

5. Systèmes complexes et auto-organisation : comment la vie s'organise sans coordination centralisée

brouillon qui sera publié sur : <https://cooperer-en-stigmergie.net/>

Afin de mieux comprendre la notion de stigmergie, il devient crucial d'approfondir deux notions essentielles, à savoir auto-organisation et émergence. Ces notions constituent deux piliers d'une science récemment apparue, la pensée complexe ou pensée systémique. A ce stade, nous allons donc prendre un peu de recul en allant pour explorer le domaine fascinant des systèmes complexes avant d'étudier d'autres exemples de phénomène d'auto-organisés dans la nature. Ceci nourrira notre réflexion afin de voir dans les chapitres suivants comment nous pouvons inventer des modèles d'organisations humaines basées stigmergie.

Les sciences de la complexité

Ce domaine encore en cours d'évolution, comprends de nombreuses approches (théorie des systèmes, cybernétique, géométrie fractale, théorie du chaos, ... voir l'aperçu en annexe)

Nous aborderons ici le sujet de manière superficielle juste de manière à voir quelques notions clés qui pourront être utiles pour mieux comprendre la stigmergie.

Une partie des apports ci dessous ont été repris et traduits de la page Wikipédia anglophone, enrichis par les écrits de Fritjof Capra, Donella Meadows et Janine Guespin-Michel.

Les systèmes complexes : définition

Un système, défini au sens large, désigne un ensemble d'entités qui, par leurs interactions, leurs relations ou leurs dépendances, forment un tout unifié.

Dans un système simple, une cause va produire une conséquence et le comportement du système va être prédictible en comprenant les éléments qui le compose.

Les systèmes sont dits complexes quand que leurs comportements ne peuvent pas être facilement déduits des éléments qui les composent.

Ceci n'est pas simplement due à un trop grand nombre d'éléments qui rendrait difficile leur analyse, mais à une propriété intrinsèque des systèmes complexes qui les rend imprédictible.

Il importe de bien distinguer la différence entre un système "compliqué" et un système "complexe".

Dans un système compliqué, même s'il y a un grand nombre d'éléments, si on ajoute suffisamment d'ingénieurs et de temps on pourra comprendre son fonctionnement et prédire son comportement.

Tandis que dans un système complexe, où de multiples variables interagissent et s'influencent mutuellement, par nature il est impossible de prédire son comportement.

Les systèmes complexes possèdent de nombreuses propriétés fascinantes qui commencent à être mieux comprises par les chercheurs.

Bien qu'il n'existe pas encore de définition exacte de la complexité généralement acceptée, il existe de

nombreux caractéristiques archétypales des systèmes complexes.

Caractéristiques des systèmes complexes

Les systèmes complexes peuvent avoir les caractéristiques suivantes:

Réseaux

Les composants en interaction d'un système complexe forment un réseau, qui est une collection d'objets distincts et de relations entre eux. Les réseaux peuvent décrire les relations entre des individus au sein d'une organisation, entre des portes logiques dans un circuit, entre des gènes dans des réseaux de régulation de gènes ou entre tout autre ensemble d'entités apparentées.

[image carto système de régulation génétique (cytokinine ??)]

Systèmes ouverts

La frontière du système est définie par rapport à l'environnement, la forme, c'est-à-dire ce qui permet de distinguer le système du « fond », est variable (dans le temps et dans l'espace) car le système se transforme en agissant. Cette frontière peut être floue (par exemple, en considérant le système complexe un « humain », à partir de quel instant la nourriture ou l'air absorbés font-ils partie du corps ?).

La plupart du temps ce qui définit la limite d'un système est une frontière arbitrairement définie par l'observateur pour simplifier la compréhension et l'analyse du système modélisé. En pratique un système n'est jamais complètement isolé de son environnement.

Les systèmes complexes sont donc des systèmes ouverts, c'est-à-dire que de la matière, de l'énergie ou des informations « entrent » ou « sortent » du système en permanence.

Parce que le système est ouvert, il agit sur son environnement et celui-ci agit sur le système.

[OpenSystemRepresentation.svg.png]

Hiérarchie de réseaux imbriqués

Les composants d'un système complexe peuvent être eux-mêmes des systèmes complexes. Par exemple, une économie est constituée d'organisations, composées de personnes, constituées de cellules, qui sont toutes des systèmes complexes. On parle ainsi parfois de "hiérarchie" des systèmes pour décrire le rapport entre ses imbrications. Il s'agit d'une description du niveau d'échelle, pas d'une hiérarchie pyramidale.

Les systèmes complexes sont donc composés de réseaux de réseaux.

Les interactions des composants entre eux forment des « groupes » de composants fortement liés, chaque « groupe » étant en interaction avec les autres, ce qui permet de modéliser le système complexe par niveaux : chaque composant interagit « localement » avec un nombre limité de composants.

On parle de "Small-world" networks (réseaux de "petit monde" pour décrire ces zones de réseaux comprenant de nombreuses interactions locales et un nombre réduit de connexions avec les autres parties du système.

[Liens forts/liens faibles]

Les systèmes complexes naturels présentent souvent de telles topologies. Dans le cortex humain, par

exemple, nous observons une connectivité locale dense et quelques projections d'axones très longues entre des régions situées à l'intérieur du cortex et d'autres régions du cerveau.

Comportements non-linéaires

Dans les systèmes simples, un effet est toujours directement proportionnel à la cause, on parle de comportement "linéaire". De petits changements produisent de petits effets, et les grands effets sont dus soit à de grands changements, soit à une somme de nombreux petits changements.

Les systèmes complexes ont souvent un comportement "non-linéaire", ce qui signifie qu'ils peuvent répondre de différentes manières à la même perturbation en fonction de leur état ou de leur contexte.

Concrètement, cela signifie que dans un système complexe, une petite perturbation peut provoquer un effet extrêmement important, un effet proportionnel, voire aucun effet sur le système.

[4_niveaux_complexite_systeme]

Boucles de rétroaction

La rétroaction (en anglais feedback) est l'action en retour d'un effet sur sa propre origine : la séquence de causes et d'effets forme donc une boucle dite boucle de rétroaction.

Une boucle de rétroaction est un dispositif qui lie l'effet à sa propre cause.

La rétroaction peut avoir lieu soit directement, soit indirectement à travers une chaîne d'interactions avec les autres composants, avec ou sans délai, et peuvent être négatives (produisant un effet d'atténuation, comme par exemple dans le cas du thermostat) ou positives (produisant un effet d'amplification, comme par exemple dans le cas d'une explosion).

(effet boule de neige : effet Larsen, explosion nucléaire, etc.) ; <https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9troaction>

[image exemple du thermostat, voir cybernétique]

La répétition de la réaction (réaction itérative) entraîne :

- son amplification continue (cercle vertueux ou vicieux, selon que cette amplification est jugée favorable ou non), dans le cas de rétroaction positive ;
- son extinction progressive ou non en cas de rétroaction négative.

La rétroaction existe dans de nombreux systèmes tant physiques, biologiques (équilibre des écosystèmes, endocrinologie) que sociaux (finance comportementale, psychologie sociale, sociologie).

Les boucles de rétroaction, sont une des raisons de la non-linéarité du comportement du système.

Dans les systèmes non-linéaires, en revanche, de petits changements peuvent avoir des effets considérables car ils peuvent être amplifiés à plusieurs reprises par une rétroaction auto-renforcée. De tels processus de rétroaction non linéaire sont à la base de l'instabilité et de l'émergence soudaine de nouvelles formes d'ordre si caractéristiques de l'auto-organisation.

Émergence

Une autre caractéristique commune des systèmes complexes est la présence de comportements et de propriétés émergents: ce sont des traits d'un système qui ne sont présents dans aucun de ses composants pris isolément mais qui résultent des interactions, dépendances ou relations qu'ils forment lorsqu'ils sont placés ensemble dans un système.

[[Exemples molécules vs atomes, cellules vs tissus,]]

Par exemple, les termites dans un monticule ont un niveau d'analyse de la physiologie, de la biochimie et du développement biologique, mais leur comportement social et la construction d'un monticule sont une propriété qui émerge de la collection de termites et doit être analysé à un niveau supérieur.

Les automates cellulaires sont un exemple de système complexe dont les propriétés émergentes ont été étudiées de manière approfondie. Dans un automate cellulaire, une grille de cellules, ayant chacune un nombre infini d'états, évolue dans le temps selon un ensemble de règles simples. Ces règles guident les "interactions" de chaque cellule avec ses voisins. Bien que les règles ne soient définies que localement, elles se sont révélées capables de produire un comportement globalement intéressant.

Ordre spontané et auto-organisation

Lorsqu'un ordre non planifié apparaît par émergence, on parle d'ordre spontané (en sciences sociales) ou d'auto-organisation (en sciences physiques). Un tel comportement spontané peut être observé dans le comportement du troupeau, un groupe d'individus coordonnant ses actions sans planification centralisée. L'auto-organisation est visible dans la symétrie globale de certains cristaux, par exemple la symétrie radiale apparente des flocons de neige, qui résulte de forces attractives et répulsives purement locales entre les molécules d'eau et entre les molécules d'eau et leur environnement. La formation de motifs fractals symétriques complexes dans les flocons de neige est un exemple d'émergence dans un système physique.

[Motifs de flocon de neige. Image Wilson Bentley. (domaine public)]

Adaptabilité

Les systèmes adaptatifs complexes sont des cas particuliers de systèmes complexes qui sont adaptatifs en ce sens qu'ils ont la capacité de changer et d'apprendre de l'expérience. Des exemples de systèmes adaptatifs complexes incluent la bourse, les colonies sociales d'insectes et de fourmis, la biosphère et l'écosystème, le cerveau et le système immunitaire, la cellule et l'embryon en développement, les villes, les industries manufacturières et toute entreprise basée sur un groupe social humain dans un système culturel et social tel que les partis politiques ou les communautés.

Mémoire

L'histoire d'un système complexe peut être importante. Les systèmes complexes étant des systèmes dynamiques, ils changent avec le temps et leurs états antérieurs peuvent avoir une influence sur leurs états actuels. Plus formellement, les systèmes complexes présentent souvent des défaillances et des processus de récupération spontanés, ainsi que des états dits "d'hystérésis" [NOTE] (l'évolution ne suit pas le même chemin selon qu'une cause extérieure augmente ou diminue).

Stigmergie et complexité

Les systèmes stigmergiques sont des systèmes complexes. Il est donc intéressant de s'appuyer sur les connaissances actuelles des systèmes complexes pour mieux comprendre la stigmergie.

Règles d'auto-organisation Meadows

Donella Meadows a fait un travail brillant pour promouvoir la compréhension des systèmes complexes. Dans son ouvrage *Thinking in Systems* (disponible en français depuis janvier 2023), elle propose des règles qui régissent l'émergence de l'auto-organisation dans un système.

Pour elle, l'auto-organisation nécessite simplement deux choses:

- ce qu'elle appelle un "matériau évolutif brut", c'est à dire un stock d'information hautement variable à partir duquel il est possible de produire des combinaisons multiples.
- un moyen d'expérimenter qui permette de tester et sélectionner des nouvelles combinaisons.

L'évolution fonctionne ainsi : le patrimoine génétique des espèces produit de nombreuses combinaisons, qui sont confrontées à leur environnement, les plus adaptées à leur contexte sont retenues pour être transmises à la génération suivante.

Potentiel évolutif

Citation de Meadows?

"Quand vous comprenez l'importance du potentiel évolutif pour l'auto-organisation, vous commencez à comprendre pourquoi les biologistes vénèrent la biodiversité encore plus que les économistes vénèrent la technologie.

Le stock d'ADN incroyablement varié qui évolué et s'est accumulé pendant des milliards d'années pour aboutir aux espèces d'aujourd'hui est source de potentiel évolutif, tout comme les laboratoires et les bibliothèques scientifiques où les chercheurs sont entraînés sont source de potentiel technologique.

Du point de vue systémique, laisser des espèces s'éteindre est aussi criminel qu'éliminer aléatoirement toutes les copies de journaux scientifiques et chercheurs de certaines disciplines."

On peut dire la même chose des cultures humaines qui représentent des répertoires comportementaux accumulés pendant des centaines de milliers d'années.

Récurtivité et itérations dans les structures fractales

A la fin des années 50, Benoît Mandelbrot commença à étudier la géométrie une grande variété de phénomènes naturels et réalisa que toutes ces formes géométriques avaient des caractéristiques communes. Durant les années suivantes, il inventa un nouveau type de mathématique pour décrire et analyser ces propriétés. Il inventa le terme "fractales" pour caractériser son invention et publia ses résultats dans un livre spectaculaire *The fractal geometry of nature* (Mandelbrot 1983) qui eu une influence énorme sur les mathématiciens qui étudiaient les systèmes non linéaires.

L'une des propriétés les plus frappantes des fractales est que leur motif caractéristique se retrouve de manière répétée à différentes échelles. Ainsi leurs parties à n'importe quelle échelle ont une forme similaire au tout. Mandelbrot illustre cette propriété d'auto-similarité en cassant une pointe de choux romanesco et en montrant que ce morceau en lui même ressemble exactement à un petit romanesco. Il répète cette démonstration en coupant de nouveau ce morceau sortant une nouvelle partie qui de nouveau ressemble à un très petit romanesco.

Quand Mandelbrot a découvert les fractales, il a montré qu'il était possible de modéliser des phénomènes extrêmement complexes à partir de paramètres relativement simples.

La principale technique pour construire des figures géométriques qui modélisent les formes fractales qui

existent dans la nature, est l'**itération** - c'est à dire la répétition de certaines opérations géométriques encore et encore.

Fritjof Capra qui fait le lien entre différentes sciences de la complexité explique que le processus d'itération (latin pour la répétition), est un élément clé liant la théorie du Chaos (une théorie systémique) et la géométrie fractale.

On peut illustrer cette propriété avec le flocon de Koch, une figure fractale utilisant un procédé simple de récursivité.

À l'étape initiale, on a un triangle équilatéral. L'étape suivante consiste à construire trois triangles équilatéraux en prenant pour base le tiers central de chacun des côtés du triangle initial.

En répétant cette opération encore et encore sur des échelles de plus en plus petites, un flocon de neige dentelé est créé.

[courbe de Koch]

La courbe de Koch devient infiniment longue si l'itération se poursuit à l'infini et peut être considérée comme un modèle très approximatif d'un littoral.

Et pourtant cette structure, dont la richesse défie l'imagination humaine, est générée par quelques règles très simples.

En mathématiques classiques, les formules simples correspondent à des formes simples; des formules compliquées à des formes compliquées.

Dans la dynamique non linéaire, la situation est radicalement différente et des règles simples donnent naissance à des structures plus compliquées que tout ce que nous sommes capable d'imaginer.

Maintenant que nous avons exploré les systèmes complexes, voyons comment s'exprime l'auto-organisation dans la nature.

AUTO-ORGANISATION dans la nature

Plan chapitre

Exemples de comportement autoorganisés dans la nature

Retour sur mécanismes d'autoorganisation, intro systèmes complexes

Autoorganisation dans la nature:

différents phénomènes de coordination aboutissant à EMERGENCE comportement collectif cohérent

-> déplacements, construction, ...

font tous partie de modèles autoorganisés

4 patterns

1. BOUCLE DE RÉTROACTION POSITIVE
2. BOUCLE DE RÉTROACTION NÉGATIVE
3. FLUCTUATION ALÉATOIRES
4. MULTIPLES INTERACTIONS

La dedans stigmergie sous catégorie coordination indirecte via traces laissées dans milieu (traces plus ou moins éphémères phéromones vs structures)

position spatiale = trace extrêmement éphémère moins intéressant car pas de stockage d'information par le système.

Traces laissé dans environnement agissent comme mémoire distribuée du système

Various forms of storage are used: gradients of pheromones, material structures (impregnated or not by chemical compounds), or spatial distribution of colony elements. Such structures materialize the dynamics of the colony's collective behavior and constrain the behavior of individuals through a feedback loop.

G. Theraulaz and E. Bonabeau 1999 - A Brief History of Stigmergy

Donner quelques exemples détaillés puis montrer à travers plusieurs exemples quels sont les règles simples qui permettent l'émergence

[PATTERNS D'AUTO-ORGANISATION MOUSSAID]

[Heylighen 2011? Self-organization in Communicating Groups: the emergence of coordination, shared references and collective intelligence]

Le concept d'auto-organisation est de plus en plus populaire dans diverses branches de la science et de la technologie. Bien qu'il n'existe pas de définition généralement acceptée [Gershenson & Heylighen, 2003], un système d'auto-organisation peut être caractérisé par une activité globale et coordonnée découlant spontanément d'interactions locales entre les composants ou "agents" du système.

Cette activité est distribuée sur tous les composants, sans qu'un contrôleur central supervise ou dirige le comportement. Par exemple, dans un banc de poissons, chaque poisson individuel base son comportement sur sa perception de la position et de la vitesse de ses voisins immédiats, plutôt que sur le comportement d'un "poisson central" ou celui de l'ensemble du banc. L'auto-organisation établit une relation entre le comportement des composants individuels et la structure et la fonctionnalité du système dans son ensemble : des interactions simples au niveau local donnent lieu à des modèles complexes au niveau global. Ce phénomène est appelé émergence.

Patterns d'autoorganisation

- AGGLOMÉRATION (boulettes de boue, cairns, déchets, lovelocks, grafitis...)
 - COORDINATION DE DÉPLACEMENTS / DÉPLACEMENTS COORDONNÉS (banc de poisson, vol d'oiseaux, amibes, trafic automobile, cyclistes, formation de files de piétons)
 - OPTIMISATION DE CHEMINS / CHEMINS OPTIMUMS (fourmis, sentiers tracés par l'usage, blob/disctyostellium)
 - ARCHITECTURE CONSTRUCTION D'ARTEFACTS (fourmilières, termitières, développement urbain)
 - USAGE/RÉPARTITION DE RESSOURCES (marchés financier, développement urbain, occupation sociale de l'espace animaux, humains, marchés auto-organisés)
 - SYNCHRONISATION DE RYTHMES (applaudissement, lucioles, alternance de files)
- **Mettre sous une forme simple (PHOTO + description des règles d'auto-organisation) puis renvoyer vers note bas de page plus complète ??****

Déplacements collectifs

__stigmergie_ccoordination_deplacements_collectifs.md

Vols d'oiseaux

__stigmergie_murmuration_oiseaux.md

Bancs de poissons Groupes de cyclistes

__groupes_cyclistes.md

Trafic routier

__trafic_routier.md

Occupation sociale de l'espace par les animaux

quelle section ?

__stigmergie_occupation_espace_animaux.md

Coordination d'organismes multicellulaires

Amibes

__stigmergie_amibes.md

Thierry Crouzet dans son livre *Le Peuple de connecteurs* (Crouzet, 2007) a joliment raconté l'histoire de cet organisme pas comme les autres:

>

> A la fin de l'été, si vous vivez à la campagne, vous avez peut être l'habitude de cueillir des champignons. Vous connaissez des coins à cèpes, à girolles ou à morilles. Vous vous y rendez en songeant à la poêlée, à peine aillée et persillée que vous dégusterez à midi. Mais un jour, sous un vieux chêne, vous risquez de vous retrouver nez à nez avec une minuscule masse spongieuse, sorte de déjection animale souvent orangée. Le lendemain, si vous revenez au pied du chêne, vous retrouverez la même masse dégoûtante. Vous serez alors peut être horrifié en constatant qu'elle s'est déplacée de quelques centimètres dans la nuit, animée par une reptation imperceptible. Un jour enfin, vous serez libéré de cette monstruosité qui aura disparu, comme si un cueilleur moins scrupuleux que vous s'en était emparé; à moins qu'un biologiste ne soit passé par là et se soit émerveillé de découvrir un *Dictyostellium discoideum*.

>

> Cette créature au nom barbare est l'une des plus passionnantes que nous connaissons. Elle possède la propriété extraordinaire de ne pas exister en tant que telle: elle résulte de l'agrégation d'une myriade d'amibes unicellulaires qui se rassemblent lorsque les bactéries dont elles se nourrissent viennent à manquer. La colonie forme alors un nouvel organisme qui rampe à la façon d'un ver jusqu'à trouver un nouvel endroit lumineux et chaud. Là, elle se transforme en champignon à la tête remplie de spores. Dès que les conditions deviennent favorables, la tête explose et les spores donnent naissance à de nouvelles amibes. Chacune vivra indépendamment jusqu'à ce que les bactéries manquent et que de nouvelles colonies se constituent.

>

> Pendant longtemps, les mycologues supposèrent que les amibes répondaient aux ordres de quelques amibes en chef, ordres transmis grâce à une phéromone appelée AMP cyclique.

>

> Comme les ornithologues qui étudiaient les formations de vols des oiseaux, ils étaient incapables d'imaginer un régime décentralisé chez les amibes et cherchaient parmi elles des rois, des dictateurs ou des miniprouts: ils ne les découvrirent jamais.

>

> En 1969, la biologiste moléculaire Evelyn Fox et le mathématicien Lee Segel démontrèrent que les potentats n'existent pas : en temps de crise, l'AMP cyclique libéré par chacune des amibes suffit à attirer les autres amibes qui se suivent à la trace jusqu'à se rassembler. Des organismes unicellulaires sont capables de s'auto-organiser et de créer temporairement un organisme multicellulaire.

[Images dictostellium...]

[Vidéo stigmergy : Planetary stigmergy artificial ecosystems and natural adaptation

<https://www.youtube.com/watch?v=CsEANT3DMOI>]

Colonies de bactéries

__stigmergie_bacteries.md

La stigmergie a été observée chez les bactéries (organismes unicellulaires, c'est à dire normalement composé d'individus isolés) où diverses espèces sont capables de se différencier en types cellulaires distincts et de participer à des comportements collectifs sophistiqués. Des exemples spectaculaires de comportements multicellulaires ont ainsi été observés chez les myxobactéries.

Les myxobactéries voyagent en essaims composés de nombreuses cellules bactériennes agrégées par des signaux intercellulaires. La plupart des myxobactéries sont prédatrices: les individus bénéficient de l'aggrégation car elle permet l'accumulation d'enzymes extracellulaires qui sont utilisées pour digérer des microorganismes proies.

Quand la nourriture est rare, les cellules myxobactériennes s'aggrègent en organes fructificateurs, dans lesquels les cellules de l'essaim se transforment en mixospores dormant aux parois épaisses. On pense que ce processus est bénéfique pour les myxobactéries en permettant la reprise d'une croissance en essaim plutôt qu'en cellules isolées [Wikipedia, myxobactéries].

P. aeruginosa interstitial biofilm expansion is mediated by stigmergic self-organization

from Stigmergy A key driver of self-organization in bacterial biofilms Gloag et al 2013

Bacterial Swarms, Bacterial Biofilms, Quorum Sensing ? : Quorum sensing within bacterial communities bears a striking resemblance to pheromone signalling that coordinates the collective behaviours of social insects. It is therefore interesting to speculate whether quorum sensing offers another example of stigmergic self-organisation within bacterial communities.

Bacterial Stigmergy: An Organising Principle of Multicellular Collective Behaviours of Bacteria Gloag, 2015

Microtubules, protéines du squelette des cellules

En biologie moléculaire, il a été récemment reconnu que la stigmergie expliquait l'auto-organisation des microtubules, des protéines du squelette des cellules qui sont impliquées dans de nombreuses fonctions cellulaires.

Ces tubes microscopiques changent de forme et se déplacent en absorbant des protéines de tubuline à une extrémité et les relarguant à l'autre extrémité. Le "trail" de tubuline restant du côté qui rétrécit attire les extrémités croissantes d'autres microtubules, ce qui résulte dans la formation d'un vague cohérente de microtubules se déplaçant dans la même direction.

[corriger, trouver ref trail tubuline]

A similar stigmergic mechanism was recently recognized in molecular biology (Tabony, 2006) to explain the self-organization of the microtubules that support many functions in the cell. These microscopic tubes change shape and move by absorbing tubulin proteins at one end, and releasing them at the other end. The "trail" of

tubulin left at the shrinking end attracts the growing ends of other microtubules, resulting in the formation of a coherent “wave” of microtubules moving in the same direction. (cited by helighen 2015 Stigmergy as a Universal Coordination Mechanism: components, varieties and applications)

<https://onlinelibrary.wiley.com/ca418524-6df9-4dae-b7bf-bf5ad9ef8eb2>

microtubules can accumulate within small initial protrusions in a process related to stigmergy, a building principle of termites.³² Stigmergy is a self-amplifying process, in which a positive feedback between termites and the structure that is built by them leads to pattern formation. A similar self-amplifying process can stimulate neurite formation, as more microtubules get trapped in the convex geometry of cell protrusions that they induce^{33,34} (Fig. 3C). Taken together, those processes can act together to constitute a pattern forming process, in which the structure of a neuron emerges from local interactions of active agents, i.e., microtubules and associated motor proteins.

Cytoskeletal self-organization in neuromorphogenesis

Leif Dehmelt 1 , 2 ,

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4199815/>

Synchronisations

__synchronisation_applaudissements.md

Nouvelle section ?

Chemins tracés par l'usage

__stigmergie_chemins_traces_usage.md__

[note: reprendre l'exemple et le développer dans la section auto-organisation "piéton imprime et partage sa solution dans l'environnement".]

Marchés financiers

__stigmergie_marches_financiers.md

Classement des sites web

__classement_sites_web.md

autres exemples à explorer

Parunak propose d'autres exemples, mais moins convaincant :

- Elections
- Edition de documents

- Tableaux de bord
- Viral Marketing
- Intelligent Transportation Systems
- Collaboration Environments
- Peer-to-Peer Computing
- On-line auctions such as eBay
- Military tactics: One analyst has briefly described guerilla operations from a stigmergic perspective [85]
- A “recommender system” or “recommendation system” attempts to predict items (such as books, movies, or music) that a user may find interesting, based on the user’s profile. Such systems are usually implemented using collaborative filtering [40]. The system (the stigmergic environment) collects a large number of profiles on different users. Each profile is a vector over the universe of items for which recommendations are being made, and the magnitude of each element in a given user’s profile indicates the relative attractiveness of that item for that user.
- Parunak : <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA440006.pdf>
stigmergy sur google donnait 16500 résultats en 2005 (Parunak), 145000 en mai 2022.

Les militaires s'interessent à la stigmergie

Table 6: Recommended Project Strategies

Application Existing Technology New Research

Self-Organizing

Logistics RFID for package tracking Development of statistical mechanics-based models for prediction and control

Army Knowledge

Online

Existing web tools (as in the existing US Army site)

Peer-to-peer distribution

Smart addressing (Altarum PARTNER)

IPB Process

Management Commercial workflow technology Exploration of security mechanisms

Viral Psychological

Operations

Conventional advertising techniques

Analysis of social network structure of target societies

- Parunak : <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA440006.pdf>

Guerilla

. Robb. Stigmergic Learning and Global Guerillas. 2004. Web page,
http://globalguerrillas.typepad.com/globalguerrillas/2004/07/stigmergic_syst.html.
https://globalguerrillas.typepad.com/globalguerrillas/2004/07/stigmergic_syst.html

Organisation des villes et développement urbain

Vu à grande échelle, le développement urbain traditionnel a une composante stigmergique.

Un bâtiment est construit. Puis d'autres sont construits de chaque côté. Lorsque le bâtiment initial est détruit, l'emplacement reste borné par les constructions avoisinantes, qui influencent la construction du nouveau bâtiment.

[photo aérienne cicatrice chemin de fer]

Dans les architectures traditionnelles on peut ainsi observer un développement très organique avec des traces très anciennes qui continuent à influencer le développement contemporain.

Dans son livre "Emergence", Steven Johnson décrit aussi la ville comme une interface de stockage de l'information où la répartition des métiers n'est pas aléatoire, mais où les professionnels ont tendance à se regrouper par corporations.

Pour lui, le fait que les professions se regroupent par métier (quartier des bouchers, des textiles, des orfèvres...) et que cette répartition soit restée très stable sur plusieurs centaines d'années n'est pas un hasard.

> "Des entreprises partageant les mêmes idées se regroupent parce qu'il existe des incitations financières - ce que les universitaires appellent les économies d'agglomération - permettant aux artisans de partager des techniques et des services dont ils ne pourraient pas nécessairement bénéficier seuls. Ce regroupement devient un cycle qui se perpétue : les consommateurs et les employés potentiels ont plus de facilité à trouver les biens et les emplois qu'ils recherchent; les informations partagées rendent les entreprises regroupées plus compétitives que les entreprises isolées. (...). Mais les villes ont également un objectif latent: fonctionner en tant que dispositifs de stockage et de récupération d'informations. Les villes créaient des interfaces conviviales des milliers d'années avant que quiconque ne rêve à l'ordinateur numérique. Les villes rassemblent les esprits et les placent dans des emplacements cohérents. Les cordonniers se rassemblent près d'autres cordonniers et les fabricants de boutons près d'autres fabricants de boutons. La circulation fluide des idées et des biens au sein de ces groupes permet une pollinisation croisée productive, garantissant que les bonnes idées ne disparaissent pas dans l'isolement rural. (...)

>

> Le système de voisinage d'une ville fonctionne comme une sorte d'interface utilisateur pour la même raison que les interfaces informatiques traditionnelles : il existe des limites au nombre d'informations que notre cerveau peut traiter à un moment donné.

>

> Nous avons besoin d'interfaces visuelles sur nos ordinateurs de bureau, car la quantité d'informations stockées sur nos disques durs - sans parler du Net lui-même - dépasse largement la capacité de charge de l'esprit humain.

>

> Les villes sont une solution à un problème comparable, tant au niveau collectif que individuel.

>

> Les villes stockent et transmettent de nouvelles idées utiles à l'ensemble de la population, en veillant à ce que les nouvelles technologies puissantes ne disparaissent pas une fois inventées. Mais les groupes de quartiers auto-organisés servent également à rendre les villes plus intelligibles pour les individus qui les habitent (...). La spécialisation de la ville la rend plus intelligente, plus utile pour les personnes qui l'habitent. Et ce qui est extraordinaire encore, c'est que cet apprentissage émerge sans que personne ne le sache. (Extrait de [Emergence, Steven Johnson]).

Règles d'organisation des villes

Nos villes, surtout pour la plupart nos villes d'art, ne résultent d'aucune planification systématique. (...) L'économiste Paul Krugman proposa, en 1995, un modèle mathématique pour expliquer leur structure, du moins celle des zones marchandes. Il découvrit que les entreprises obéissaient à deux contraintes.

1. s'installer près des concurrents pour partager leur clientèle et recourir aux mêmes services qu'eux.
2. S'installer loin des autres pour disposer de terrain moins chers et conquérir de nouveaux clients.

Ces deux règles expliquent la formation des centres d'affaires, avec chacun leur spécialité, et comment les villes s'étendent toujours plus loin.

Leur croissance, comme celle d'un organisme, repose sur des règles en nombre fini mais n'en engendre pas moins la diversité.

Source: Thierry Crouzet, le peuple des connecteurs p45

Amas / agregats Cairns / sentiers

dépot de déchets

La dépot de déchets semble lui aussi être une forme de stigmergie simple. Si un déchet est déposé, alors je peux déposer un autre déchet. Ce qui comme les cairns aboutit à la formation de tas. Cette forme de stigmergie a priori non souhaitable, présente pour autant un intérêt car comme les sentiers tracés par l'usage, elle semble elle aussi répondre à un besoin. On pourrait imaginer que certaines collectivités locales qui combattent ce dépot sauvage se servent de ce signal pour questionner l'emplacement de leur poubelles et déchetteries.

Street art

complex feedback loop between practitioners and audiences (décrit dans conclusion street art pdf)

New definition from Parunak : essence of stigmergy as coordination of unbonded agents embedded in a potentially unbounded environment, whose state they both sense (to guide their action) and modify (as a result of their actions).

Ce chapitre explore le fonctionnement du graffiti et du street art dans l'espace public en considérant leur relation avec la notion de stigmergie, une théorie dérivée du comportement des insectes qui explique comment les actions des agents individuels au sein des populations sont coordonnées sans communication directe. L'application de la stigmergie met en lumière un certain nombre d'aspects négligés de l'art de la rue, à savoir son regroupement spatial, son incitation à l'interaction, les publics actifs qu'il produit et son existence en tant que "scène culturelle", basée non pas sur des objets d'art fixes mais sur des formes qui suscitent des contributions collectives continues.

[Graffiti, Street Art and Stigmergy; MacDowall, L.J. 2015

https://www.academia.edu/12567456/Graffiti_Street_Art_and_Stigmergy

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38451473/Book_Chapter_Graffiti_Street_Art_and_Theories_of_Stigmergy_MacDowall_2015-libre.pdf?1439355557=&response-content-disposition=attachment%3B+filename

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38451473/Book_Chapter_Graffiti_Street_Art_and_Theories_of_Stigmergy_MacDowall_2015-libre.pdf?1439355557=&response-content-disposition=attachment%3B+filename%3DGraffiti_Street_Art_and_Stigmergy.pdf&Expires=1653126265&Signature=OKoOKEhQQaUcKI5svkLBU4dOXVA0Foch~ZDGXvyRekqj3iKM9MPgZWL5wsmoUBfhas8EbLBRXseDI5SZYXdgMCX5R6W2JNeYoK72DWzT2VkfWQj1uKwEva27Smz9wuXFJ0Rk8xodxLF61ohV4FJv4qCUK3BF1KXfxmkzjodl16sk0Zz3yJ20fGkam297Bc4vbw6GtgKWWcAD386~KzV~kIn6PoVzxy7QYJQbWOxOWaezrRahxmaVh1ZqEPilFcW-1vXL0rawklQH7F7JwkY9RowmZdmJgnpbqjw4GQIeWuJ-7MPnti1cXdp7UIwRATq6UUZOJmu8A4ZiZ4bqIaYA_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Lovelocks

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38451473/Book_Chapter_Graffiti_Street_Art_and_Theories_of_Stigmergy_MacDowall_2015-libre.pdf?1439355557=&response-content-disposition=attachment%3B+filename%3DGraffiti_Street_Art_and_Stigmergy.pdf&Expires=1653126265&Signature=OKoOKEhQQaUcKI5svkLBU4dOXVA0Foch~ZDGXvyRekqj3iKM9MPgZWL5wsmoUBfhas8EbLBRXseDI5SZYXdgMCX5R6W2JNeYoK72DWzT2VkfWQj1uKwEva27Smz9wuXFJ0Rk8xodxLF61ohV4FJv4qCUK3BF1KXfxmkzjodl16sk0Zz3yJ20fGkam297Bc4vbw6GtgKWWcAD386~KzV~kIn6PoVzxy7QYJQbWOxOWaezrRahxmaVh1ZqEPilFcW-1vXL0rawklQH7F7JwkY9RowmZdmJgnpbqjw4GQIeWuJ-7MPnti1cXdp7UIwRATq6UUZOJmu8A4ZiZ4bqIaYA_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

RÈGLES D'AUTOORGANISATION

Par quels moyens des centaines, voire des milliers d'individus parviennent-ils à coordonner à ce point leur activité sans se référer à un système de contrôle centralisé ? Répondre à cette question revient à établir un lien entre deux niveaux d'observation distincts : d'une part, vu d'un niveau "macroscopique", le groupe présente une organisation étonnamment robuste et cohérente qui favorise souvent une utilisation efficace de l'environnement. Mais d'autre part, du point de vue "microscopique" d'un individu donné, la situation est perçue à une échelle locale : les piétons, comme les poissons, n'ont pas une image complète de la structure globale qu'ils créent. Ils réagissent plutôt en fonction des informations partielles disponibles dans leur environnement local ou fournies par les autres membres du groupe à proximité.

La nature du lien entre le niveau individuel et le niveau collectif est étudiée dans cet article. (MOUSSAID 2010 P61)

La naissance inattendue - ou l'émergence - de nouveaux modèles à partir d'interactions entre de nombreuses sous-unités a été établie pour la première fois dans des systèmes physico-chimiques (Nicolis & Prigogine, 1977). Depuis lors, il a été maintes fois démontré que l'ordre spontané peut apparaître dans de tels systèmes en raison des interactions non linéaires entre les substances chimiques. Comme l'ordre émerge sans contrôle externe, ces phénomènes non linéaires ont été qualifiés d'auto-organisés.

Les mécanismes d'auto-organisation ne se limitent pas aux systèmes physiques ou chimiques. Au cours des 30 dernières années, ils ont également été identifiés dans divers systèmes vivants, tels que les structures cellulaires (voir Ben-Jacob et al. (1994) ; Karsenti (2008) ; Shapiro (1988) pour une revue), les sociétés animales (Camazine et al., 2001 ; Couzin & Krause, 2003 ; Garnier et al., 2007 ; Sumpter, 2006) ou les

foules humaines (Ball, 2004 ; Helbing, 1995).

Un processus d'auto-organisation peut être défini comme l'émergence spontanée d'une structure à grande échelle à partir d'interactions locales entre les sous-unités du système. De plus, les règles spécifiant les interactions entre les composants du système sont exécutées en utilisant uniquement des informations locales, sans référence au modèle "global" (Bonabeau et al., 1997). L'organisation distribuée implique qu'aucun agent interne ou externe ne supervise le processus et que le modèle collectif n'est pas explicitement codé au niveau individuel. En outre, les propriétés émergentes du système ne peuvent pas simplement être comprises comme la somme des contributions individuelles. L'auto-organisation est un concept clé pour comprendre la relation entre les interactions interindividuelles locales et les modèles collectifs. Un processus auto-organisé repose sur quatre éléments de base :

1. Une boucle de rétroaction positive,
2. Une boucle de rétroaction négative,
3. Des fluctuations aléatoires
4. De multiples interactions directes ou indirectes

Sur la base de ces quatre ingrédients, il a été possible de décrire et d'expliquer de nombreux comportements collectifs observés chez les insectes sociaux et dans les sociétés animales (Camazine et al., 2001 ; Couzin & Krause, 2003). Le concept d'auto-organisation permet donc d'élucider la relation non intuitive entre l'apparente simplicité comportementale des membres d'un groupe et la complexité des résultats collectifs qui émergent de leurs interactions.

By what means do hundreds or even thousands of individuals manage to coordinate their activity to such an extent without referring to a centralized control system ? Answering this question comes down to establishing a link between two distinct levels of observation : on the one hand, seen from a "macroscopic" level, the group displays a surprisingly robust and coherent organization that often favors an efficient use of the environment. However, on the other hand, from the "microscopic" point of view of a given individual, the situation is perceived at a local scale : the pedestrians, like the fish, do not have a complete picture of the overall structure they create. They rather react according to partial information available in their local environment or provided by other nearby group members.

The nature of the link between the individual and the collective level is investigated in this article.

(MOUSSAID 2010 P61)

The unexpected birth - or emergence - of new patterns out of interactions between numerous subunits was first established in physico-chemical systems (Nicolis & Prigogine, 1977). Since then, it has been many times demonstrated that spontaneous order can appear in such systems because of the non-linear interactions among chemicals. Because the order emerges without external control these non-linear phenomena were labeled as self-organized.

Self-organization mechanisms are not limited to physical or chemical systems. During the last 30 years, they have also been identified in various living systems, such as cellular structures (see Ben-Jacob et al. (1994); Karsenti (2008); Shapiro (1988) for a review), animal societies (Camazine et al., 2001; Couzin & Krause, 2003; Garnier et al., 2007; Sumpter, 2006) or human crowds (Ball, 2004; Helbing, 1995).

A self-organization process can be defined as the spontaneous emergence of large-scale structure out of local interactions between the system's subunits. Moreover, the rules specifying interactions among the system's components are executed using only local information, without reference to the "global" pattern (Bonabeau et al., 1997). The distributed organization implies that no internal or external agent is supervising the process and that the collective pattern is not explicitly coded at the individual level. Furthermore, the emerging properties of the system cannot simply be understood as the sum of individual contributions. Self-organization is a key concept to understand the relationship between local inter-individual interactions and

collective patterns. A self-organized process relies on four basic elements :

1. A positive feedback loop,
2. A negative feedback loop,
3. Random fluctuations
4. Multiple direct or indirect interactions

On the basis of these four ingredients, it has been possible to describe and explain numerous collective behaviors observed in social insects and animal societies (Camazine et al., 2001; Couzin & Krause, 2003). Therefore, the concept of self-organization helps to elucidate the non-intuitive relationship between the apparent behavioral simplicity of group members and the complexity of the collective outcomes that emerge from their interactions.

Rules for self-organization Meadows

These rules basically govern how, where, and what the system can add onto or subtract from itself under what conditions. As hundreds of computer models have demonstrated, ****complex and delightful patterns can evolve from quite simple sets of rules.****

The genetic code within the DNA that is the basis of all biological evolution contains just four different letters, combined into words of three letters each. That pattern, and the rules for replicating and rearranging it, has been constant for something like three billions years during which it spewed out an unimaginable variety of failed and successful self-evolved creatures.

****Self-organization is basically a matter of an evolutionary raw material - a highly variable stock of information from which to select possible patterns - and a mean for experimentation, for selecting and testing new patterns.****

When you understand the power of system self-organization, you begin to understand why biologists worship biodiversity even more than economists worship technology. The wildly varied stock of DNA, evolved and accumulated over billions of years, is the source of EVOLUTIONARY POTENTIAL, just as science libraries and labs and universities where scientists are trained are the source of technological potential. Allowing species to go extinct is a systems crime, just as randomly eliminating all copies of a particular science journal or particular kinds of scientists would be. That could be said of human cultures, of course, which are the store of behavioral repertoires, accumulated over not billions, but hundreds of thousands of years.

Meadows, D. (2008). Thinking in systems. A primer. Heylighen

Stigmergie complexité et sélection naturelle

I wish to suggest here that stigmergy is another type of mechanism for generating complex organization and intelligent behavior, which is related to both natural selection and self-organization, but which has some distinct features of its own that may resolve some outstanding problems with these previously proposed explanations.

"Je souhaite suggérer ici que la stigmergie est un autre type de mécanisme permettant de générer une organisation complexe et un comportement intelligent, qui est lié à la fois à la sélection naturelle et à l'auto-organisation, mais qui possède des caractéristiques distinctes qui lui sont propres et qui peuvent résoudre certains problèmes en suspens avec ces explications proposées précédemment."

Heylighen 2015

Communautés virtuelles

transcende et inclus les formes précédentes

pyramide, consensus, négociation ne disparaissent pas complètement, la stigmergie les inclus. phénomène émergent à un niveau de complexité supérieur

[caption id="attachment_369" align="alignnone" width="932"] "la révolution est possible sans centre" entre œuvre et dispositif technique, la roue sans centre par Lilian Chardon.[/caption]

notes

****NOTE : stigmergie et intentionnalité à creuser****

****Retrouver revue helighen types stigmergie : Stigmergy as a generic mechanism for coordination: definition, varieties and aspects -> Transient vs. persistent traces.**

relire les 3 publiés de heylighen

****prochaines étapes : mettre en graines d'information les sous parties, avant d'épurer. Mettre en note de bas de page l'excès (exemple humains), finir avec perspectives logiciels libre**.**

****pour chaque exemple il serait intéressant de pouvoir déduire des règles simples****

****Wikipedia et stigmergy, compétition entre usagers pour acceptation éditions; article à creuser :**

<https://medium.com/starling-foundries/the-networked-social-organism-c2bd520ceaa5>******

****phénomène d'auto-organisation où, sans concertation directe****

-> AUTOORGANISATION MOUSSAID

RÈGLES AUTOORGANISATION :

_DIRECT VS INDIRECT INFORMATION TRANSFER

Pourquoi un post it sur un bureau ne produit pas de la stigmergie, mais un carton de déménagement si... Lors de certaines discussions qui survenaient après que j'ai présenté la stigmergie, j'ai plusieurs fois eu le retour suivant "ah, et c'est comme avec ma femme / mon collègues, on se laisse un post-it sur le bureau pour se coordonner, c'est de la stigmergie!". J'ai souvent manqué de mot sur le moment pour expliquer pourquoi selon moi ce n'en était pas.

Sources:

- **Correia, L., Sebastião, A.M. & Santana, P. (2016) - On the Role of Stigmergy in Cognition**
- **Gloag, E.S. et al (2014) - Bacterial Stigmergy: An Organising Principle of Multicellular Collective Behaviours of Bacteria**
- **Stigmergy co-ordinates multicellular collective behaviours during Myxococcus xanthus surface migration.**
- **Gloag E.S., Turnbull L., Javed M.A., Wang H., Gee M.L. Wade, S.A. & Whitchurch C.B. (2016)**
- **Heylighen, F. (2015) Stigmergy as a universal coordination mechanism II: Varieties and evolution**
- **Tabony, J. (2006) - Microtubules viewed as molecular ant colonies**
- **Crouzet, T. (2007) - Le peuple des connecteurs.**
- **Grassé, P.P. (1959)**
- **Heylighen, F. (2015)**
- **Johnson, S. (2001) - Emergence**
- **Wikipédia - Algorithme de colonies de fourmis - https://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_de_colonies_de_fourmis**
- **Wikipédia - Boids - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Boids>**
- **Wikipédia - Myxobactéries -**
- **Wikipédia - Auto-organisation - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Auto-organisation>**

- **Wikipédia - Stigmergie -**
<https://en.wikipedia.org/wiki/Stigmergie>
- **Wikipédia - Termite -**
<https://en.wikipedia.org/wiki/Termite#Communication>
- **Wikipédia - Rétroaction -** <https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9troaction>
- **Wikipédia - Dictyostelium discoideum -**
https://fr.wikipedia.org/wiki/Dictyostelium_discoideum
- **Wikipédia - Effet_Larsen -**
https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Larsen
- **Wikipédia - hystérésis -** <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hyst%C3%A9r%C3%A9sis>

A critical-like collective state leads to long-range cell communication in Dictyostelium discoideum aggregation

Giovanna De Palo,
Darvin Yi,
Robert G. Endres

GENETIC STIGMERGY: FRAMEWORK AND APPLICATIONS BY JOSHUA ADAM BRANDOFF BS,
Binghamton University, 2008

<!---

Autoorganisation rules for termites

[__autoorganisation_rules_termites.md](#)

La stigmergie, mécanisme basé sur les traces

Pierre-Paul Grassé a nommé ce processus "Stigmergie" en référence à ce comportement des termites.

Il le définit comme : « Stimulation des travailleurs par l'œuvre qu'ils réalisent. » Le terme provient des mots grecs στίγμα (stigma) « marque, signe » et εργον (ergon) « travail, action », exprimant la notion que les actions d'un individu laissent des signes dans l'environnement, signes perçus par lui-même et les autres individus et qui déterminent leurs prochaines actions.

La définition a quelque peu évolué depuis avec un consensus :

"La stigmergie est une méthode de communication indirecte dans un environnement émergent auto-organisé, où les individus communiquent entre eux en modifiant leur environnement." [Wikipedia]

Pour mieux comprendre ce mécanisme, il est intéressant de comprendre comment les fourmis se coordonnent pour trouver leur nourriture, autre exemple classique de stigmergie

Les fourmis, championnes de l'optimisation de trajets

[__mecanisme_optimisation_trajets_fourmis.md](#)

LA STIGMERGIE DANS LA NATURE

La stigmergie est un mécanisme universellement répandu.

Les chercheurs ont identifiés de nombreux cas de systèmes vivants qui montrent des comportements de type stigmergique dans la nature.

L'intérêt est tel que le nombre de publications mentionnant le terme "stigmergie" est passé de 1 par an entre 1960 et 1990 (avec 3 en 1991) à environ 500 en 2006 (mesuré par Google Scholar) puis 700 par an en 2013 [Heylighen, F.].

En fait comme le dit le chercheur Francis Heylighen, spécialiste du sujet, il est difficile de trouver un domaine où la stigmergie ne s'applique pas.

Sans faire une revue complète, voici quelques exemples pour montrer la variété des domaines où la stigmergie est présente.

--->

****question: dans les collectifs humains, quelles sont nos phéromones ou AMPc, les médiateurs de reconnaissance qui permettent l'autoorganisation ? Noubel parle de phéromones sémiotiques, basées sur le sens****