Les vols d'étourneaux fonctionnent comme des systèmes critiques

mercredi 3 novembre 2010, par Ornithomedia

Sommaire

- Qu'est-ce qu'un système critique dans la nature ?
- Méthode et résultats
- Interprétation
- À ne pas confondre avec le comportement d'un groupe dirigé

Cet article présente admirablement les systèmes d'interaction et de communication organisant l'action de certains groupes d'animaux grégaires. Il est repris du site Ornithomedia.com, où on le trouvera dans sa version originale. Nous remercions Ornithomedia de nous avoir autorisé à le reproduire dans le cadre de nos recherches sur les nouveaux modèles scientifiques concernant les manières de fluer dans les systèmes complexes.

Les grands groupes d'Étourneaux sansonnets *(Sturnus vulgaris)*, qui se forment notamment en hiver près des dortoirs, nous émerveillent : ils volent de façon coordonnée comme s'ils ne formaient qu'un seul être, réagissant tous ensemble de façon quasi-instantanée. Les résultats d'une étude intitulée « Scale-free correlations in starling flocks » menée par des chercheurs italiens ont été publiés en ligne le 14 juin 2010 dans la revue *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS). Ils ont constaté que les interactions comportementales entre individus étaient indépendantes de la taille du vol, suggérant que ces groupes se comportaient comme des systèmes critiques réagissant de façon optimale aux perturbations environnementales.

Qu'est-ce qu'un système critique dans la nature ?

La théorie de l'auto-organisation critique est une théorie de la complexité qui permet d'étudier les changements brutaux du comportement d'un système. Cette théorie enseigne que certains systèmes, composés d'un nombre important d'éléments en interaction dynamique, évoluent vers un état critique, sans intervention extérieure et sans paramètre de contrôle. L'amplification d'une petite fluctuation interne peut mener à un état critique et provoquer une réaction en chaîne menant à une catastrophe (au sens de changement de comportement d'un système).

Cette théorie est basée sur deux concepts clefs : l'auto-organisation et la criticalité.

Le terme d'auto-organisation désigne la capacité des éléments d'un système à produire et maintenir une structure à l'échelle du système sans que cette structure apparaisse au niveau des composantes et sans qu'elle résulte de l'intervention d'un agent extérieur. L'auto-organisation se différencie de

l’organisation en ce sens où l’organisation émergente ne provient pas de forces extérieures (même si le système reste ouvert sur son environnement) mais de l’interaction de ses éléments. Si on applique ce concept à l’étude des sociétés, cela signifie qu’en plus du principe régulateur, il n’y a ni leader, ni centre organisateur, ni programmation au niveau individuel d’un projet global. Ces phénomènes d’auto-organisation s’observent par exemple aussi bien dans les sociétés animales (organisation d’une fourmilière, de vols d’oiseaux) que dans les sociétés humaines (applaudissement, panique collective, intention de vote) ou les systèmes géographiques (les réseaux urbains).

La criticalité caractérise les systèmes qui changent de phase, par exemple le passage de l’eau à la glace. En fait, le système devient critique quand tous les éléments s’influencent mutuellement. Lorsque cet état critique est atteint, le système peut bifurquer, c’est-à-dire qu’il change brutalement de comportement pour passer d’un attracteur à un autre. Cet état critique est un attracteur du système dynamique atteint à partir de conditions initiales différentes.

Cet état critique est dit auto-organisé car l’état du système résulte des interactions dynamiques entre ses composantes et non d’une perturbation externe. L’auto-organisation est donc un processus qui passe par des états critiques.

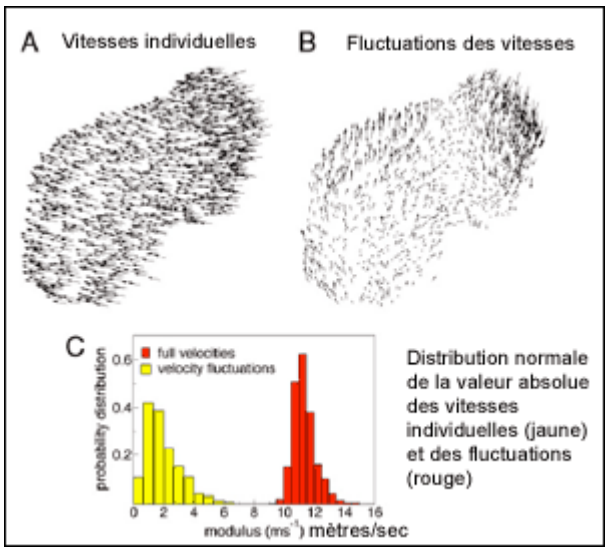
La notion de criticalité auto-organisée a été proposée par Per Bak, Chao Tang et Kurt Wiesenfeld en 1987. Dans son livre intitulé *How Nature Works – The science of self-organized criticality*, Per Bak applique cette théorie à de nombreux phénomènes complexes, notamment à l’évolution phylogénique des espèces vivantes, aux mécanismes déclenchant des tremblements de terre, des avalanches,…

Pour illustrer cette théorie, P. Bak *et al.* utilisent un modèle simple : le tas de sable. L’expérience consiste à ajouter régulièrement des grains à un tas de sable. Petit à petit le sable forme un tas dont la pente, en augmentant lentement, amène le tas de sable vers un état critique. L’ajout d’un grain peut alors provoquer une avalanche de toute taille, ce qui signifie qu’une petite perturbation interne n’implique pas forcément de petits effets.

Méthode et résultats

Andrea Cavagna, Alessio Cimarellib, Irene Giardinaa, Giorgio Parisi, Raffaele Santagati, Fabio Stefanini et Massimiliano Vialea, des chercheurs italiens (Consiglio Nazionale delle Ricerche et Università di Roma "La Sapienza") ont étudié des grands groupes d’étourneaux dans un grand dortoir hivernal à Rome durant les hivers entre 2005 et 2007. Les bandes d’oiseaux (entre 122 et 4 268 oiseaux chacune) passaient leurs journées à la campagne et revenaient en ville avant le coucher du soleil, réalisant de véritables shows aériens coordonnés avant de s’installer pour la nuit. Ces spectacles ressemblaient à des "danses" au cours desquelles les groupes se déplaçaient et tourbillonnaient ensemble.

A) Projection en 2D des vitesses des oiseaux d’un vol à un instant donné. Le groupe est très ordonné et les vecteurs sont alignés.



B) Projection en 2D des fluctuations individuelles de vitesses du même groupe à un instant donné. Deux larges domaines d'oiseaux fortement corrélés sont visibles.

C) Distribution normale de la valeur absolue des vitesses individuelles et des fluctuations de vitesses (Source : PNAS)

Les chercheurs ont utilisé une méthode stéréo-photogrammétrique qui permet de mesurer, avec une précision remarquable, les déplacements incrémentaux d'un nombre quelconque de points d'un objet plan soumis à une transformation. Des techniques de reconstitution par ordinateur pour construire les positions en 3D et les vitesses individuelles des oiseaux pour chaque photographie (10 images par seconde) ont complété le dispositif technique.

Ils ont mesuré les positions tridimensionnelles et les vitesses des différents oiseaux. Afin d'en savoir plus sur les réponses collectives aux perturbations extérieures, ils ont aussi étudié comment les fluctuations de la vitesse d'un oiseau étaient corrélées à celle d'un autre oiseau.

Ils ont établi la distribution normale du module de la vitesse et des variations de la vitesse de chaque oiseau pour un groupe typique. Le module des fluctuations est en moyenne plus faible que celui des vitesses.

Des mesures ont été faites sur des groupes de taille variable, et les chercheurs ont constaté que la longueur de corrélation (= valeur nulle de la fonction mathématique de corrélation définie par les chercheurs) variait de façon linéaire avec la taille du groupe, ce qui signifie en fait qu'elle est indépendante du nombre d'oiseaux.

Interprétation

Les corrélations entre étourneaux sont donc indépendantes du nombre d'individus : le changement d'état du comportement d'un oiseau affecte et est affecté par celui des autres individus du groupe, quelle que soit la taille de celui-ci. Les mouvements de chaque oiseau sont ainsi influencés par ceux de tous les autres, comme s'ils étaient reliés entre eux, permettant une coordination parfaite de

l'ensemble. Ce sont des corrélations comportementales indépendantes de la taille d'une population, qui s'observent également pour des événements non biologiques comme les avalanches ou la formation de cristaux. Ce sont des systèmes critiques au sein desquels des transformations quasi-instantanées peuvent se produire passé un seuil critique de complexité.

Vol d'Étourneaux sansonnets *(Sturnus vulgaris)*, Chavornay (Suisse), janvier 2010, Photo : Joël Bruezière / www.eyesonsky.com

Quand un groupe d'étourneaux agit comme s'il constituait une entité unique, il se comporte comme un système critique capable d'optimiser sa réponse collective aux défis externes, comme l'attaque d'un prédateur.

La taille des groupes d'étourneaux étudiés variait de 122 à 4 268 oiseaux, mais elle n'avait pas d'influence sur les types de mouvements et sur leur coordination. Dans tous les cas, si un oiseau se retournait et changeait de vitesse, alors tous les autres oiseaux le faisaient également. Ce qui était le plus surprenant était le caractère quasi-instantané du traitement du signal, ce qui constitue encore un vrai mystère.

La synchronisation de la vitesse et de l'orientation se rencontrent aussi au sein des systèmes critiques. Les chercheurs citent l'exemple du ferromagnétisme. Quand la température augmente, les moments magnétiques des particules d'un aimant deviennent de moins en moins liés au réseau cristallin et s'orientent plus facilement sous l'effet d'un champ extérieur. La susceptibilité magnétique augmente ainsi rapidement à l'approche de la température de Curie, puis s'annule brutalement. Au-delà de sa température de Curie, le matériau devient paramagnétique et l'aimantation spontanée est nulle. Si l'on augmente le degré d'ordre du système (en diminuant le « bruit »), on rend les particules moins sensibles aux changements subis par leurs voisins, ce qui diminue la corrélation et la réponse globale de l'aimant. Trop de bruit détruit aussi la corrélation. Il faut donc une quantité exacte de bruit pour produire une réponse optimisée, indépendante du nombre de particules, qui est obtenue exactement à la température de Curie.

Chez les vols d'étourneaux, la quantité optimale de bruit (qui correspond à une déviation par rapport aux règles de coordination) qui permet d'obtenir une coordination optimale du groupe, indépendante de sa taille, doit faire partie du patrimoine évolutionnaire de l'espèce.

À ne pas confondre avec le comportement d'un groupe dirigé

Ce comportement auto-organisé d'un vol d'étourneaux est différent de celui d'un groupe qui suivrait un chef de file. Un tel groupe se dirigerait aussi suivant la même direction et semblerait parfaitement ordonné, mais il n'y aurait pas de transmissions quasi-instantanées d'informations entre les individus et les fluctuations comportementales seraient indépendantes : les changements de direction d'un oiseau donné seraient différents de ceux imprimés par l'oiseau-leader, et auraient peu d'impact sur ceux des autres membres du groupe. Le comportement de l'étourneau en groupe est ainsi un exemple d'auto-organisation, et la réponse collective de cette espèce grégaire à des événements perturbants tels que les attaques de prédateurs lui donne un net avantage évolutif. Les interactions au sein d'un grand groupe fournissent à chaque animal une gamme de perceptions effectives beaucoup plus large que s'il était isolé, améliorant ainsi la réponse globale du groupe aux perturbations.

À lire aussi sur Ornithomedia.com :

– Mouvements aériens coordonnés : le cas des étourneaux

– Hiérarchie dynamique au sein des groupes de pigeons

Sources :

– Andrea Cavagna, Alessio Cimarelli, Irene Giardina, Giorgio Parisi, Raffaele Santagati, Fabio Stefanini et Massimiliano Viale (2010). Scale-free correlations in starling flocks. PNAS. Date de mise à jour : 14/06. http://www.pnas.org/content/early/2010/06/11/1005766107.abstract

– Damienne Provitolo. Théorie de l'auto-organisation critique. Hypergeo. http://www.hypergeo.eu/spip.php?article426

– Wikipedia (201). Auto-organisation. http://fr.wikipedia.org/wiki/Auto-organisation