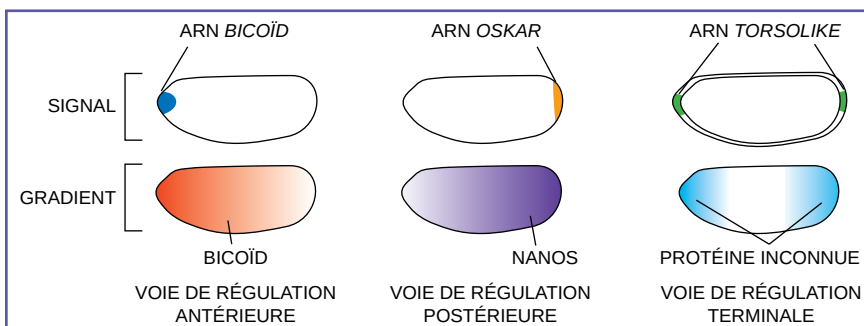




9. TROIS VOIES D'ACTIVATION, le long de l'axe longitudinal, créent des signaux sous forme d'ARN *bicoid*, *oskar* et *torsolike*. Ils engendrent quatre gradients de concentration en protéines qui commandent la subdivision de l'embryon.

pourrait déclencher la transcription. La dynamique dépendrait beaucoup de la concentration d'un ou de plusieurs des composants. Or, les gènes activés par les protéines Bicoïd ou Dorsal portent plusieurs sites de liaison adjacents, pour des facteurs de transcription différents, qui moduleraient leur activité.

Certains gradients morphogéniques n'ont apparemment qu'un seul effet : quand la concentration en un morphogène, en un territoire donné, est supérieure à un seuil critique, un gène cible est activé ; sinon, il ne l'est pas. Dans d'autres cas, les réactions diffèrent selon les concentrations en morphogène ; ce type de gradient est indispensable à l'augmentation de la complexité, dans les organismes en développement.

Bien que chaque gradient morphogénique ne semble contrôler directement que quelques gènes cibles, des interactions de molécules qui agissent sur la transcription peuvent modifier notablement les réactions aux gradients. Ces mécanismes de régulation combinée conduiraient à la formation de structures complexes à partir d'un système initialement très simple. Les protéines agissant comme cofacteurs peuvent modifier l'affinité du morphogène pour le promoteur d'un gène, augmentant ou diminuant le seuil critique. Un cofacteur peut même transformer un facteur de transcription activateur en un facteur inhibiteur. Le potentiel de diversification et de complexification augmente encore si l'on considère que les cofacteurs peuvent eux-mêmes se répartir de façon hétérogène.

La superposition de plusieurs gradients, dans une région de l'embryon, permet de la subdiviser encore davantage et d'accéder à une complexité supplémentaire. Les trois voies méta-

boliques qui définissent l'axe antéro-postérieur de l'embryon de drosophile aboutissent à quatre gradients indépendants (la voie terminale produit deux gradients d'une protéine inconnue). Chaque gradient présente un ou deux seuils. Au moins sept régions sont ainsi définies ; elles expriment des lots spécifiques de gènes cibles. La superposition du gradient de la protéine terminale encore inconnue et du gradient de la protéine Bicoïd commande un lot de gènes cibles qui détermine la région la plus antérieure de la drosophile, une partie de la tête. Au contraire, lorsque le gradient de la protéine inconnue agit seul, il définit les structures de l'extrémité opposée, la partie extrême de l'abdomen.

La régulation combinatoire, active dès les premiers stades embryonnaires, devient encore plus importante aux stades ultérieurs du développement de la drosophile. Par exemple, les gradients de concentration en facteurs de transcription, le long de l'axe longitudinal de l'embryon, agissent sur des gènes qui, dans la plupart des cas, codent d'autres facteurs de transcription. Ces facteurs secondaires diffusent, à leur tour, définissant eux-mêmes des gradients de concentration. Chacun agit, à différents seuils de concentration, sur ses propres gènes cibles ; parfois, ces seuils sont modifiés par d'autres facteurs de transcription, dont les sphères d'influence se chevauchent.

La régulation combinatoire et les gradients de concentration permettent d'organiser les fonctions codées par les gènes en un vaste répertoire de mécanismes du développement. Chez la drosophile, les gradients déclenchent l'expression de gènes en bandes transversales dans la région de l'œuf qui deviendra ultérieurement la région segmentée de la larve.

Cette structure commande ensuite la formation de bandes encore plus fines qui déterminent directement les caractéristiques de chaque segment de l'embryon. Dès que l'embryon se divise en cellules, les facteurs de transcription ne peuvent plus diffuser à travers les couches de cellules. Les étapes ultérieures, au cours desquelles le patron embryonnaire s'établit, mettent en jeu des signaux transmis entre cellules voisines, sans doute grâce à des mécanismes spéciaux qui permettent la transmission des signaux à travers les membranes cellulaires.

Nous n'avons pas encore décodé le scénario complet du développement de l'embryon de drosophile, mais je pense que nous en avons éclairci plusieurs aspects essentiels. Ces résultats ne s'appliquent pas seulement à la drosophile : à leur grande surprise, les embryologistes ont découvert, au cours des cinq dernières années, que, lors de l'embryogenèse précoce, les mêmes gènes, les mêmes facteurs de transcription et des mécanismes fondamentaux très proches sont mis en jeu dans tout le règne animal.

Cette recherche fondamentale devrait nous permettre de mieux comprendre le développement de l'embryon humain. D'ores et déjà, on a éclairci l'un des plus grands mystères de la nature : comment la complexité émerge de la simplicité originelle.

Christiane NÜSSLEIN-VOLHARD a partagé, en 1995, le prix Nobel de physiologie et de médecine avec les généticiens Edward Lewis et E. Wieschaus. Elle dirige le département de génétique de l'Institut Max Planck de biologie du développement, à Tübingen.

C. NÜSSLEIN-VOLHARD et E. WIESCHAUS, *Mutations Affecting Segment Number and Polarity in Drosophila*, in *Nature*, vol. 287, pp. 795-799, 30 octobre 1980.

Peter A. LAWRENCE, *The Making of a Fly ; The Genetics of Animal Design*, Blackwell Science, 1992.

Daniel St. JOHNSTON et Christiane NÜSSLEIN-VOLHARD, *The Origine of Pattern and Polarity in the Drosophila Embryo*, in *Cell*, vol. 68, n° 2, pp. 201-209, 24 janvier 1992.

The Development of Drosophila Melanogaster, sous la direction de Michael Bate, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1993.

Les ronds d'air des dauphins

KEN MARTEN • KARIM SHARIFF • SUCHI PSARAKOS • DON WHITE

À Hawaii, des dauphins s'amuse à faire, dans l'eau, des spirales et des ronds d'air tourbillonnants et stables.

Sur l'île d'Oahu, à Hawaii, un laboratoire unique en son genre se consacre à l'étude des dauphins. Dans le cadre du Projet Delphis, géré par l'organisation de protection de la nature *Earthtrust*, les biologistes du parc marin d'Hawaii mènent des recherches variées : étude de la conscience des dauphins, évaluation de l'intelligence de ces animaux grâce à l'utilisation d'écrans d'ordinateurs tactiles placés sous l'eau, etc. Les animaux ne reçoivent pas de nourriture comme récompense, de sorte que l'on étudie leurs comportements volontaires.

L'une des activités les plus fascinantes que nous observons ne nécessite aucun matériel : les dauphins s'amuse à brasser l'eau à l'aide de leurs nageoires et à souffler des bulles dans les tourbillons qu'ils provoquent, créant ainsi des ronds et des spirales d'air, à la manière des fumeurs qui font des ronds de fumée. On connaissait depuis longtemps l'intelligence des dauphins, mais l'observation de ces ronds prouve l'étendue de leur imagination.

Inspirant de l'air à la surface, les dauphins forment des bulles, lorsqu'ils expirent, sous l'eau. Quand les animaux sont agités, surpris ou curieux, ils soufflent parfois l'air par leurs évents, formant ainsi de grandes bulles amorphes qui remontent rapidement à la surface. Lorsqu'ils émettent des sons, ils créent aussi, parfois, des grappes de petites bulles ; il est possible que ces dernières leur permettent d'ajouter un signal, détectable par la vue ou par sonar, à leur message vocal.

Les dauphins peuvent également créer des types de bulles plus étonnants pour des raisons moins prosaïques : au cours des dernières années, des biologistes de divers zoos marins ont décou-



Ken Marten, Suchi Psarakos et Don J. White, *Earthtrust*

vert que plusieurs mammifères font des ronds d'air stables, qui flottent dans l'eau durant quelques secondes. Les techniques utilisées pour faire ces ronds sont si complexes que l'émission de ronds n'est certainement pas un signal d'alerte ni une forme de communication habituelle. Par exemple, Wolfgang Gewalt, du zoo de Duisbourg, en Allemagne, a observé des dauphins du fleuve Amazone (*Inia geoffrensis*) qui, sans entraînement, jouaient à faire des ronds de bulles, qu'ils traversaient ou qu'ils faisaient éclater.

En Californie, Diana Reiss et Jan Ostman-Lind ont constaté que les dauphins *Tursiops truncatus* jouaient à faire des ronds de bulles similaires à ceux que nous avons observés. À l'Aquarium de Vancouver, Ken Norris a observé des bélugas *Delphinapterus leucas* qui, pour jouer, expulsaient des bulles de leurs évents et les avalaient ensuite. Les dauphins sauvages font également des bulles d'air : la biologiste Karen Pryor a observé des dauphins du Pacifique (*Stenella attenuata*) qui produisaient des bulles lorsqu'ils rencontraient d'autres dauphins, et

Denise Herzing, de l'Université de Floride, a observé des pratiques équivalentes chez des dauphins *Stenella frontalis* ; enfin le photographe Flip Nicklin a vu des bélugas de la baie de Baffin, au Canada, qui rejetaient des ronds d'air en fermant de manière répétée les mâchoires, probablement pour manifester leur agressivité.

Une tradition hawaïenne

Au cours des cinq dernières années, à Hawaii, nous avons observé 17 dauphins souffleurs de notre delphinarium. Neuf d'entre eux, d'âge compris entre

un an et demi et trente ans, produisaient des ronds d'air. Les recherches que nous avons menées dans d'autres zoos marins et les entretiens que nous avons eus avec des collègues du monde entier indiquent que la production de ronds est plus courante à Hawaii que dans n'importe quel autre aquarium : ici, les dauphins semblent avoir une sorte de « tradition des ronds », les jeunes apprenant grâce aux animaux plus âgés qui, d'une certaine manière, transmettent leur savoir.

La production de ronds étant une activité de loisir, les animaux ne s'y adonnent que lorsqu'ils en ont envie, jamais sur commande ou pour obtenir de la nourriture en récompense. En outre, la production de ronds ne semble pas être associée à des comportements fonctionnels tels que l'alimentation ou l'activité sexuelle. Aussi cette activité

1. LE DAUPHIN KAIKO'O, du Zoo de Hawaii (à droite), fait un rond d'air avec lequel il joue. Le laboratoire du zoo (en haut sur cette page) comporte une fenêtre sous-marine, d'où l'on observe le remarquable comportement des animaux.



est-elle imprévisible et difficile à étudier. Progressivement nous avons constitué un stock de photographies et de films qui montrent les dauphins jouant à faire des ronds. Ces images donnent quelques idées intéressantes sur la technique des ronds, mais elles sont un faible aperçu de toute l'étendue des talents des dauphins.

Ceux-ci semblent employer trois techniques de base pour produire ces ronds. Parfois ils rejettent simplement des bulles à travers leurs événements ; ces bulles deviennent des halos d'air qui s'étendent alors que leur épaisseur

diminue à mesure qu'ils remontent à la surface (voir la figure 2). Le mâle adulte Kaiko'o, par exemple, sait produire deux bulles successivement et les mêler ensuite en un seul rond plus grand.

La physique de ce type de ronds est simple : toute bulle sphérique de plus de deux centimètres de diamètre se transforme très vite en un tore, parce que la pression est supérieure à sa base (la pression de l'eau augmente avec la profondeur). La bulle s'écrase progressivement et, quand la pression à sa base est supérieure à la tension superficielle de la sphère, un trou se forme au centre de la bulle, qui devient un tore.

Lors de cette transformation, un tourbillon se forme autour de la bulle. Tout rond tourbillonnant se déplace dans la même direction que le flux qui traverse son centre ; dans le cas de ces simples ronds d'air, le flux du tourbillon les propulse vers la surface. Bien que ce phénomène soit assez simple, les dauphins ne font pas de ronds stables sans entraînement, ce qui laisse penser que d'autres facteurs, telle la façon dont l'air est éjecté de l'événement, doivent être pris en compte.

D'autre part, certains dauphins produisent également des ronds qui se

déplacent horizontalement ou vers le bas. Pour obtenir de tels ronds, ils nagent rapidement, couchés sur le côté, de sorte que leur nageoire latérale soit verticale. En poussant cette nageoire vigoureusement, ils créent un tourbillon invisible qui se déplace horizontalement ou vers le bas. Après s'être retournés rapidement, ils soufflent une bulle dans ce tourbillon, à l'aide de leur événement (les dauphins produisent souvent une série de clics audibles avant de rejeter de l'air, ce qui indique qu'ils utilisent leur sonar pour localiser le tourbillon invisible). Comme la pression est inférieure, au centre du tourbillon, l'air émis s'y dispose et se répartit en tore (voir la figure 4).

Les ronds ainsi formés atteignent plus de 60 centimètres de diamètre et plus d'un centimètre d'épaisseur ; ils se déplacent avec le tourbillon. En agitant latéralement le museau, les dauphins détachent parfois un rond plus petit du rond initial et s'amusent ensuite à le déplacer dans l'eau.

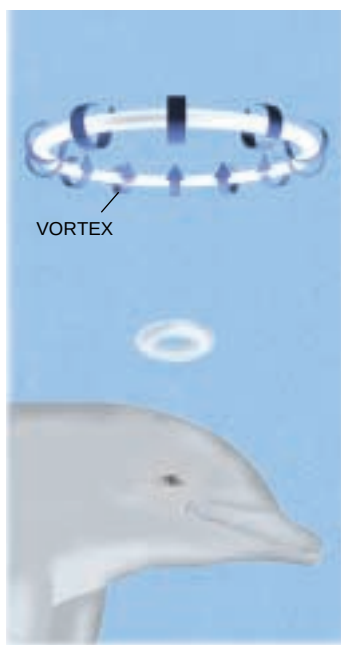
Il existe plusieurs variantes de cette technique. La femelle adulte Laka, par exemple, se met souvent en position verticale, tête vers le bas et queue vers le haut ; elle agite alors sa nageoire caudale vers le bas, afin de former un tourbillon, puis elle souffle de l'air dans celui-ci à l'aide de son événement ou de sa bouche. Parfois Laka introduit directement l'air dans le tourbillon en abaissant rapidement sa nageoire caudale. Et nous avons également observé Laka qui laissait échapper des bulles de son museau, les faisait glisser le long de son corps et les transformait en ronds lorsqu'elles atteignaient sa nageoire. Elle est même capable de gonfler un rond en y ajoutant de l'air après coup.

Coincer la bulle

La troisième méthode de création de ronds d'air est une preuve de la capacité d'expérimentation des dauphins. En quelques occasions, nous avons observé la jeune femelle Tinkerbelle, fille de Laka, qui formait des hélices d'air. Tinkerbelle a perfectionné sa technique et mis au point deux méthodes distinctes. Parfois elle libère un groupe de petites bulles tout en nageant en rond le long de la paroi du bassin ; elle se retourne alors brusquement, de sorte que, lorsque sa nageoire dorsale effleure les bulles, le tourbillon formé regroupe les bulles en une hélice de trois à cinq mètres



Ken Marten, Suchi Psarakos et Don J. White, Earthtrust



Laurie Grace

2. LES RONDS D'AIR s'élargissent en s'aminçant quand ils remontent vers la surface, emportés par un tourbillon (flèches). Le tourbillon stabilise le rond et bloque sa dissociation en petites bulles indépendantes. Les photographies de gauche (de bas en haut) montrent Kaiko'o en train de faire un rond qu'il suit.

Le mâle adulte Kaiko'o fait deux ronds, puis les fusionne en un rond plus gros (*ci-dessous*). La fusion se produit quand Kaiko'o amène les deux ronds si près que le mouvement de l'eau est opposé autour des parties voisines des ronds ; il s'annule, ce qui permet la fusion.

Certains dauphins nagent à travers les ronds qu'ils ont formé (*ci-dessous*).

La femelle adulte Laka (*ci-dessus*) se place souvent tête en bas, partiellement hors de l'eau. Elle abaisse alors sa nageoire caudale, formant un tourbillon qui attire de l'air dans l'eau. L'air forme alors un rond qui descend vers le fond.

La femelle Tinkerbell utilise sa nageoire dorsale pour former un tourbillon invisible (*en bas à droite*). Puis elle parcourt le même chemin une seconde fois (*ci-dessous à gauche*) et injecte de l'air dans le tourbillon, formant une longue hélice devant elle. Elle détache parfois une boucle d'air à l'aide de son rostre.

Les dauphins émettent souvent des sons quand ils font des ronds (*à gauche*).

de long (voir la figure 3). Nous avons également vu Tinkerbelle nager dans le bassin en suivant une trajectoire légèrement incurvée, laissant sur son sillage un tourbillon invisible formé par sa nageoire dorsale ; en refaisant le chemin inverse, et en soufflant de l'air directement dans le tourbillon, elle produisait une longue hélice, devant elle.

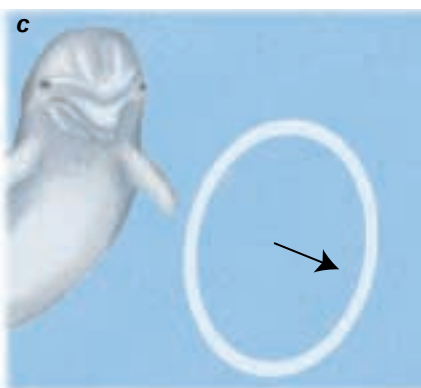
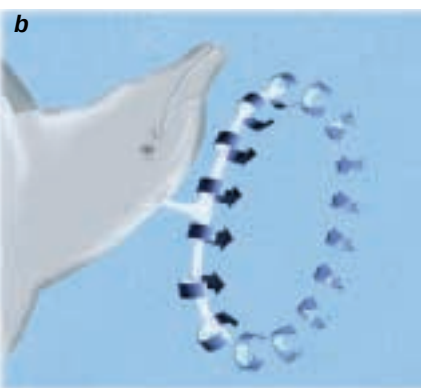
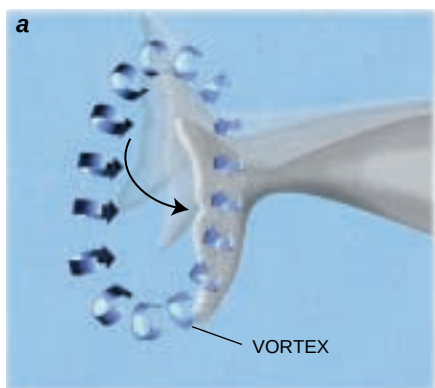
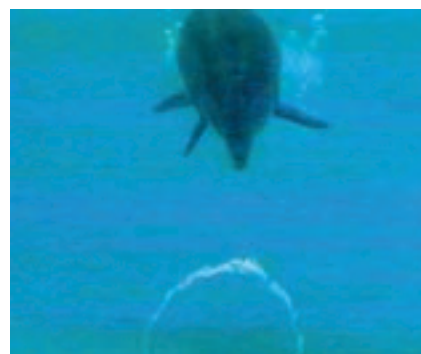
Cette fois encore, l'animal utilisait la pression inférieure du centre du tourbillon : lorsque les bulles sont placées dans le tourbillon, elles sont attirées vers le centre, fusionnent et s'étirent en un tube hélicoïdal. Généralement, un tube d'air dans l'eau est instable, et il se divise en bulles plus petites. Toutefois tous les ronds et spirales créés par les dauphins sont lisses et stables,

car la variation de pression au sein du tourbillon (pression inférieure au centre, supérieure vers les bords) stabilise le tube en atténuant les irrégularités déstabilisatrices.

Si Tinkerbelle est la seule que nous ayons vu créer des hélices, la production de ronds s'est propagée à tous les dauphins du zoo, les novices assimilant la technique en côtoyant leurs compagnons plus experts. Nous avons même observé les progrès d'un jeune dauphin : initialement ses ronds étaient instables et mal formés, mais, après deux mois d'entraînement, il faisait des ronds réguliers, qui subsistaient plusieurs secondes. Des dauphins plus âgés ont également appris à faire des ronds. Le mâle adulte Keola vivait dans le bassin de recherche depuis deux ans,

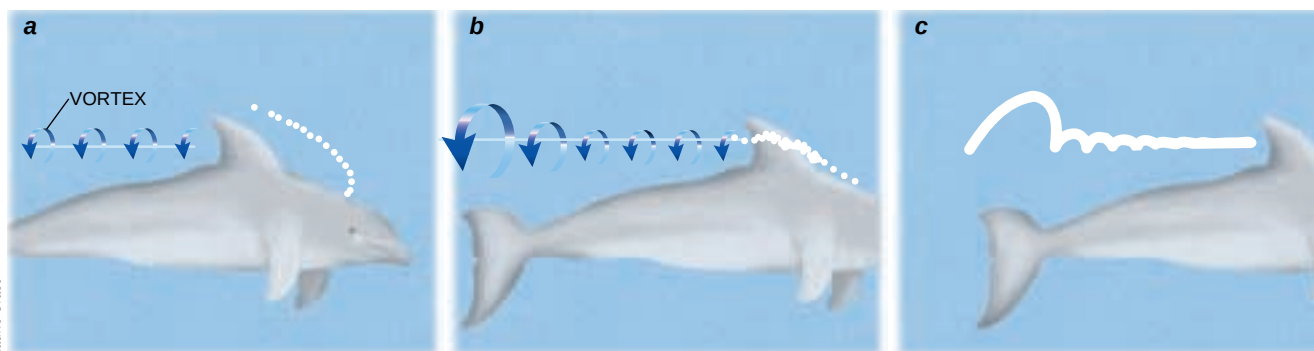
avec des congénères qui ne faisaient pas de ronds ; à cette époque, nous ne l'avons jamais vu en faire non plus. Cependant, quand on a mis son frère Kaiko dans le même bassin, nous avons vu Keola observer les ronds et apprendre à en faire. En quelques mois, il a perfectionné ses ronds.

Les dauphins qui ne savent pas faire de ronds surveillent attentivement leurs compagnons plus capables : la capacité qu'ils n'ont pas les intéresse. En plusieurs occasions, nous avons vu Keola et Laiko'o, côte à côte au fond du bassin, qui formaient de grands ronds, soit simultanément, soit à peu d'intervalle. Nous avons également vu une femelle, qui, nageant derrière une autre femelle qui faisait des ronds, faisait ses propres ronds en regardant la première.



3. EN NAGEANT SUR LE CÔTÉ, les dauphins forment des ronds qui se propagent horizontalement. Le mouvement horizontal de la nageoire crée un tourbillon qui suit la trajectoire de l'animal (a). Le dauphin se retourne alors et injecte de l'air dans le tourbillon (b) : l'air est

attiré au centre du tourbillon (c), formant un tore qui se déplace horizontalement. Les photographies ci-dessus montrent la femelle Laka en train de placer l'air dans le tourbillon et d'inspecter le rond qu'elle a formé.



4. SEULE LA FEMELLE TINKERBELL sait former des hélices d'air (photographies ci-dessus). Elle émet une succession de bulles tout en produisant un tourbillon hélicoïdal avec sa nageoire dorsale (a). Quand

les bulles rencontrent le tourbillon (b), elles sont attirées par lui et fusionnent en une longue hélice (c). La dernière photographie montre que Tinkerbell est satisfaite de son œuvre.

Les dauphins nous ont même invités à jouer avec eux. Un jour, au cours d'une période intense de production de ronds, Tinkerbell a produit plusieurs ronds avant de venir devant la fenêtre du laboratoire, derrière laquelle l'un d'entre nous (S. Psarakos) la filmait. Une autre fois, alors que nous faisions des bulles de savon dans le laboratoire, nous avons vu un des dauphins qui se mettait à faire des ronds près de la fenêtre du laboratoire.

Nous poursuivons cette étude sur les dauphins et leurs ronds, parce que nous voulons comprendre leur comportement étonnant. Les dauphins sont, en dehors des primates, les seuls animaux qui aient une conscience d'eux-mêmes, de sorte que leurs jeux et leurs comportements devraient nous éclairer sur la nature de l'intelligence. Pourquoi tant de sociétés humaines méprisent-elles les dauphins? Les pêcheurs continuent de les prendre

dans leurs filets de pêche au thon ou dans leurs filets dérivants, de mettre leur chair en boîte à la place de la viande de baleine, de les abattre pour appâter les crabes et de les chasser pour le plaisir. L'association *Earthtrust* se préoccupe de cette situation, mais nous

pensons que seul un changement fondamental des populations humaines résoudra le problème. En montrant l'intelligence des dauphins, nous espérons changer les mentalités et mettre un terme au massacre aveugle de ces créatures fascinantes.

Ken MARTEN, Karim SHARIFF, Suchi PSARAKOS et Don WHITE étudient les ronds des dauphins au Parc marin d'Hawaïi.

T.S. LUNDGREN et N.N. MANSOUR, *Vortex Ring Bubbles*, in *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 225, pp. 177-196, mars 1991.

Ken MARTEN et Suchi PSARAKOS, *Evidence of Self-Awareness in the Bottlenose Dolphin (Tursiops truncatus)*, in *Self-Awareness in Animals and Humans: Developmental Perspectives*, sous la direction de S.T. Parker, R.W. Mitchell et M.L. Boccia, Cambridge University Press, 1994.
Ken MARTEN et Suchi PSARAKOS, *Using*

Self-View Television to Distinguish between Self Examination and Social Behavior in the Bottlenose Dolphin (Tursiops Truncatus), pp. 205-224, and related articles on animal consciousness in *Consciousness and Cognition*, vol. 4, n° 2, pp. 205-269, juin 1995.

L'Association *Earthtrust* a un site sur le réseau *Internet* à l'adresse earthtrust@aloha.net. Son adresse est : 25 Kaneohe Bay Drive, Kailua, HI 96734, USA.

Un film au format Quicktime est disponible sur le site World Wide Web à l'adresse : <http://www.sciam.com/>.

Mathématiques sans se lacer?

IAN STEWART

Les principes de l'optique géométrique montre la supériorité absolue du laçage de type américain.

Qui peut se dire mathématicien? Il y a quelques années, dans un rare éclair de lucidité, il m'apparut qu'un mathématicien est quelqu'un qui saisit toute opportunité de faire des mathématiques, là où d'autres ne voient pas une possible mathématisation du problème.

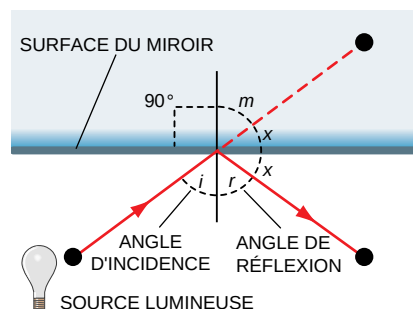
Considérez des lacets de chaussures. Comment traiter mathématiquement les problèmes – qu'il nous faudra inventer –, concernant des lacets de chaussures? J'ai appris l'existence de tels problèmes dans l'article *Le problème des lacets de chaussures*, de John Halton, publié dans le numéro d'automne 1995 du *Mathematical Intelligencer*.

Le problème est d'énoncé simple : comment lacer le plus économiquement possible votre chaussure? Il existe au moins trois manières usuelles de lacer

des chaussures (voir la figure 1) : le «zigzag américain», le «collet européen» (d'où dérive le terme «collet monté», plus sans doute à propos de corsets que de chaussures) et l'expéditif «gavage». Pour l'utilisateur, les styles de laçages peuvent différer par leurs esthétiques et les temps qu'ils requièrent. Le fabricant de chaussures se pose une autre question : avec quel type de laçage les lacets sont-ils les plus petits (et donc les moins coûteux)?

Pour déterminer la longueur de lacet, je ne m'intéresserai qu'à celle des segments rectilignes, la quantité supplémentaire de lacet utilisée pour le nouer étant la même pour toutes les méthodes et pouvant donc être ignorée.

Ma terminologie sera celle du lacet vue par l'utilisateur, de sorte que la paire d'œillets «du haut» est celle près de la cheville. De même, j'idéaliserai le



2. Selon le principe de Fermat, la lumière choisit le trajet le plus court pour aller d'un point à un autre ; on prouve alors que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

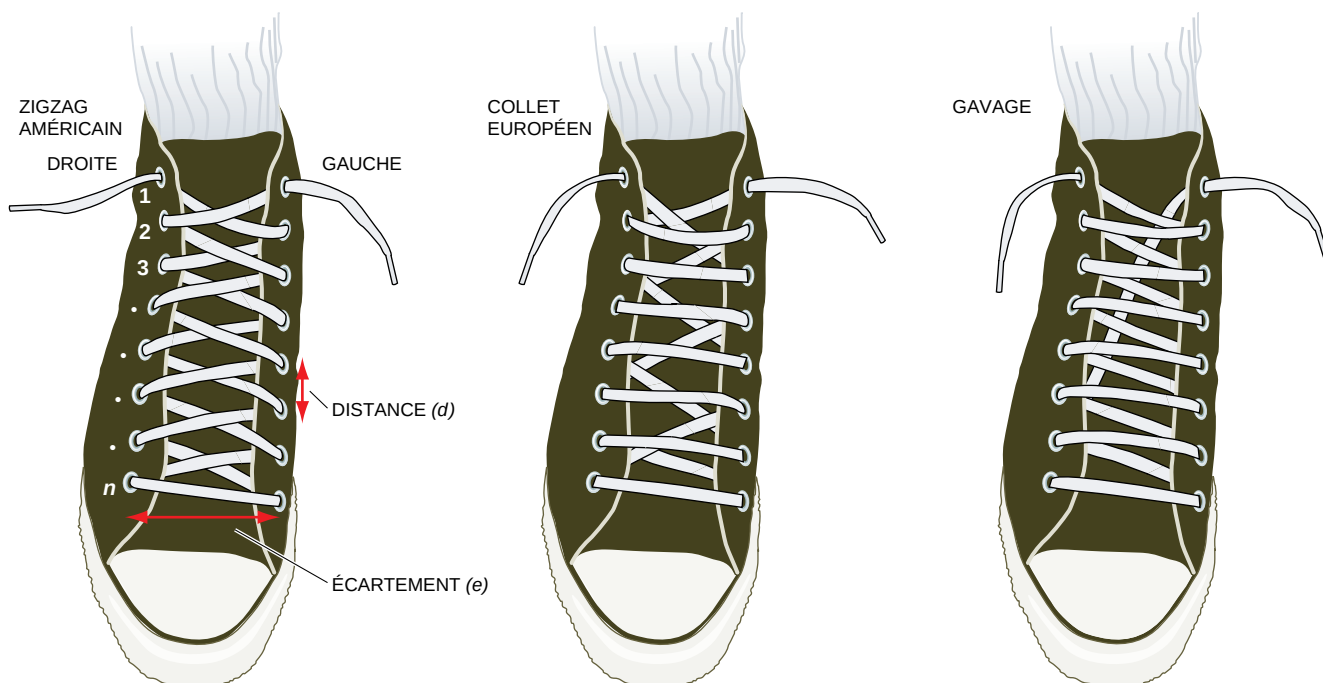
lacet par une ligne sans épaisseur, et les œillets par des points. Une attaque frontale du problème consiste à exprimer la longueur du lacet en fonction de trois paramètres :

- le nombre n de paires d'œillets,
- la distance d entre deux œillets verticalement successifs,
- l'écartement e entre deux œillets d'une même paire.

À l'aide du théorème de Pythagore (je me demande ce que le grand homme aurait pensé de cette application!), il est aisé de montrer que les longueurs des lacets sont les suivantes :

- américain : $e + 2(n-1)\sqrt{d^2 + e^2}$
- européen : $(n-1)e + 2\sqrt{d^2 + e^2} + (n-2)\sqrt{4d^2 + e^2}$
- gavage : $(n-1)e + (n-1) \times \sqrt{d^2 + e^2} + \sqrt{(n-1)^2 d^2 + e^2}$

Laquelle est la plus petite? Supposons, pour fixer les idées, que n est



1. Il y a plusieurs manières de lacer ses chaussures ; nous en étudierons trois : le laçage américain, le laçage européen et le gavage. Lequel de ces trois types correspond-il à la plus petite longueur de lacet?