emergence of cultural swarm patterns. *The Ethological roots of Culture, Eds RA Gardner, AB Chiarelli, BT Gardner & FX Ploojd. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, 1–19.

Theraulaz, Guy, Bonabeau, E., & Deneubourg, J. N.(1998). Response threshold reinforcements and division of labour in insect societies. *Proceedings of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, *265*(1393), 327–332.

Theraulaz, Guy, Bonabeau, E., Goss, S., & Deneubourg, J.-L. (1994). L'intelligence collective. *Pour la science*, *198*, 90–95.

Varela, F. (1989). *Autonomie et connaissance*. Seuil.

Varela, F. J.(1979). *Principles of biological autonomy*. North Holland Nueva York.

Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind : Cognitive science and human experience*. MIT press.

Von Uexküll, J. (1965). *Mondes animaux et monde humain ; suivi de Théorie de la signification*. (Philippe Muller, Trad.) (Denoël). PARIS : Pocket.

---

1 « Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production qui (a) régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui (b) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau.
Il s'ensuit qu'une machine autopoïétique engendre et spécifie continuellement sa propre organisation. Elle accomplit ce processus incessant de remplacement de ses composants, parce qu'elle est continuellement soumise à des perturbations externes, et constamment forcée de compenser ces perturbations. Ainsi, une machine autopoïétique est un système homéostatique (ou, mieux encore, à relations stables) dont l'invariant fondamental est sa propre organisation (le réseau de relations qui la définit). » (F. Varela, 1989 : 45)

2 D'une certaine façon, on retrouve l'idée d'une succession ordonnée de cycles sensorimoteurs comme chez Von Uexküll, mais avec la différence importante qu'ici les actions provoquent des changements du milieu matériel partagé par les différents agents (Von Uexküll, 1965).

3 La probabilité de réponse à un stimuli s pour un seuil q peut être modélisée par une fonction de type

1. $T_q(s) = s^n/(s^n + q^n)$ ou n > 1 détermine la pente du seuil (Dorigo, Bonabeau, & Theraulaz, 2000).

4 Par souci de simplification, nous mettons de côté d'autres composantes qui interviennent dans la détermination du comportement comme les phéromones posées sur le sol.

5 C'est à la suite des remarques de Hugues Choplin que j'ai modifié ce schéma pour qu'il montre trois agents en interaction indirecte à travers un milieu partagé. Une première version (avec seulement deux agents, pouvait laisser entendre que les interactions étaient seulement interindividuelles).

6 Le type de modèle quasi-mécanique que nous proposons ici est abstrait et en cela bien loin des processus d'individuation concrets proposés par Gilbert Simondon. Cependant, le co-développement d'une organisation collective dynamique et de capacités cognitives individuelles minimales, est peut-être une façon de comprendre l'idée de Gilbert Simondon de processus d'individuation qui seraient à la fois psychiques et collectifs : « Les deux individuations, psychique et collective, sont réciproques l'une par rapport à l'autre » (Simondon, 1989).

+

Choplin, Hugues. "Dissensus à propos du « milieu des systèmes » – à partir du texte de Charles Lenay et de la philosophie de Deleuze-Guattari.", 21 novembre 2018, Cahiers COSTECH numéro 2.
http://www.costech.utc.fr/CahiersCOSTECH/spip.php?article91