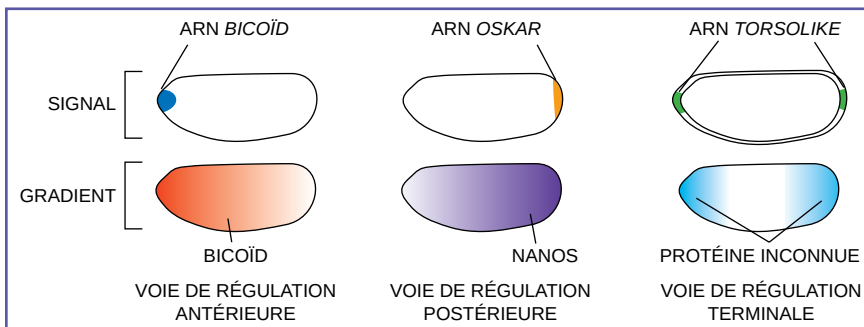




9. TROIS VOIES D'ACTIVATION, le long de l'axe longitudinal, créent des signaux sous forme d'ARN *bicoid*, *oskar* et *torsolike*. Ils engendrent quatre gradients de concentration en protéines qui commandent la subdivision de l'embryon.

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.