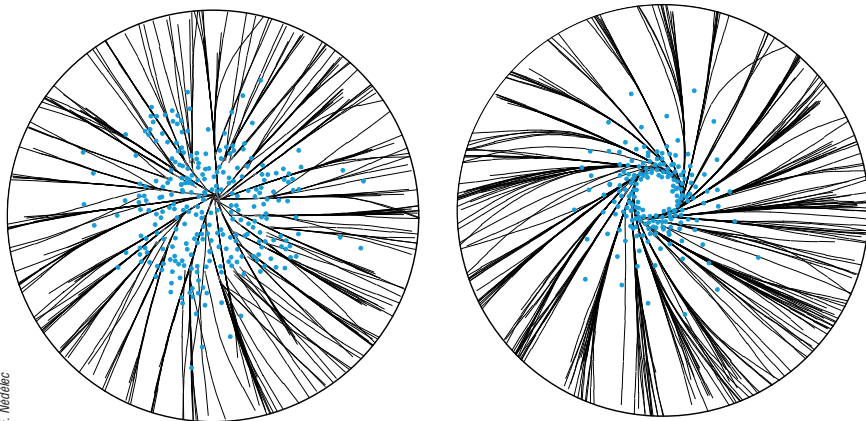


F. Nédélec



Simulation informatique de la formation d'un aster (à gauche). Les microtubules sont représentées par les traits noirs et les complexes moteurs par des points bleus. À droite, les microtubules longs constituent un vortex, les moteurs sont regroupés au centre.

La kinésine est un moteur protéique bien connu : il a deux «pieds» qui se fixent simultanément sur un microtubule. L'un de ces pieds reste fixe pendant que l'autre pivote de 180 degrés et vient se placer de l'autre côté. À son tour, ce pied reste immobile tandis que l'autre se déplace. Ainsi, «pas à pas», la kinésine se déplace le long d'un microtubule.

La streptavidine lie quatre kinésines et forme ainsi des complexes de moteurs, qui en associant deux microtubules, forment un lien mécanique. Les kinésines appartenant au complexe se meuvent le long des deux microtubules qui se déplacent alors l'un par

rapport à l'autre jusqu'à ce que leurs extrémités se rejoignent. Ainsi, toutes les extrémités des microtubules initialement éparpillées se rassemblent et forment un aster.

Les expériences ont été effectuées dans un espace restreint de la taille d'une cellule et ont confirmé cette mécanique de formation des asters. Quand les microtubules deviennent plus longs que le rayon de la boîte, ils ne peuvent plus se maintenir en aster, et s'arrangent en une nouvelle structure nommée vortex, où les filaments sont disposés en spirale.

F. Nédélec a ensuite modélisé le système. La simulation informatique a repro-

duit les structures obtenues dans les expériences et confirmé les hypothèses retenues. Une telle simulation aide le biochimiste à choisir des conditions expérimentales optimales (par exemple, concentration en tubuline ou en moteurs), mais aussi à explorer l'action de paramètres inaccessibles dans la pratique (vitesse de déplacement des moteurs par exemple). Bien que la simulation prenne en compte des concentrations en microtubules et en moteurs inférieures à celles des expériences, les résultats obtenus sont identiques : les microtubules s'allongent ; des asters, puis des vortex apparaissent.

Les expériences de F. Nédélec sont des versions simplifiées de ce que l'on trouve dans une cellule vivante : la majorité des protéines du squelette des cellules y sont absentes. Cependant, les résultats ont, d'une part, prouvé que des complexes de moteurs qui existent dans toutes les cellules suffisent à expliquer l'apparition d'asters et, d'autre part, explicité comment ces structures se forment. Les complexes de moteurs existent dans toutes les cellules ; ils expliquent à eux seuls la formation des asters, et dans les cellules animales, complètent l'action des centrosomes dans le bon déroulement d'une division cellulaire.

Drôles de mouvements

En électrophorèse, la force électrique ne domine pas toujours.

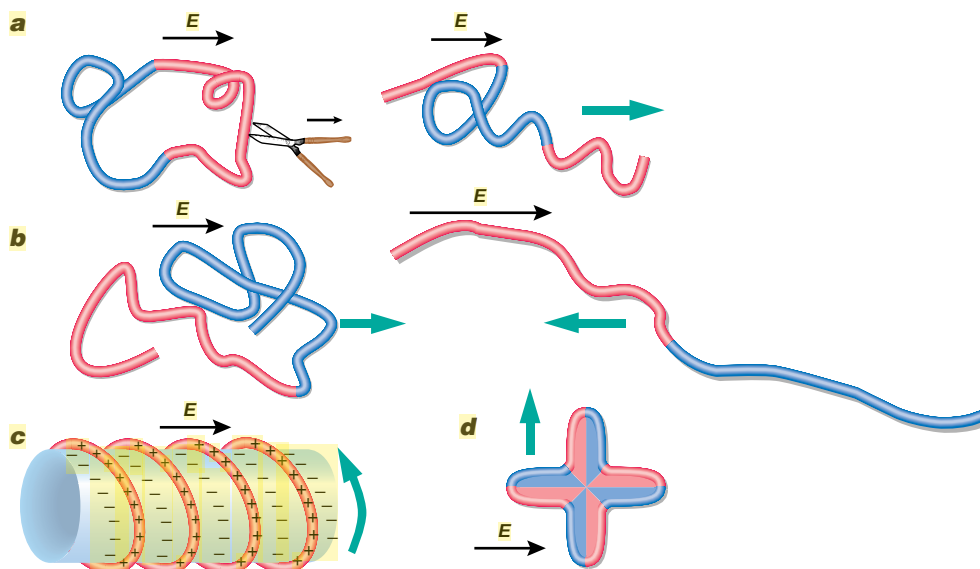
En biologie, l'électrophorèse est une méthode de séparation des protéines, des molécules d'ADN ou des cellules. Elle consiste à mettre en mouvement ces objets électriquement chargés en appliquant un champ électrique.

On admettait que le champ électrique engendre sur l'objet une force à laquelle s'oppose une force de friction visqueuse, proportionnelle à sa vitesse. L'objet acquiert ainsi une vitesse qui dépend du champ électrique appliqué. Le coefficient de friction varie avec la taille de la particule, de sorte qu'après un temps donné, les molécules (pour une charge identique) ont été séparées selon leur taille : les plus petites, pour lesquelles les forces de frottement sont les plus faibles, migrent le plus loin.

Nous montrons que cette description classique n'explique pas toujours l'électrophorèse. Pour rendre compte du mouvement des particules, on doit prendre

en compte des effets plus fins, tels la répartition géométrique des charges électriques. En particulier l'absence de déplacement d'une particule ne signifie pas que cette dernière est neutre.

Le phénomène résulte de l'écrantage électrostatique : une surface chargée plongée dans une solution saline provoque l'apparition dans la solution, au voisinage de la surface, d'un excès



Des polymères chargés sont plongés dans une solution saline. Les parties rouges sont chargées positivement en surface, les parties bleues, négativement. Soumis à un champ électrique, ces brins de polymères ont un déplacement (flèches vertes) qui dépend de la répartition des charges électriques, car les polymères positivement chargés sont entourés par un excès d'ions négatifs présents dans la solution.

d'ions de charge opposée à celle de la surface. Une particule positivement chargée plongée dans une telle solution est entourée d'une zone chargée négativement, mais «vu de loin», l'ensemble apparaît neutre. Ainsi, en raison de l'écrantage, la force électrique totale qui s'exerce sur ces objets est nulle : le mouvement résulte des mouvements relatifs du fluide et de la particule, car le champ électrique tire le fluide dans un sens opposé à celui de la particule.

Si cette double action du champ électrique est facilement analysable pour des objets chargés uniformément en surface, elle conduit à un mouvement d'ensemble surprenant pour des objets hétérogènes. Dans le cas de la migration des particules de polymère (molécules linéaires), nous avons analysé quelques situations extrêmes, où la vision classique ne s'applique plus.

Imaginons d'abord un polymère refermé sur lui-même dont les deux moi-

tiés ont des charges identiques, mais de signe opposé (voir la figure a). Pour des raisons de symétrie, placé dans un champ électrique, ce polymère globalement neutre ne bouge pas. Lorsque l'on coupe le polymère au centre de sa partie chargée positivement, il dérive comme un objet chargé positivement. Pourquoi ? Parce que les parties chargées positivement sont moins enfouies que les parties chargées négativement. Ces parties positivement chargées sont donc en meilleur contact hydrodynamique avec le fluide environnant et prédominent pour la détermination du sens du mouvement. Cet exemple illustre de manière frappante que le mouvement ne dépend pas de la charge totale du polymère, mais bien de la répartition des charges le long de la chaîne.

Autre exemple, un polymère formé d'un bloc positif attaché à un bloc négatif (b) peut dériver dans le sens du champ appliqué pour de faibles intensités de ce champ et dans le sens opposé pour des

intensités plus grandes : lorsque l'intensité du champ augmente, la déformation du polymère modifie la répartition géométrique des charges.

Finalement, un objet ne dérive pas nécessairement dans le sens du champ ou dans le sens opposé : nous avons imaginé un objet qui tourne sur lui-même sans dériver (c), et un objet qui dérive perpendiculairement au champ appliqué, quelle que soit la direction de ce dernier (d).

Pour l'électrophorèse sur gel, la structure réticulée du gel gomme la plupart des effets hydrodynamiques et ces exemples ne s'appliquent pas. En revanche, en électrophorèse sur capillaires, les effets hydrodynamiques peuvent être importants. En outre, l'analyse de ces effets constitue un premier pas vers la conception de petites pompes, analogues artificiels d'entités biologiques, telles certaines pompes cellulaires ou certains nanorotors.

Didier LONG et Armand AJDARI, Physico-chimie théorique, ESPCI, Paris.

Le réveil des dunes

On déboise aujourd'hui les dunes fixées au siècle dernier par des forêts.

Les dunes mobiles ont longtemps été synonymes de menace, de désertification et de misère pour les populations du littoral. Tout au long du XIX^e siècle, les gestionnaires du littoral européen les ont plantées d'arbres afin de les fixer. Aujourd'hui, au contraire, on protège les dunes encore non boisées et, dans certaines régions, on les déboise.

Le déplacement des dunes menace d'ensablement les maisons, les routes et les champs cultivés près des littoraux. Ainsi, sur la côte d'Aquitaine, pendant

des siècles, les dunes se déplaçaient sous l'action du vent et ensevelissaient les bâtiments.

Grâce à son *Mémoire sur les dunes*, paru en 1797, Nicolas Brémontier, ingénieur des Ponts et Chaussées à Bordeaux, obtient en 1801 la publication d'un décret prescrivant de «prendre des mesures pour continuer de fixer et de planter en bois les dunes des côtes de Gascogne». À la fin du Second Empire, une forêt homogène de pins maritimes s'étend sur 80 000 hectares. Elle stabilise la topographie et, par ses ressources en bois et en résine, contribue au développement socio-économique d'une région jusque là pauvre et attardée.

Cet exemple fait école. Au cours du XIX^e siècle, les espaces dunaires de nombreuses côtes d'Europe atlantique sont boisés de la même façon.

Changement de tendance : en cette fin du XX^e siècle, la vacuité et la valeur paysagère des espaces dunaires naturels sont appréciés. Ceux qui ont échappé au boisement font désormais l'objet de mesures de conservation. Ainsi, les grands champs de dunes libres du Coto de Doñana, en Espagne, et de Leba, en Pologne, sont aujourd'hui inclus dans des parcs nationaux. Au Danemark, près de Skagen, des terres agricoles ont été achetées par l'État pour permettre aux dunes mobiles de Råbjerg Mile de les envahir librement.

En outre, au Danemark et en Angleterre, des boisements artificiels sont éliminés des dunes où ils avaient été implantés. Le but est de redonner vie aux dunes, en s'assurant évidemment que leur mouvement ne présentera pas un risque pour des établissements humains, et de permettre ainsi à la végétation native spécifique du sable de s'y réimplanter spontanément.

Cette évolution de l'aménagement du territoire, où des environnements autrefois sans attrait sont aujourd'hui appréciés pour leur valeur écologique et esthétique, dépasse le cadre des espaces dunaires. La conquête de nouvelles terres agricoles aux dépens des marais maritimes est arrêtée et, en Allemagne et aux Pays-Bas, des polders sont remis en eau. Les riverains, dont la mémoire collective reste marquée par des siècles de lutte contre les sables ou contre la mer, accepteront-ils ce retour à une nature romantique et sauvage ?

Roland PASKOFF, Université Lumière, Lyon



La forêt de pins noirs plantée au début de ce siècle dans la réserve naturelle des dunes d'Ainsdale, près de Southport, en Angleterre, sur la côte de la mer d'Irlande, a été abattue sur une quinzaine d'hectares pour redonner de la mobilité aux dunes.