



Chœurs lumineux

IAN STEWART

Comment les lucioles synchronisent leurs émissions de lumière.

Peu après le coucher du soleil, en Asie du Sud-Est, la vie offre à ceux qui savent aller l'admirer l'un des plus remarquables spectacles : des nuées de lucioles clignotent en chœur. Dans les années 1930, le biologiste Hugh Smith décrivit le phénomène : «Imaginez un arbre de près de 15 mètres de haut et dont, semble-t-il, chaque feuille porte une luciole. Toutes ces lucioles clignotent à l'unisson, environ trois fois par deux secondes. Entre chaque émission de lumière, l'arbre s'obscurcit complètement. Imaginez une dizaine de kilomètres de bord de rivière, avec une file ininterrompue d'arbres qui portent tous des lucioles ; tous les arbres s'éclairent ensemble, et tous s'éteignent ensemble !»

Pourquoi les émissions sont-elles synchrones ? Une théorie propose que l'évolution a présidé à l'apparition de ce curieux

phénomène : seuls les mâles émettent de la lumière, afin d'attirer les femelles ; or, des flashes simultanés se voient de plus loin, surtout dans les zones où la végétation est dense.

Il existe une autre explication, mathématique. Les lucioles émettent de la lumière grâce à un composé qui réagit chimiquement. Elles ont une réserve de ce composé, qu'elles libèrent par bouffées, selon un cycle. Tout se passe comme si les lucioles comptaient régulièrement de 0 à 100, libérant le composé à 100, tandis qu'elles remettent alors le compteur à 0. L'état de la luciole est ainsi déterminé par la valeur du compteur interne. C'est la «phase» de leur cycle.

Un tel cycle est un oscillateur, c'est-à-dire un système dont la dynamique naturelle est périodique. Les oscillateurs sont nombreux, dans le monde vivant :

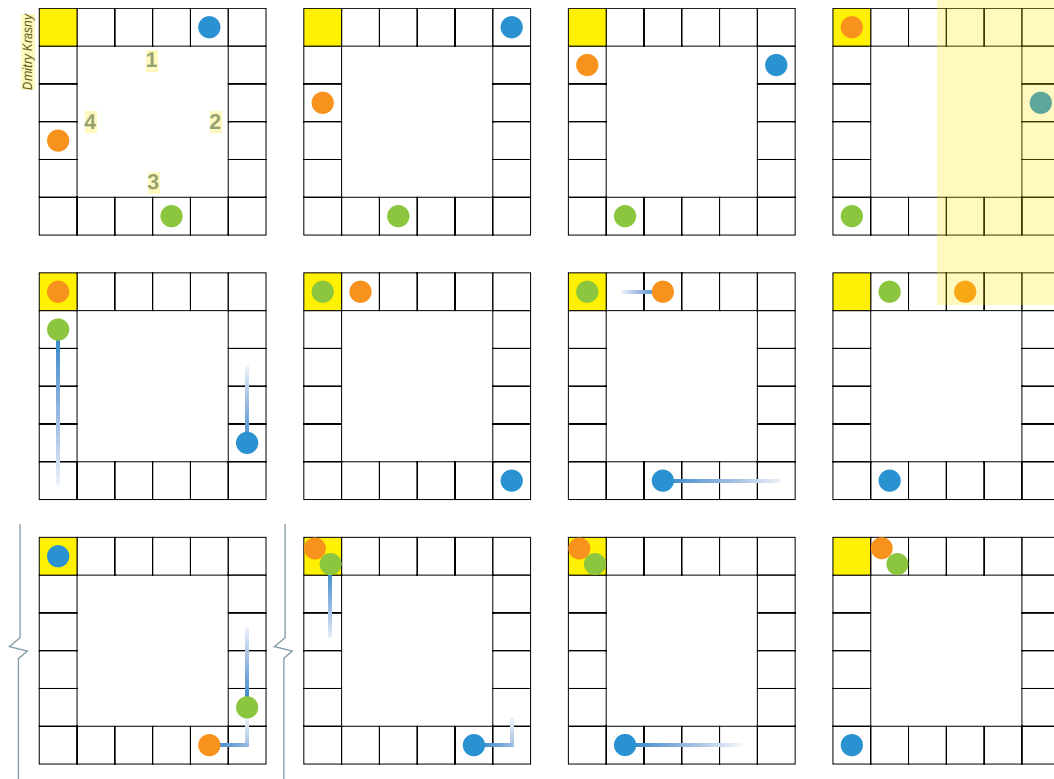
ils font battre le cœur ou gonfler les poumons.

Pourquoi des systèmes oscillent-ils ? Parce que c'est le comportement le plus simple après l'immobilité complète. Pensez au tigre captif qui parcourt cycliquement sa cage ou, en physique, aux vibrations d'une corde de violon. La corde ne peut rester immobile, quand elle est perturbée par l'archet ; elle ne peut faire n'importe quel mouvement, parce que ses extrémités sont fixes. De ce fait, elle vibre périodiquement.

Dans le cas des lucioles, les oscillations sont créées par un mécanisme d'accumulation et de décharge : ce mécanisme s'observe chaque fois qu'une quantité d'un composé augmente jusqu'à un seuil. Une fois le seuil atteint, le système «décharge» (pour les lucioles, c'est le flash), et la quantité de composé stocké s'annule, avant de recommencer à croître.

Comment expliquer le synchronisme des lucioles ? Les observations des entomologistes, dans la nature ou en laboratoire, ont montré que certaines lucioles qui perçoivent un flash d'un congénère sont excitées, et leur phase est alors avancée vers le seuil de décharge.

Leurs oscillateurs sont «couplés» : chacun d'eux modifie l'état des autres. Le mathématicien hollandais Christiaan Huygens étudia de tels oscillateurs alors qu'il mettait au point des pendules dont la période ne dépend pas de l'amplitude de l'oscillation : il vit que deux pendules accrochés à une même étagère se calaient progressivement. Ce phénomène de synchronisation est courant, mais l'élucidation du mécanisme de synchronisation est parfois difficile (attention : la synchronisation des oscillateurs n'a pas toujours lieu ; ainsi chaque membre



Le jeu de flash solitaire reproduit le comportement des lucioles. Cette série de positions se lit de gauche à droite et de haut en bas. Trois lucioles (points de couleur) se déplacent dans le sens des aiguilles d'une montre. Quand une luciole atteint la case flash (en jaune), elle émet un flash qui fait avancer les autres lucioles (lignes bleues) d'un nombre de cases égal au numéro de la rangée sur laquelle les lucioles se trouvent. Les étapes omises sont signalées par une ligne grise.

d'un animal est associé à un oscillateur, mais tous ces oscillateurs ne sont pas en phase).

Le physiologiste Charles Peskin fut un des pionniers des couplages d'oscillateurs. En 1975, il étudia la synchronisation des fibres musculaires du cœur et il proposa un modèle détaillé des systèmes à accumulation et décharge. Il proposa notamment une équation qui décrivait l'accumulation en fonction de la phase ; cette même équation décrit le comportement lumineux des lucioles. Dans le modèle de Ch. Peskin, le couplage n'est assuré que par les décharges : un oscillateur qui atteint son seuil de décharge envoie à ses voisins un signal qui avance leur phase vers le seuil de décharge. Quand cette stimulation fait dépasser le seuil d'un des oscillateurs, ce dernier émet à son tour un signal, et ainsi de suite.

Or les composés luminescents de certaines lucioles sont précisément modifiés par un mécanisme de ce type, la stimulation étant la lumière reçue d'autres lucioles. Quand une luciole perçoit le flash d'un congénère, elle est «excitée», et sa phase se rapproche de celle de la décharge. Ch. Peskin a montré que, pour deux oscillateurs à accumulation et décharge, avec des impulsions couplées, qui obéissent à son équation, la synchronisation survient généralement (si le déphasage initial est égal à des valeurs particulières, les flashes ne se synchronisent pas, et les émissions de lumière alternent plutôt ; cependant cet état est instable, et la moindre perturbation conduit à la synchronisation).

Ch. Peskin a également supposé qu'il en serait de même pour tout réseau d'oscillateurs couplés à accumulation et décharge. Dans un article de 1990, Renato Mirollo et Steven Strogatz ont démontré l'hypothèse de Ch. Peskin, mais pour une équation plus générale que la sienne. Sous réserve de quelques hypothèses techniques, R. Mirollo et S. Strogatz montrèrent que, pour un système composé d'un nombre quelconque d'oscillateurs couplés identiques, à accumulation et décharge, l'état final est le synchronisme (sauf pour quelques rares conditions initiales qui conduisent à un comportement périodique, et ces états sont instables).

Leur démonstration est fondée sur un phénomène nommé absorption, qui a lieu lorsque deux oscillateurs déphasés se synchronisent et restent synchronisés. Le couplage étant totalement symétrique (tous les oscillateurs agissent les uns sur les autres de la même façon), un groupe d'oscillateurs qui s'est accordé reste synchrone. Mathématiquement on démontre qu'une suite de telles absorptions doit finalement mettre en phase tous les oscillateurs.

Vous pouvez étudier des groupes de lucioles à l'aide d'un modèle simple, le «Jeu du flash solitaire», qui se joue avec des jetons que l'on déplace sur les bords d'un damier ou sur la plaque d'un jeu de Monopoly ; vous pouvez aussi construire un carré de six cases de côté (voir la figure 1). On n'utilise que le pourtour, où l'on marque un coin que l'on nomme «seuil», ou «coin flash». Les quatre côtés sont alors numérotés 1, 2, 3, 4 à partir de cette case, dans le sens des aiguilles d'une montre. Quelques jetons placés aléatoirement représentent les lucioles. La position d'une luciole par rapport au coin flash, dans le sens des aiguilles d'une montre, indique sa phase. Les lucioles qui atteignent le seuil émettent un flash, puis reconstituent leurs réserves de composé luminescent selon quatre règles.

Règle 1 : on déplace chaque luciole d'une case dans le sens des aiguilles d'une montre. Bien qu'on doive déplacer les lucioles les unes après les autres, considérez que leur mouvement est simultané.

Règle 2 : quand une luciole tombe sur le coin flash, on déplace toutes les autres lucioles dans le sens des aiguilles d'une montre ; l'amplitude du déplacement est égale au numéro de la rangée sur laquelle se trouve initialement la luciole déplacée. Ainsi une luciole sur le côté 3 est déplacée de trois cases dans le sens des aiguilles d'une montre. Toutefois, quand ce déplacement conduit une luciole à dépasser le coin flash, la luciole s'arrête au coin flash (cette étape représente le couplage). Les autres lucioles perçoivent le flash qui les avance vers leur seuil.

Règle 3 : quand une luciole atteint le coin flash à la suite du pas 2, on répète ce pas ; on déplace une nouvelle fois tous les jetons.

Règle 4 : appliquer à nouveau les quatre règles.

Notons que l'arrivée de deux lucioles ou plus sur le coin flash correspond à une synchronisation ; on les déplace ensuite en bloc. Dans l'exemple de la figure 1, c'est ce que font deux des lucioles. Si vous poursuivez cet exemple, vous observerez que les trois lucioles finissent synchrones.

Je soupçonne que, pour certaines tailles de damier, on trouve des placements initiaux qui conduisent à des comportements périodiques asynchrones qui correspondent aux états instables de la théorie de Mirollo-Strogatz. Le Jeu du flash est un modèle à nombre fini d'états plus simple que celui qui a été analysé mathématiquement, et il pourrait ne pas se comporter exactement de la même façon. À vous de jouer : faites-moi part de vos découvertes.