



Seller un éléphant

La colonne vertébrale de l'éléphant doit être protégée des blessures qui risquent de survenir quand l'animal tire des troncs d'arbre de plus d'une tonne. Un coussin de feuilles et d'écorce sert de protection épaisse et moelleuse, sur lequel repose l'attelage. Cette « selle » empêche la chaîne de s'enfoncer dans le dos de l'éléphant. L'oozie s'assied sur le cou de l'animal. Ces photographies, prises par l'auteur dans un camp d'exploitation en Thaïlande (à droite) montrent comment les éléphants sont sellés, selon une tradition séculaire.





LE BAIN est un rituel quotidien qui peut durer une heure. C'est un moment privilégié, pendant lequel l'oozie frotte son éléphant, le lave et noue des liens avec lui. Les éléphants vivant en moyenne entre 50 et 60 ans, parfois même jusqu'à 80 ans, cette relation peut durer toute une vie.



Michael SCHMIDT est vétérinaire au zoo de Portland.

La couverture

IAN STEWART

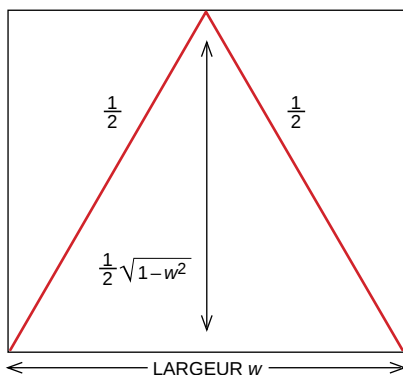
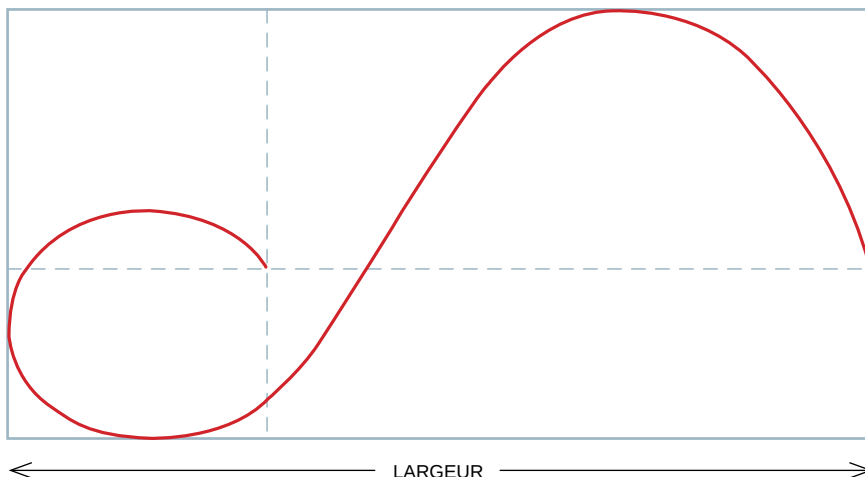
Quelle est la plus petite surface recouvrant une courbe de longueur unité ?

Le problème de la «Couverture de maman Ver» consiste à déterminer la plus petite surface à deux dimensions capable de recouvrir toute courbe d'un seul tenant de longueur unité. Cette singulière appellation s'éclaire quand on considère que la surface est une couverture et la courbe comme un bébé ver endormi. Sa mère a besoin de ce que nous appellerons une couverture universelle – une couverture qui recouvre bébé ver quelle que soit sa position. Il y a quelques décennies, le mathématicien Leo Moser, de l'Université de l'Alberta, au Canada, posa une question déconcertante, restée jusqu'à ce jour sans réponse : quelle est la forme de la couverture universelle d'aire minimale ?

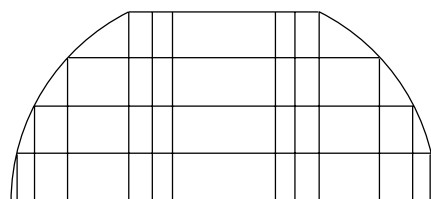
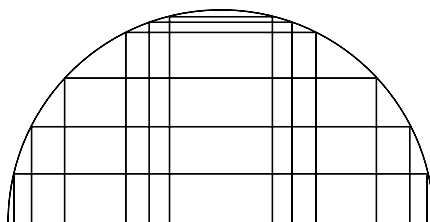
Pour le problème général, une solution évidente est un disque circulaire de rayon unité, dont l'aire est π , soit 3,141... Si le centre du disque est placé sur la tête

de bébé ver, sa queue est au plus à une unité de distance. En 1973, Jnarnetk Gerriets et George Pool, de l'Université d'État d'Emporia, décrivent une couverture pentagonale n'ayant qu'une aire de 0,286... Jusqu'à récemment, personne ne fit mieux. Mais, il y a quelques mois, David Reynolds, de la *Credence Systems Corporation*, à Beaverton, Oregon, me fit parvenir une démonstration selon laquelle une couverture en forme d'un certain quadrilatère d'aire $(4 + \sqrt{3})/24$, environ 0,239, est universelle.

Résultat dramatique : une certaine variation de sa méthode pourrait conduire à des couvertures universelles encore plus petites. Toutes les solutions seront les bienvenues dans «Réaction», mais, s'il vous plaît, joignez une démonstration – ou une solide preuve expérimentale – du caractère universel de votre surface.



1. On associe des parcelles rectangulaires pour recouvrir toute courbe de longueur un (en haut). La parcelle la plus grande est celle qui doit recouvrir les deux côtés égaux d'un triangle isocèle (à gauche). La famille formée par la totalité de ces parcelles peut être disposée de sorte qu'elles recouvrent un demi-cercle (au centre). Et l'on peut encore en rogner le sommet pour obtenir une couverture universelle d'aire encore plus petite (à droite).



LE PATCHWORK

Pour illustrer la méthode de D. Reynolds, nous allons l'utiliser pour montrer qu'un demi-cercle de diamètre unité – de surface $\pi/8$, environ 0,392 – est universel. Étant donné une position du bébé ver, traçons le segment joignant sa tête et sa queue (ou, s'il s'est lové en boucle, un segment quelconque coupant son corps). Puis trouvons le plus petit rectangle entourant le bébé ver ayant deux côtés parallèles au segment (voir la figure 1). Appelons le rectangle une parcelle. Sa largeur, w , est comprise entre 0 et 1. Pour chaque valeur de w , nous pouvons estimer la hauteur du rectangle. La plus grande hauteur pour toute parcelle, égale à $\sqrt{1-w^2}/2$, est obtenue lorsque le bébé ver s'endort en forme de triangle isocèle.

Nous avons ainsi identifié une famille de parcelles, une pour chaque w , qui est «collectivement» universelle. Quelle que soit la manière dont bébé ver s'est lové, une au moins de ces parcelles le recouvre. Nous pouvons construire une couverture universelle en les surimposant. D. Reynolds appelle cette opération le patchwork de bébé ver, encore qu'elle évoque plutôt un recouvrement : les bords n'ont pas besoin d'être jointifs et, en fait, plus ils se recouvrent et mieux c'est. Qu'importe la manière dont les parcelles sont arrangées, la région qu'elles recouvrent est toujours universelle. Pour voir cela, imaginons que le bébé ver se soit enroulé et trouvons alors une parcelle qui le recouvre. Comme le patchwork de bébé ver contient cette parcelle, il recouvrira le bébé ver.

Notre tâche suivante est de recouvrir les parcelles pour obtenir l'édredon minimal. Si elles sont disposées symétriquement et à bases alignées, elles couvrent un demi-cercle de rayon unité. En conséquence, un tel demi-cercle est bien universel. Mais il n'y a pas de raison spéciale de choisir cet arrangement, ni de prendre des parcelles rectangulaires, et enfin il n'est pas indispensable d'utiliser la totalité des largeurs, de 0 à 1.

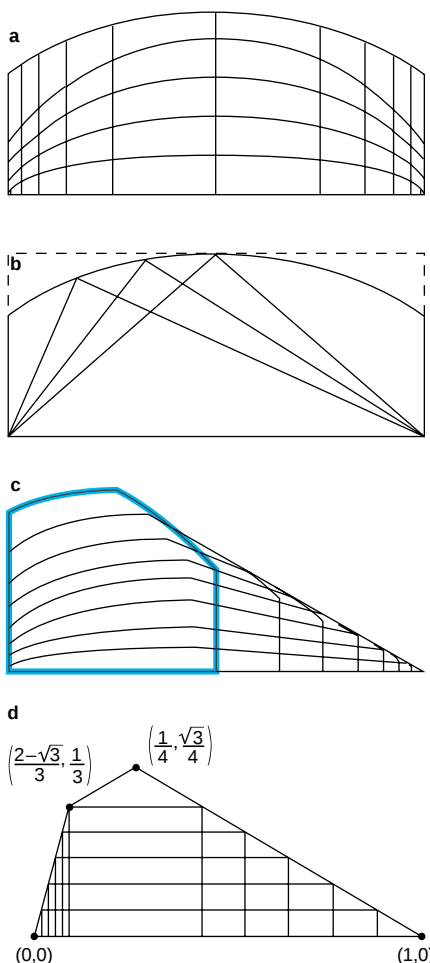
2. On obtient des couvertures plus petites (a) avec des parcelles ayant un bord elliptique (b). Quand on examine comment bébé ver peut se lover sous la couverture, on obtient des améliorations supplémentaires (c). La plus petite couverture connue a une aire égale à 0,299... (d).

Lorsque $w = \sqrt{5}/5$, la parcelle est carrée, et toute parcelle de hauteur supérieure à $\sqrt{5}/5$ peut être tournée de 90 degrés, après quoi sa nouvelle hauteur est inférieure à $\sqrt{5}/5$. Si l'on omet ces dernières parcelles dans le demi-cercle, on réduit ce dernier à une zone aplatie, d'aire réduite, mais qui reste universelle.

Un raisonnement à peine plus complexe impliquant de faire tourner bébé ver lui-même conduit D. Reynolds à conclure qu'en fait on peut retirer toutes les parcelles pour lesquelles w est inférieur à $1/2$. Qui plus est, la hauteur maximale de la parcelle n'est nécessaire qu'au milieu, et chaque parcelle peut être limitée par un arc d'ellipse. Quand on tient compte de ces améliorations, on obtient la couverture représentée sur la figure de droite. À première vue, il peut sembler que nous ayons poussé la méthode à son extrême limite, mais la couverture peut encore être rognée. Ainsi, si bébé ver touche la limite elliptique de la parcelle, disons à gauche de son milieu, alors il ne peut la toucher aussi à droite. De la sorte, nous pouvons éliminer une partie du coin supérieur droit de chaque parcelle. La réunion des parcelles résultantes conduit à une couverture limitée par un arc d'ellipse et trois segments.

En construisant ces parcelles, nous avons supposé que la tête et la queue de bébé ver restaient en quelque sorte fixées sur le sol. L'arc elliptique de la frontière provient d'une seule parcelle, celle de largeur $1/2$ (représentée en bleu sur l'illustration c à droite). Mais tout ver recouvert par cette parcelle peut être glissé vers l'extrémité droite de la couverture, où il reste beaucoup d'espace libre. En envisageant plusieurs formes clés pour le ver, D. Reynolds montra que l'arc d'ellipse et le segment vertical de notre précédente couverture pouvaient être remplacés par deux segments de droites. Le résultat est une couverture d'aire de seulement 0,239... comme nous l'avons mentionné.

Lorsqu'on approfondit ce type d'optimisation géométrique, il est souhaitable de garder à l'esprit qu'il peut ne pas exister de solution optimale. Même si l'on trouve une suite de solutions, chacune meilleure que la précédente, une telle suite peut ne pas converger ou converger vers quelque chose qui ne soit pas optimal. Richard Courant et Herbert Robbins introduisirent un bon exemple de ce cas dans leur ouvrage classique *What*



Is Mathematics? C'est un problème que j'appelle : «La tente de maman mouche». Bébé mouche dort sur un sol plat, une patte tendue en l'air. Sa maman le recouvre d'une couverture qui, telle une tente, touche le sol de tous côtés. Quelle tente a l'aire la plus petite ?

Une tente conique à base circulaire convient et, à hauteur donnée, sa sur-

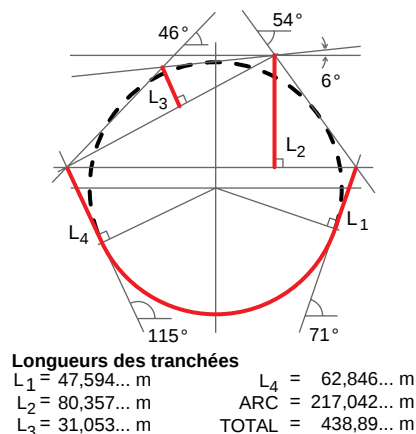
face décroît lorsque celle de sa base décroît. En fait, on peut trouver une tente d'aire aussi petite que l'on veut, ce qui est impossible. Un cône de base d'aire 0 n'est pas une surface, mais un segment de droite, de sorte qu'il ne saurait recouvrir bébé mouche en un sens raisonnable. Ainsi, pour la «tente de maman mouche», il n'y a pas de solution optimale – si l'on exige que la tente soit une surface.

Aussi n'est-il pas évident que «la couverture de maman ver» ait une solution définitive. Cela dépend du type de couverture que l'on considère. Tous les vers polygonaux de longueur 1, par exemple, peuvent être recouverts par une couverture d'aire nulle. De telles couvertures existent en grand nombre, mais elles sont pleines... de trous : le problème pourrait alors être plus adéquatement désigné comme «Filet de maman anguille». À l'opposé, John Marstrand, de l'Université de Bristol, Angleterre, prouva en 1979 qu'aucune couverture d'aire nulle ne saurait couvrir tout ver régulier (par régulier, j'entends une courbe ayant une tangente en tout point). Le résultat de J. Marstrand suggère que la couverture de maman ver possède une solution bien définie, une solution intéressante. Peut-être bien celle de D. Reynolds.

Mais les mathématiciens amateurs peuvent encore trouver du plaisir à essayer d'en trouver de meilleures. Qui plus est, le problème admet de nombreuses variations, presque toutes non résolues : existe-t-il une couverture universelle de périmètre minimum ? Et que dire du «Sac de couchage de bébé serpent», un sac qui doit contenir un serpent de longueur un, quelle que soit la manière dont il se contorsionne en trois dimensions ? Et pouvez-vous examiner le problème des vers qui vivent à la surface d'une sphère ?

Réaction

John Day, de Columbus, Ohio, m'envoie une série de lettres à propos de «Un drain peut en cacher un autre» (*Pour la Science*, n° 216 et «Réaction» *Pour la Science*, n° 219). Il propose d'abord une solution à deux tranchées de longueur totale 440,64... mètres, qui améliore celle indiquée dans «Réaction» de *Pour la Science*, n° 219. Mais sa lettre indique une solution avec trois tranchées, encore meilleure puisque sa longueur totale est de 43,89... mètres (représentée ci-contre). Quelqu'un proposera-t-il une meilleure solution à quatre tranchées ?



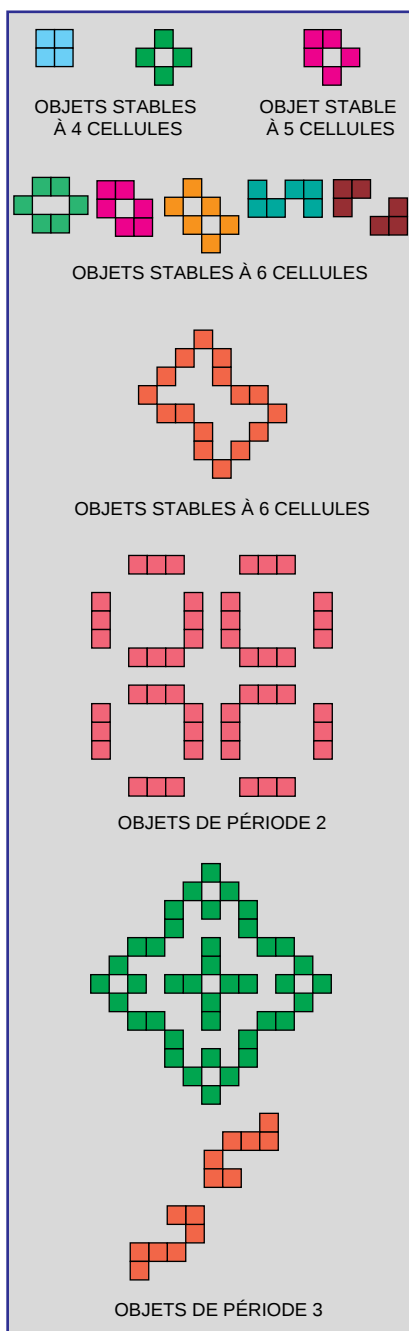
Le Jeu de la vie, toujours vivant...

JEAN-PAUL DELAHAYE

Depuis 25 ans, les biologistes du Jeu de la vie explorent une planète riche et étrange.

John Conway fixa les règles du *Jeu de la vie* il y a 25 ans et créa une science nouvelle. Depuis, les spécialistes ont poursuivi l'exploration d'un monde dont la définition tient en trois lignes, mais dont la richesse semble inépuisable. La discipline est à la croisée des chemins de la physique – on y construit des machines –, de la biologie – les êtres qu'on y étudie sont des cellules qui naissent et meurent –, des mathématiques – on y prouve parfois des théorèmes – et de l'informatique – les ordinateurs y jouent le rôle de microscopes. Ces cinq dernières années, une bande de passionnés du jeu a beaucoup fait progresser la discipline. Le monde du *Jeu de la vie* est un plan infini quadrillé dont chaque case est, soit occupée par une cellule, soit vide. Chaque case possède huit voisines et, d'une génération à l'autre, des naissances et des décès s'y déroulent mécaniquement selon la règle simplissime de Conway : si une case est vide et que trois de ses voisines sont occupées, alors une naissance s'y produit (étrange sexualité!) ; si une case est occupée, la survie n'y est possible que si deux ou trois cases voisines sont occupées ; dans tous les autres cas, la case se retrouve vide à la génération suivante. En résumé, naissance si 3 voisins, survie si 2 ou 3 voisins.

Ces règles, choisies parce qu'elles sont assez naturelles (la vie nécessite déjà de la vie, mais trop de vie provoque l'étouffement) et qu'elles engendrent un monde inattendu, ont dépassé toutes les espérances de son créateur. Toutefois les mathématiciens, qui savent traiter des problèmes d'une abstraction et d'une difficulté étourdissante, sont assez démunis pour résoudre la plupart des problèmes que pose cette biologie : lorsqu'ils les résolvent, c'est d'une façon peu satisfaisante, comme nous allons le voir. Cet incapacité laisse le champ ouvert aux étranges ingénieurs-biologistes à qui l'on doit les progrès récents que nous allons présenter.



1. Configurations stables et configurations périodiques du *Jeu de la vie*.

CROISSANCES INFINIES ET CROISSANCES RAPIDES

Après avoir constaté que certaines figures (configurations de cellules) sont stables, que d'autres sont périodiques (on en connaît des centaines maintenant), diverses questions se posent. La première est : une population de cellules peut-elle croître indéfiniment ?

La réponse, positive, a été donnée dès 1970 par des étudiants du MIT ; cependant de nouvelles démonstrations plus simples de ce résultat sont disponibles et la figure 2 en indique deux tout à fait amusantes trouvées en 1992 et 1993 : l'*Extenseur* et le *Chasse-neige*. À chaque fois, ces configurations avancent en laissant derrière elles une traînée. Cette traînée, stable pour le *Chasse-neige*, est en mouvement périodique pour l'*Extenseur*. Si vous placez un obstacle sur le chemin de ces configurations, ne serait-ce qu'un bloc de quatre cellules formant un carré (c'est la configuration stable la plus simple), sa rencontre avec le *Chasse-neige* ou la tête de l'*Extenseur* détruira celui-ci, ainsi que toute la traînée qui s'embrase à toute vitesse, laissant, après s'être consumée, des débris éparpillés.

Le *Chasse-neige* ou l'*Extenseur* créent un nombre de cellules de plus en plus grand (s'il ne rencontre pas d'obstacles), mais le nombre de cellules vivantes n'augmente que proportionnellement au temps (on dit aussi « en t ») et les cellules n'occupent qu'une petite partie de l'espace infini du plan (une bande étroite). Les questions suivantes viennent donc à l'esprit :

- Peut-on créer une configuration qui se répand petit à petit sur tout le plan avec une densité positive (par exemple, une case occupée sur deux) ?
- Peut-on créer une configuration dont le nombre de cellules augmente plus vite que le temps ?

La réponse positive à ces deux questions est donnée par une extraordinaire machine appelée le *Recouvreur-du-plan*, qui est représentée sur la figure 3 et qui n'est connue que depuis 1993. À mesure des générations, les quatre têtes de pont du *Recouvreur-du-plan* avancent, créant un carré occupé par des bandes alternativement vides et pleines qui sont stables et recouvrent la surface avec une densité de cellules de $1/2$. Comme les têtes de pont avancent à vitesse constante, la zone recouverte a une surface qui croît en fonction du carré du temps (on dit « en t^2 ») et donc, le nombre de cellules vivantes croît lui aussi « en t^2 ». Une configuration dont la croissance est « en t^2 » était déjà connue depuis les années 1970, mais elle faisait intervenir

2 069 cellules, alors qu'ici il n'y en a que 206. Tim Coe a découvert en 1995 une variante du *Recouvreur-du-plan* à 187 cellules.

La configuration limite du *Recouvreur-du-plan* est une figure stable de densité $1/2$: un réseau de lignes pleine-vide-pleine-vide-... Le réseau infini de lignes vide-vide-pleine-pleine-vide-vide-pleine-pleine-... est aussi intéressant, car il oscille : à chaque génération, les lignes pleines se vident, et les lignes vides se remplissent. Il s'y maintient donc aussi une population infinie de densité $1/2$. Une version finie de cette configuration existe, c'est le *Store vénitien* représenté sur la figure 3. Cette configuration périodique de période deux montre qu'on peut recouvrir de manière permanente un carré à bords obliques par une population de densité $1/2$, un fait qui était loin d'être évident avant que l'on n'ait découvert la délicate broderie qui en stabilise les bords.

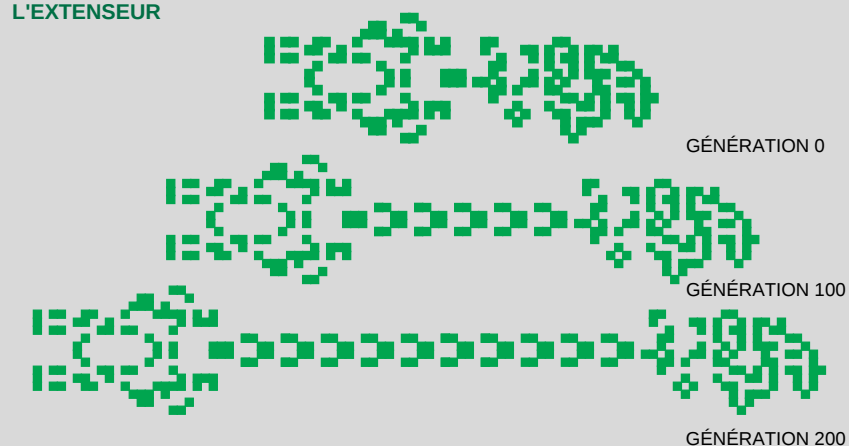
On démontre facilement que la croissance d'une configuration ne peut pas être plus rapide que «en t^2 », et donc le *Recouvreur-du-plan* est ce qui permet d'obtenir la croissance la plus rapide imaginable. L'art des ingénieurs du monde de Conway s'est exercé sur ces problèmes de croissance. À l'aide de combinaisons savantes de composants mis au point année après année depuis 25 ans, ils ont construit des objets aux taux de croissance remarquables et qui comportent plusieurs centaines de cellules, parfois plusieurs milliers. Ils ont ainsi obtenu des croissances «en $\sqrt{t}$ », «en $\log t$ » (le nombre de naissances diminue petit à petit), et « $t \log t$ », «en $(\log t)^2$ », en « $\sqrt{t}$ ». Plus amusant encore, ils ont réussi à faire croître la population d'une configuration linéairement en $C.t$, avec pour constante C le nombre irrationnel $(8 - 31\sqrt{5})/10$: la configuration calcule donc des approximations de plus en plus fines de $\sqrt{5}$.

DENTS DE SCIE, PUFFEURS ET NAVIRES

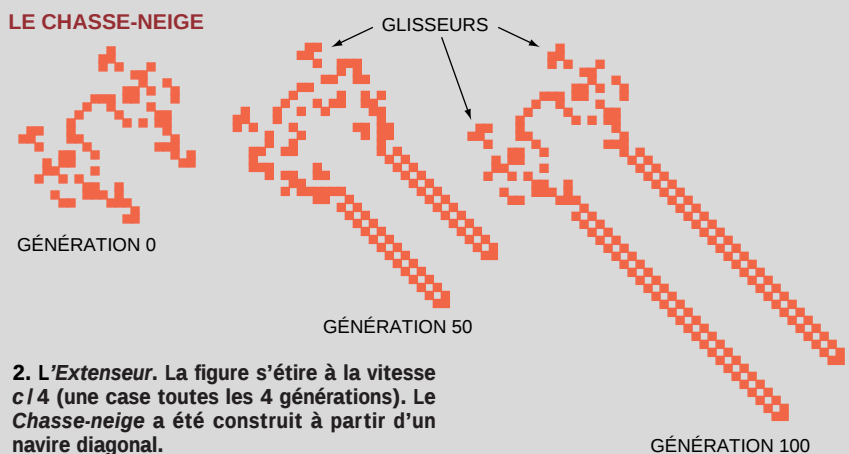
Autres merveilles, les configurations *dents de scie*, qui sont conçues d'une façon telle que le nombre de cellules augmente puis diminue, puis augmente puis diminue, etc., les maxima atteints étant de plus en plus grands (les effectifs constituent ce que les mathématiciens appellent une suite n'ayant pas de limite). La plus simple des configurations *dents de scie* connue – qui n'est pas si simple que cela! – est représentée à la figure 4, et son subtil fonctionnement y est décrit.

La plus petite configuration dont on puisse prouver qu'elle s'étend indéfini-

L'EXTENSEUR

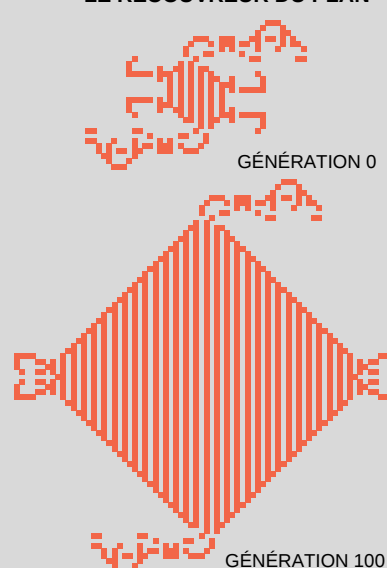


LE CHASSE-NEIGE



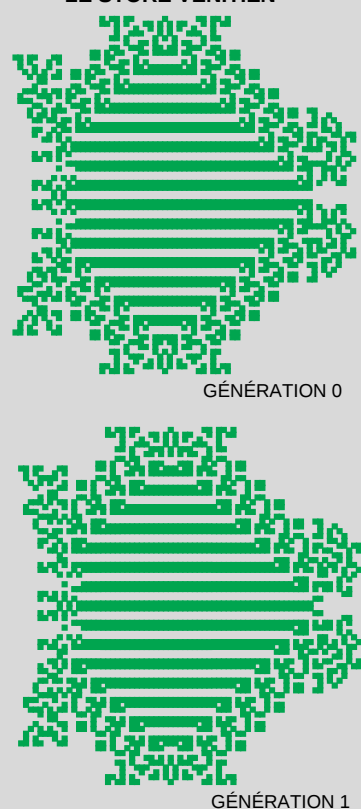
2. L'Extenseur. La figure s'étire à la vitesse $c/4$ (une case toutes les 4 générations). Le Chasse-neige a été construit à partir d'un navire diagonal.

LE RECOUVREUR DU PLAN



3. Le Recouvreur-du-plan (a). Cette figure recouvre petit à petit le plan tout entier d'une configuration stable de densité $1/2$. Les quatre têtes se déplacent à la vitesse maximum possible $c/2$. Store vénitien (b). Configuration oscillante de période 2 dont on peut faire des variantes aussi grandes qu'on le souhaite et dont le centre recouvre le plan avec une densité $1/2$.

LE STORE VÉNITIEN



ment comporte initialement 11 cellules et est représentée à la figure 5. Elle fut découverte par Charles Corderman, qui menait une recherche exhaustive sur les configurations simples. Il existe d'autres configurations qui semblent survivre longtemps et s'étendre petit à petit, mais elles ont un comportement tellement irrégulier qu'on ne réussit pas à prouver leur croissance illimitée. La figure découverte par Corderman a contribué au regain d'intérêt pour le *Jeu de la vie*, qui s'est manifesté depuis cinq ou six ans. Voici pourquoi.

La configuration de Corderman est ce qu'on appelle un *puffeur*, c'est-à-dire une configuration qui se déplace en laissant derrière elle des débris qui ici forment une sorte de grand zigzag composé de blocs carrés stables (voir la figure 5). Lorsque les traces sont régulières

(comme c'est le cas pour l'*Extenseur* et le *Chasse-neige*, qui sont aussi des puffeurs), on peut essayer de modifier le puffeur de façon à ce que les débris soient détruits. Le puffeur devient alors un *navire* : une configuration qui se déplace.

Inversement, à partir d'un navire, on peut souvent construire des puffeurs. La configuration de Corderman semblait donc pouvoir donner naissance à des navires. Mais c'est seulement en avril 1991 que Dean Hickerson réussit cette transformation que les passionnés avaient tentée sans succès pendant de nombreuses années. La transformation en navire n'est en rien évidente, puisque le résultat comporte maintenant 180 cellules, mais le travail en valait la peine, car le navire obtenu est d'un genre inconnu jusqu'alors.

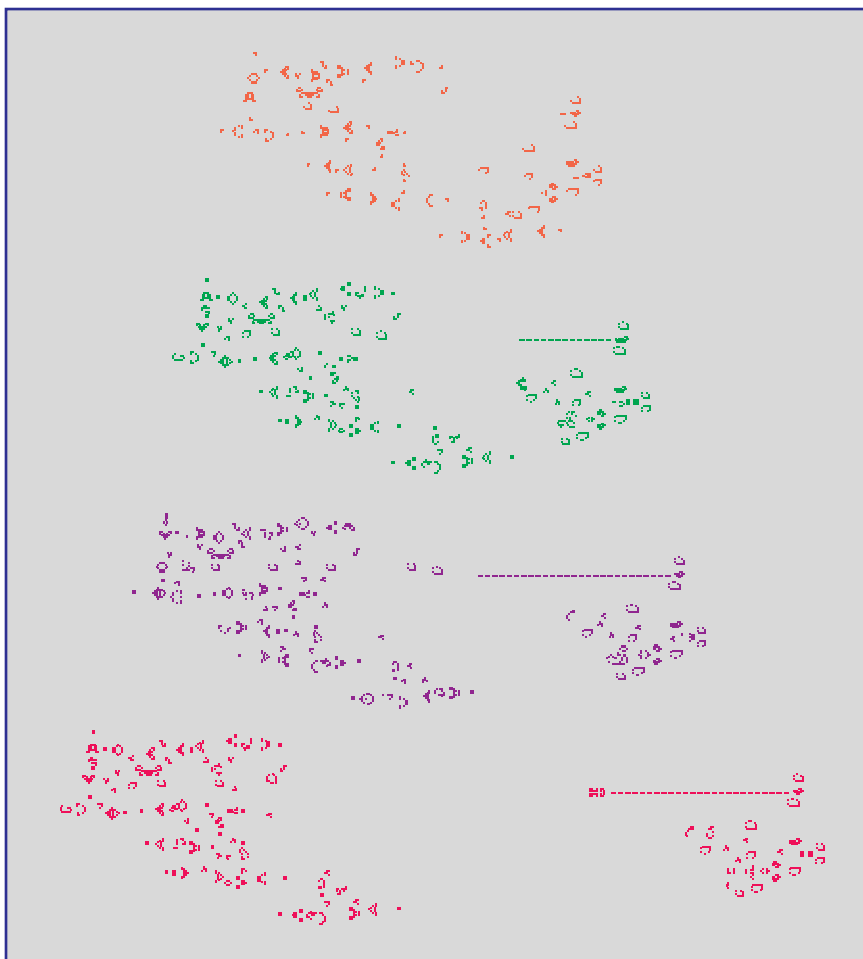
Pour le comprendre, il faut donner quelques précisions sur les navires du *Jeu de la vie*. Un navire est une configuration qui, après N étapes (sa période), se retrouve déplacée de A cases horizontalement et de B cases verticalement (navire de type $A-B$). Pour l'instant, tous les navires connus sont de type *transversal* ($A = 0$ ou $B = 0$) ou de type *diagonal* ($A = \pm B$), bien qu'il n'ait jamais été prouvé que seuls de tels navires étaient possibles (voir plus loin).

L'étude théorique montre qu'un navire de type $A-B$ a nécessairement une période N plus grande que $2(A+B)$. Par exemple, un navire qui se déplace horizontalement d'une case à la fois ne peut pas le faire en moins de deux générations, et un navire qui se déplace d'une case en diagonale (type $1-1$) ne peut pas le faire en moins de quatre générations.

Les navires connus il y a dix ans avaient tous une période N multiple de 4 et avaient tous la vitesse $c/2$ (pour les navires transversaux) ou $c/4$ (pour les navires diagonaux). La vitesse de la lumière c correspond à un déplacement d'une case par génération horizontalement, verticalement ou en diagonale : rien dans le plan de Conway ne peut se déplacer plus vite que c . Il n'y a aucune raison pour que tous les navires aient les vitesses $c/2$ ou $c/4$ et des périodes multiples de 4, et c'est sur ce point que de nombreuses découvertes ont été faites ces dernières années, dont le navire construit par Dean Hickerson qui a une vitesse $c/12$ et une période de 96. Après 20 ans de chasses infructueuses, il est étonnant qu'on ait pu en quelques années trouver tant de choses nouvelles concernant les navires du *Jeu de la vie*, au point d'ailleurs que Davis Bell leur a consacré un livre. Ce sont d'ailleurs les nouveaux navires qui ont conduit au merveilleux *Recouvreur-du-plan*.

Parmi les découvertes récentes concernant les navires, citons : des navires de période 2 (le premier fut trouvé en 1989 par Dean Hickerson), de période 3 (certains avancent à vitesse $c/2$, d'autres à la vitesse $c/3$), de période 5 (certains avancent à la vitesse $c/5$, d'autres à la vitesse $2c/5$). Des grammaires de composants ont été élaborées, qui permettent de construire des bateaux aussi longs ou larges qu'on veut, et des astuces ont été mises au point pour obtenir des bateaux de période aussi grande qu'on le souhaite.

Les méthodes utilisées pour obtenir ces résultats méritent quelques commentaires, car il serait naïf de croire qu'il suffit d'essayer au hasard en écrivant des programmes de quelques lignes. L'ex-



4. Dents de scie. Cette configuration possède un effectif en dents de scie, c'est-à-dire qui passe alternativement par un maximum (de plus en plus grand), puis par un minimum (constant de 977 cellules). La configuration est composée d'un lance-navires (à gauche) et d'un puffeur qui s'éloigne à droite. Le puffeur laisse derrière lui une traînée de clignotants (un clignotant est un groupe de trois cellules alignées côte à côte). Le lance-navires envoie une salve (unique) de deux navires qui cogne la traînée et en provoque la destruction progressive à la vitesse $2c/3$. Lorsque la traînée est détruite (on a alors atteint l'effectif minimum), le puffeur se remet à produire une traînée et envoie un navire en arrière, qui atteint au bout d'un certain temps le lance-navires (qui était resté en quelque sorte en attente sans rien lancer). Celui-ci envoie alors une nouvelle salve de navires qui provoque, quand elle l'atteint, la destruction de la traînée devenue très longue, etc.

ploration à l'aide de programmes est bien un outil essentiel pour ces découvertes, mais c'est à l'aide d'algorithmes subtils qu'on progresse. Ces algorithmes que les passionnés s'échangent entre eux et ajustent année après année, entre autres choses, analysent les essais infructueux déjà tentés pour ne pas rechercher dans des directions peu prometteuses, et essaient des configurations ressemblant à des configurations déjà connues pour être intéressantes.

Le nombre de configurations à explorer est bien trop grand pour que même les plus rapides des ordinateurs puissent découvrir des objets intéressants en procédant bêtement au hasard : le nombre de configurations différentes possibles contenues par exemple dans un carré de 10 cases sur 10 cases est de $2^{100} \sim 10^{30}$, ce qui est bien plus que ce qu'ils pourraient explorer même si on confiait aux passionnés du jeu tous les ordinateurs de la terre pendant un an.

C'est donc en perfectionnant programmes et algorithmes, en y intégrant des configurations déjà trouvées, en décomposant les figures intéressantes connues et en les recomposant différemment, bref c'est en utilisant toute l'ingéniosité dont un informaticien peut être capable que les ingénieurs-biologistes du *Jeu de la vie* trouvent ces machines étranges adaptées à la physique simplifiée du monde de Conway (n'oubliez pas que tout est toujours régi uniquement par «naissance si 3 voisins ; survie si 2 ou 3 voisins»). Peut-être que du génie est parfois utile.

LANCE-GLISSEURS ET LANCE-NAVIRES

Un glisseur est une configuration de cinq cellules (voir la figure 2) qui se déplace en quatre générations d'une case en diagonale (c'est le plus simple des navires et sa vitesse est $c/4$). Les lance-glisseurs sont des configurations qui restent fixées à un endroit, mais qui périodiquement engendrent un ou plusieurs glisseurs qui constituent alors des «courants» de glisseurs et s'éloignent indéfiniment du lance-glisseur.

Il existe aussi des lance-navires et des puffeurs lance-glisseurs ou lance-navires, et ce sont toutes ces configurations dynamiques qui constituent les composants élémentaires qu'on assemble pour construire les objets ayant un taux de croissance «en $\log(t)$ » ou autre.

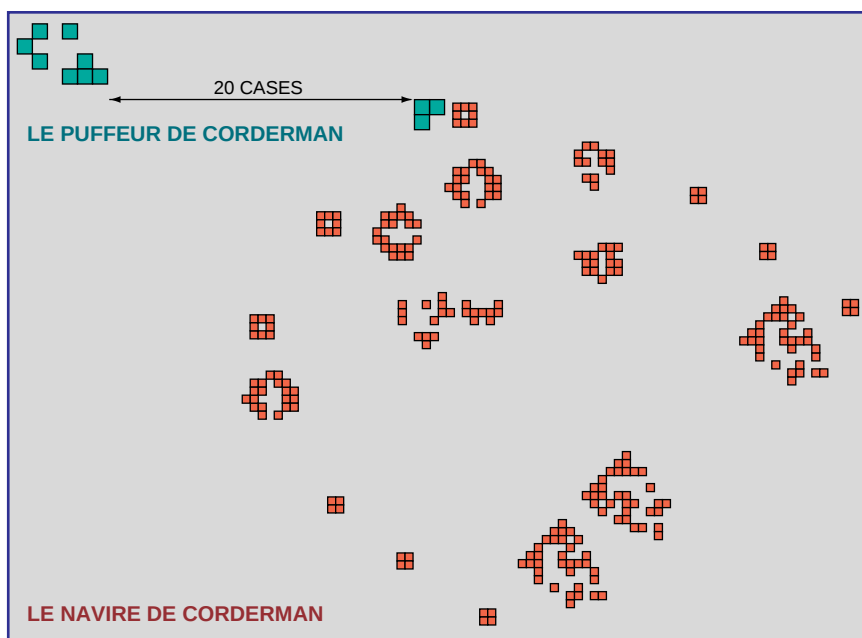
Il existe, par exemple, des lance-glisseurs qui émettent un glisseur toutes les 30 générations (le premier découvert est de cette catégorie), d'autres toutes les 23 générations. Il en existe aussi de

plus compliqués qui émettent toutes les 15 générations (celui-là est assez gros). D'autres émettent un courant irrégulier, car résultant d'une interaction complexe et difficile à analyser ; on les appelle *lance-glisseurs aléatoires*. D'autres émettent très rarement, par exemple toutes les 360 générations ou plus rarement encore.

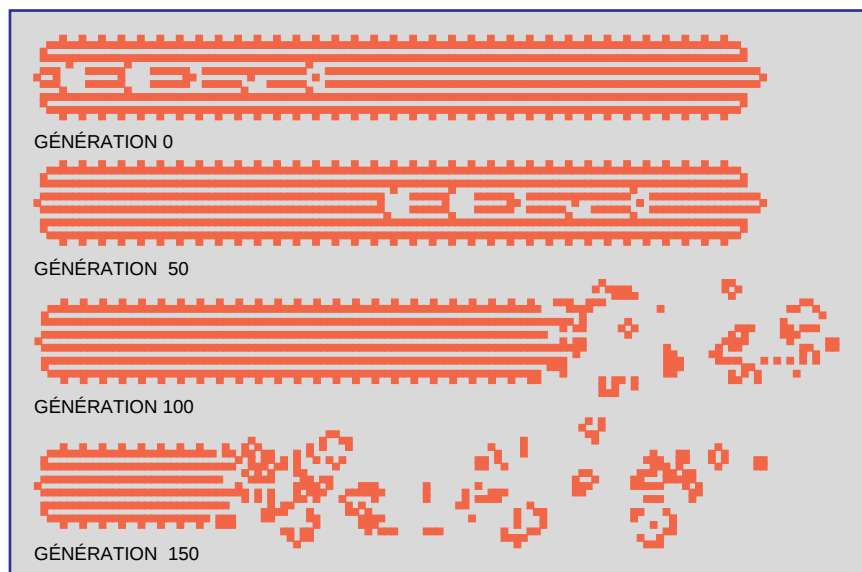
La configuration la plus extraordinaire que j'ai vue est construite à partir de navires lance-glisseurs et de navires

lance-navires. Elle synthétise une suite de navires exactement espacés comme la suite des nombres premiers : il y a un navire pour 2, un pour 3, un trou pour 4, un navire pour 5, un trou pour 6, un navire pour 7, des trous pour 8, 9, 10, etc. Ce calcul des nombres premiers par une machine du *Jeu de la vie* était prévu par la théorie.

En effet, en analysant certains des composants disponibles, dès les années 1970, John Conway a réalisé qu'on pou-



5. Le *puffeur de Corderman* est la plus petite configuration dont on est certain que l'effectif augmente indéfiniment. Le *navire de Corderman* a été tiré du puffeur de Corderman ; contrairement à tous les navires connus jusqu'en 1989, sa vitesse $c/12$ est différente de $c/2$ et de $c/4$.



6. La configuration *Zip* illustre le déplacement (à la vitesse c) d'une perturbation dans un fil. Pour exploiter ce genre de fil (plus rapide que les classiques courants de glisseurs qui avancent à la vitesse $c/4$), il faudrait en stabiliser les extrémités, concevoir des portes ET, OU, NON, dessiner des branchements et des angles droits, toutes choses qu'aujourd'hui personne n'a réussi à obtenir.

vait créer des courants de glisseurs et les faire interagir entre eux pour obtenir des portes logiques ET, OU, NON, comme dans un circuit électronique. Les éléments de base pour construire un ordinateur universel (c'est-à-dire capable de calculer toute fonction calculable) étaient donc présents et on en a déduit alors qu'en s'y prenant bien il était possible de faire calculer les nombres premiers à une configuration, ou les coefficients du binôme ou tout ce qui vous intéresse et qu'un ordinateur sait calculer.

Mais du résultat mathématique, «on peut construire une configuration qui calcule les nombres premiers» à la réalisation pratique d'une telle configuration avec vérification qu'elle fonctionne, il y a un pas énorme qui a demandé plus de 20 années.

On a là un exemple de la différence entre *l'existence mathématique* et *l'existence pratique*. Le mathématicien, même lorsqu'il donne explicitement les règles qu'il faut employer pour obtenir tel ou tel objet (c'est ici le cas), ne se préoccupe pas nécessairement de mener le travail jusqu'à son terme : il sait que c'est possible, il a des arguments abstraits qui l'en persuadent et ça lui suffit. Aux ingénieurs de terminer le travail si ça les amuse !

De la même façon, les mathématiciens du *Jeu de la vie* ont établi depuis longtemps qu'il était possible de construire des navires de type $A - B$ avec A et B quelconques. Pourtant, ainsi que nous l'avons déjà dit, on n'en connaît aujourd'hui que de type $A - B$ avec $A = 0$ (déplacement vertical) ou $B = 0$ (déplacement horizontal) ou $A = \pm B$ (déplacement diagonal), et donc en particulier aucun navire de type $1 - 2$ n'a jamais été vu. Un lecteur saura-t-il en découvrir un ?

De même encore, on sait prouver mathématiquement qu'il existe des configurations autorépliquantes – qui se déboulent au bout d'un certain nombre de générations –, mais jamais personne jusqu'à présent n'en a aperçu sur son écran d'ordinateur. On le voit, les bâtisseurs d'empires imaginaires que sont les ingénieurs-biologistes du *Jeu de la vie* ont encore du travail devant eux.

FOLIE OU SAGESSE ?

Les gens qui s'occupent du *Jeu de la vie* sont parfois l'objet de railleries : pour mener toutes ces expériences de biologie imaginaire, ne faut-il pas être fou et irresponsable (car bien sûr les ordinateurs utilisés sont coûteux, et le temps passé à ces recherches pourrait l'être à des calculs plus productifs).

Mais après tout... est-ce si fou que cela d'étudier l'un des plus simples

mondes possibles ? N'est-ce pas le seul moyen pour évaluer ce qui est nécessaire, comme concepts, comme mécanismes de base, comme chimie minimum, pour faire «fonctionner un monde». Ce que nous voyons se produire dans le plan de Conway nous apprend que, même si notre Univers nous apparaît complexe, cela n'entraîne pas que ses lois le sont.

Le principe du rasoir d'Occam veut qu'on minimise ce qu'on fait intervenir dans une explication ou un modèle : cette exploration du minimum générant la complexité qu'est l'étude du *Jeu de la vie* peut donc être vue comme une physique ultra-fondamentale ou une biologie théorique ultime. C'est donc un travail scientifique aussi important que bien d'autres menés ici ou là dans les milliers de sous-disciplines scientifiques existant maintenant et qui ne sont pas toujours aussi amusantes et esthétiques !

Le logiciel LifeLab pour Macintosh (en shareware pour 50F) est livré avec des centaines de configurations, dont les plus belles de Dean Hickerson et Alan Hensel et toutes celles mentionnées dans l'article. Pour l'obtenir, adressez-vous à Andrew Trevorrow, 19 Abbott Lane, North Adelaide, 5006 Australia (e-mail: akt@kagi.com). Les propriétaires de PC peuvent s'adresser à l'adresse ftp :

ftp://life.anu.edu.au/pub/complex_systems/alife/life/lifep.zip

Un serveur Internet à l'adresse :

http://www.cs.jhu.edu/~callahan/lifepage.html

vous fournira bien d'autres informations encore sur le Jeu de la vie.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université des sciences et techniques de Lille et chercheur au laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

D. I. BELL, *Spaceships in Conway's Game of Life*, NEC Information Systems, Canberra, Australie, dbell@pdact.necisa.oz.au, 1993.

J. H. CONWAY, E. R. BERLEKAMPS et R. K. Guy, *WINNING, Ways for your mathematical plays*, Academic Press, 1982.

M. GARDNER, *The game of life*, *Mathematical Games*, in *Scientific American*, 10-1970, 11-1970, 12-1970, 1-1971, 2-1971, 3-1971, 4-1971, 11-1971, 1-1972, 12-1975.

M. GARDNER, *Wheels, Life and other Mathematical Amusements*, W. H. Freeman, New York and San Francisco, 1983.

W. POUNDSTONE, *The Recursive Universe. Cosmic complexity and the limit of scientific knowledge*, Oxford Univ. Press. 1985.

Les sons naturels

SHAWN CARLSON

Comment enregistrer et analyser les sons émis par les animaux.

L'évolution est le plus grand des compositeurs. Vous en doutez ? Arrêtez-vous sur une plage déserte et écoutez : le vent, les vagues et les mouettes font une symphonie plus majestueuse et plus belle – à mon goût – que celles que l'on entend dans les salles de concert. Et les plages ne sont pas les seuls lieux enchanteurs : toute la surface de la Terre retentit de dizaines de millions de sons émis par les oiseaux, par les amphibiens, par les mammifères ou par les insectes. Bien qu'ils nous charment souvent, un pour cent seulement de ces sons ont été correctement enregistrés et archivés. Bien moins encore ont été analysés. Avec un peu de soin, vous pouvez capter des sons qui n'ont jamais été enregistrés et étudier leurs structures.

Vous pouvez même contribuer à enrichir les bibliothèques de sons naturels des laboratoires de zoologie. Les matériels professionnels de prise de son coûtent plusieurs milliers de francs, mais des découvertes sont possibles avec un budget bien inférieur. Avec l'aide de quelques logiciels spécialisés et d'un petit matériel d'enregistrement, vous pouvez faire un travail de recherche original.

Avant les prises de sons, apprenez à reconnaître les animaux à leurs cris : lisez des guides, renseignez-vous auprès de naturalistes, partez en visite commentée avec des gardes forestiers ou avec des guides de parcs naturels avertis et, surtout, écoutez des enregistrements. De nombreux disques présentent les chants des oiseaux, et la rubrique *Analyses de livres de Pour la Science* a récemment présenté *Entomophonia*, un disque compact qui présente les chants d'insectes. Consultez également les enregistrements de cris d'animaux à la médiathèque du Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

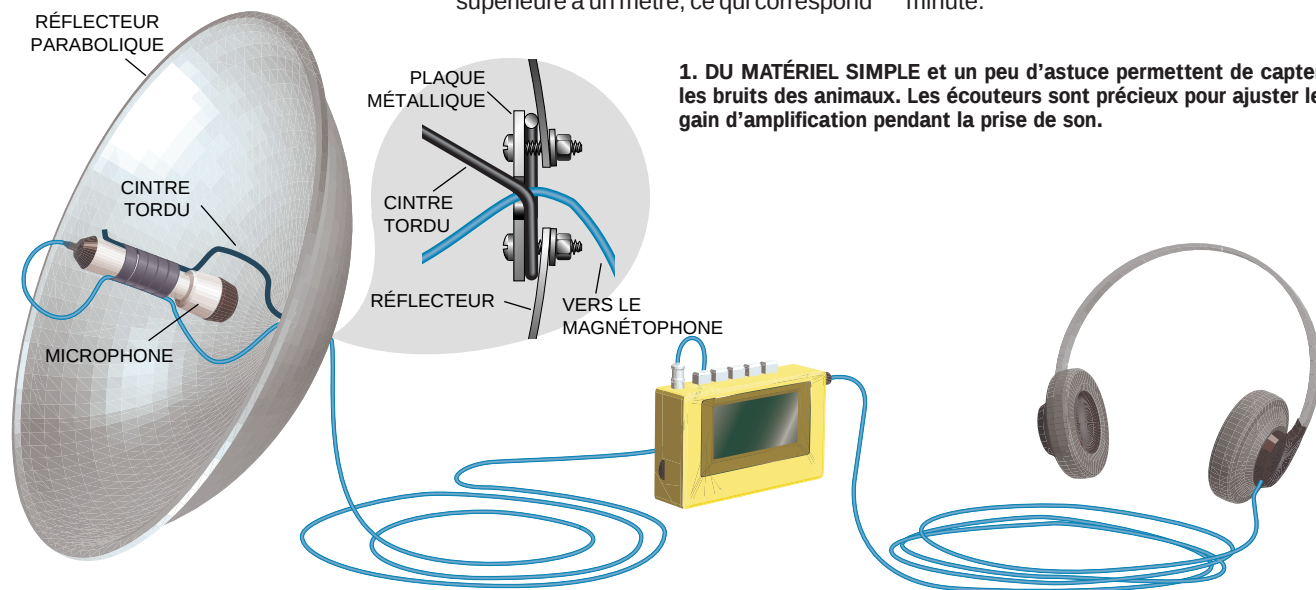
Pour enregistrer correctement les sons de la nature, vous devrez apprendre à les isoler de tout le fond sonore. Vous y parviendrez en utilisant un réflecteur parabolique, qui éliminera tout son qui ne proviendra pas de son axe. Si vous placez un microphone à son foyer, celui-ci ne captera que le son vers lequel pointe la parabole. N'utilisez pas un réflecteur trop grand, car vous ne pourriez plus le transporter commodément dans la nature (limitez son diamètre à un mètre). Pour être réfléchi, une période de l'onde sonore doit tenir à l'intérieur de la parabole ; aussi vous ne pourrez pas amplifier d'onde sonore de longueur d'onde supérieure à un mètre, ce qui correspond

à des fréquences supérieures à 344 hertz. Heureusement la plupart des animaux produisent des sons de fréquence supérieure à 344 hertz. Par exemple, les chants d'oiseaux ont des fréquences comprises entre 2 000 et 6 000 hertz. Vous trouverez facilement votre réflecteur parabolique, soit dans des magasins de hi-fi, soit dans les magasins de surplus militaires, soit encore dans les magasins qui vendent des ustensiles de cuisine. Certains chaudrons chinois ou de grands saladiers donnent d'étonnants résultats ; de petits parapluies bien tendus, une luge en plastique, des réflecteurs de lampe ou même le fond d'un barbecue rond font également l'affaire.

Une fois le réflecteur parabolique trouvé, vous devrez vous procurer un microphone, un magnétophone et des écouteurs. Au centre de la parabole, percez un trou assez large pour y faire passer le fil du microphone. Un cintre en fil de fer rigide fait un bon support. Enroulez en spirale l'extrémité du fil de fer à la base de la parabole et boulonnez une plaque de métal par-dessus pour maintenir le fil fixé à la parabole (voir la figure 1).

Avec du ruban adhésif fort, fixez le microphone à l'autre extrémité du fil de fer ; le microphone doit faire face à la parabole. Procédez par essais successifs pour déterminer la meilleure position du microphone, puis raccordez ce dernier au magnétophone portable. Ces deux appareils peuvent être simples : vous apprendrez déjà beaucoup avec un microphone qui coûte moins de 200 francs et avec un minicassette banal.

Pour vous entraîner, allez d'abord au zoo, où les animaux sont nombreux et confinés, et où vous pourrez effectuer d'éventuels rafistolages de dernière minute.



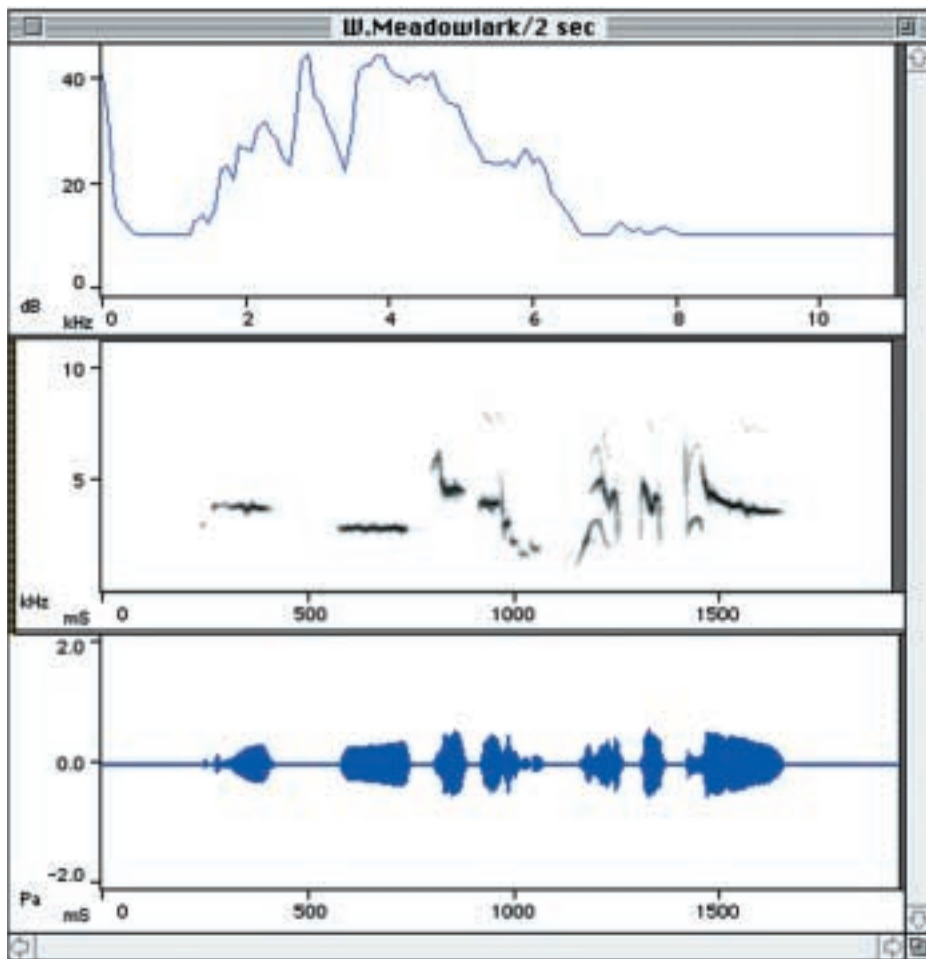
1. DU MATÉRIEL SIMPLE et un peu d'astuce permettent de capter les bruits des animaux. Les écouteurs sont précieux pour ajuster le gain d'amplification pendant la prise de son.

Puis, quand vous partirez en pleine nature, soyez attentif à ce qui se passe derrière l'animal que vous voulez enregistrer : comme les téléobjectifs, les microphones paraboliques raccourcissent la distance entre le premier et l'arrière-plan, de sorte que des sons provenant de derrière votre cible paraîtront anormalement forts. Essayez toujours de vous placer de sorte que votre microphone pointe vers le haut ou le bas : ainsi le bruit de fond sera celui du ciel ou du sol.

Naguère, seuls les professionnels pouvaient analyser les sons, mais aujourd'hui le logiciel *Canary* pour ordinateurs *Macintosh* facilite l'étude des sons naturels. Ce logiciel indique instantanément la constitution des sons (voir la figure 2) ; il permet d'isoler n'importe quelle partie d'une mélodie, de l'analyser et de masquer les erreurs d'enregistrement. Il efface les bruits indésirables, tels les grondements des camions dans le lointain.

Cependant *Canary* est surtout utile parce qu'il permet de comparer différents sons et de déterminer leur degré de ressemblance. Quand on lui demande de telles comparaisons, il calcule un indice, égal à 1 pour des sons identiques et à 0 pour des sons complètement différents. Le programme passe en revue une mélodie après l'autre, en synchronisme, et les compare ; puis il reporte chaque résultat sur un diagramme. Il édite ensuite le diagramme, afin que vous puissiez observer graphiquement la différence. Cette fonctionnalité permet toutes les explorations possibles. Vous pourrez ainsi mesurer la différence entre deux chants consécutifs d'un même oiseau, comparer le chant d'un oiseau avec celui d'un autre animal de la même espèce et vérifier vos hypothèses sur les chants d'espèces apparentées.

Avec un peu d'astuce, vous pouvez même mesurer les différents temps d'arrivée du son sur trois microphones distants les uns des autres et en déduire la position de l'oiseau qui chantait (le son se propage à environ 344 mètres par seconde et arrivera d'abord sur le microphone le plus proche de l'animal). Vous pourrez ainsi reconstituer les mouvements d'un oiseau particulier et déterminer l'étendue et les frontières de son territoire, ou essayer d'analyser le déplacement d'une chauve-souris en train de chasser, en captant ses ultrasons. Les possibilités sont infinies, et la puissance du logiciel *Canary* vous fera oublier son prix : environ 1 500 francs (voir en fin d'article).



2. LE CHANT DE L'ALOUETTE est représenté de trois façons par le logiciel *Canary* : par la quantité d'énergie émise par l'oiseau à chaque fréquence (en haut), par les diverses fréquences présentes dans ce chant en fonction du temps (au milieu) et par l'intensité du son (mesurée en unités de pression) en fonction du temps (en bas).

Si vous avez un ordinateur compatible IBM et le système d'exploitation DOS ou WINDOWS, vous pourrez utiliser les logiciels *Wave* (sous WINDOWS), *Sound Forge* ou *Software Audio Workshop*. Ces logiciels ayant été conçus pour des ingénieurs du son et pas pour des scientifiques, il leur manque certaines des fonctionnalités les plus utiles de *Canary*. Toutefois ma préférence va à *Wave*, qui visualise les sons et décode leurs fréquences.

Si vous tenez vraiment à enrichir les banques de données professionnelles, vous aurez besoin d'un équipement professionnel. Hélas un bon microphone coûte environ 6 000 francs et un magnétophone haute performance, le double. Que peut alors faire un amateur ? D'abord s'associer avec d'autres amateurs afin de constituer un fonds commun suffisant. Contactez les associations naturalistes de votre région, mettez une petite annonce dans les revues sur la nature ou, encore, si vous êtes relié à un réseau informatique, envoyez un message électronique sur Internet.

N'oubliez pas les studios de prise de sons, les lycées et les universités : il s'y trouve peut-être des mordus de la nature qui ont déjà une partie du matériel dont vous rêvez. Les plus ambitieux pourront aussi fonder une association à but non lucratif, qui pourra recevoir des subventions publiques ou privées.

Pour plus d'informations, vous pouvez vous adresser à l'Association L'Oiseau musicien des preneurs de sons animaliers, 21, rue des Rossays, 91600 Savigny-sur-Orge.

Pour obtenir des informations sur les logiciels, contactez la Société des scientifiques amateurs en envoyant deux dollars à l'adresse suivante : Society for Amateur Scientists, 4951 D Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, USA. Vous pouvez obtenir gratuitement la même information sur Internet, à : <http://www.the sphere.com/SAS/>.

Onirogrammes



Quelques pastilles de couleur au fond d'un kaléidoscope engendrent, par réflexion sur deux miroirs, une surprenante variété de motifs. Une goutte d'encre, déposée sur le pli d'une feuille de papier, puis étalée symétriquement, produit des formes dont les psychologues, depuis Rorschach, se servent pour tester l'imaginaire de leurs clients. La symétrie d'axe vertical est riche de connotations, sans doute parce que, dans la nature, elle est propre au règne animal.

Depuis quelques années, je construis des textures, pour les besoins de l'image en relief, avec un double souci. La texture doit être aléatoire, mais sans monotonie, pour que le regard y trouve rapidement des repères. Elle doit être visuellement riche, mais sans verser dans le figuratif, pour ne pas suggérer d'interprétation autre que celle découlant du pur relief. Je recherche un point d'équilibre analogue à celui du grommelot, cet exercice vocal où l'on tient un discours qui semble être 100 pour cent français, mais ne contient aucun mot de la langue. Ces textures sont riches de formes cachées, qui se révèlent par symétrie.

Dans les exemples présentés ici, des bandes de texture ont été symétrisées et accolées. La symétrie est immédiatement perceptible sur les axes ; peu à peu, l'organisation s'étend sur les bords. Quand on tourne la page de 90 degrés, la zone perçue comme symétrique semble se rétrécir de part et d'autre de l'axe, et l'on cherche plutôt à organiser la texture sur une moitié de bande, comme une vue panoramique. Dans la nature, la symétrie d'axe horizontal signale un plan d'eau, et l'interprétation se concentre sur ce qui est au-dessus de l'axe.

Les visages s'obtiennent facilement (avec des textures tachetées) ainsi que des personnages de dessin animé (avec des textures à lignes épaisses et espacées). Les insectes ou les «chinoiseries» sont également produits en abondance. J'ai essayé sur ces deux orinogrammes d'éviter de tomber dans ces facilités.

Les textures ont été confectionnées manuellement, en utilisant beaucoup les ciseaux, la colle et la photocopieuse. Les variétés sont améliorées au fil des mois et croisées pour donner de nouvelles espèces. L'espoir est de produire une page entière qui s'organise visuellement sans recours à la symétrie !

Jacques NINIO
Laboratoire de Physique Statistique
École Normale Supérieure



