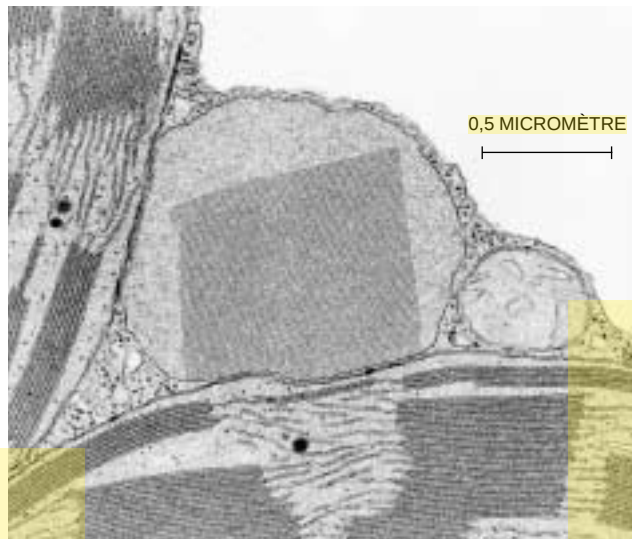


des mitochondries ? Il est vraisemblable que, lorsque les cellules eucaryotes ont acquis leurs mitochondries, certaines activités des peroxy-somes, par exemple le métabolisme de certains acides gras, étaient devenues tellement vitales que la sélection naturelle ne les a pas éliminés. C'est pourquoi on trouve aujourd'hui peroxy-somes et mitochondries ensemble dans la plupart des eucaryotes.

Les plastides sont d'autres organites issus d'endosymbiontes ; les principaux représentants en sont les chloroplastes, ces organites verts assurant la photosynthèse des algues unicellulaires et des végétaux pluricellulaires. Les plastides dérivent de cyanobactéries, les procaryotes responsables de la crise de l'oxygène. Ils ont probablement été adoptés comme endosymbiontes après les mitochondries. Les avantages sélectifs qui ont favorisé l'adoption d'endosymbiontes photosynthétiques sont évidents : des cellules qui, auparavant, avaient eu besoin d'un approvisionnement régulier en substances nutritives se contentaient désormais d'air, d'eau, de quelques minéraux solubles et de lumière. En réalité, on a la preuve que l'acquisition de plastides par des cellules eucaryotes a eu lieu indépendamment au moins trois fois, ce qui a donné naissance aux algues vertes, aux algues rouges et aux algues brunes. Les membres du premier groupe ont donné les végétaux pluricellulaires.

De la prison à l'esclavage

Ce qui fut d'abord une trêve fragile devint bientôt un esclavage progressif des endosymbiontes prisonniers de leurs hôtes phagocytaires. Cet asservissement fut accompli par le transfert de la plupart des gènes des endosymbiontes dans le noyau de la cellule hôte. En soi, la capture de gènes par un noyau n'est pas extraordinaire. Quand on introduit des gènes étrangers dans le cytoplasme d'une cellule (comme dans les expériences de biotechnologie), ils pénètrent dans le noyau et y fonctionnent : ils se répliquent au cours de la division cellu-



3. QUATRE ORGANITES sont visibles dans une cellule de feuille de tabac. Les deux chloroplastes (à gauche et en bas) et la mitochondrie (au centre, à droite) sont issus d'endosymbiontes procaryotes. Le peroxy-some (au centre), qui contient une volumineuse inclusion cristalline, sans doute constituée d'une enzyme, la catalase, pourrait provenir également d'un endosymbionte.

laire et s'expriment sous la forme des protéines correspondantes. Toutefois, la migration de gènes d'endosymbiontes vers le noyau est étonnante, car elle semble avoir soulevé plus de difficultés qu'elle n'en a résolues. Une fois les gènes transférés, les protéines qu'ils codaient ont commencé à être synthétisées dans le cytoplasme de la cellule hôte, où s'élaborent tous les produits des gènes nucléaires. Ces molécules ont dû migrer à l'intérieur de l'endosymbionte pour être utiles. Ce scénario, en apparence improbable, a non seulement résisté aux aléas de l'évolution, mais s'est même révélé si avantageux que tous les endosymbiontes qui avaient conservé des copies des gènes transférés finirent par disparaître.

Aujourd'hui, les mitochondries, les plastides et les peroxy-somes acquièrent leurs protéines du cytoplasme environnant avec l'aide de structures de transport complexes localisées dans leurs membranes. Ces structures reconnaissent des portions de protéines nouvellement synthétisées comme des « étiquettes » spécifiques de chaque organite. La machinerie de transport permet alors aux molécules concernées de traverser la membrane avec l'aide d'énergie et de protéines spécialisées, qui ont reçu le nom suggestif de chaperons. Ces systèmes de transport qui font pénétrer dans les organites des protéines synthétisées à l'extérieur

sont peut-être issus de systèmes servant à la sécrétion des protéines, qui étaient présents originellement dans les membranes des endosymbiontes. Alors la polarité des systèmes a dû être inversée, dirigée désormais de l'extérieur vers l'intérieur.

L'adoption d'endosymbiontes a certainement joué un rôle essentiel dans la naissance des eucaryotes. Toutefois l'événement clé, celui qui a requis beaucoup plus d'innovations évolutives, a été le mécanisme long et mystérieux qui a rendu ces acquisitions possibles : la lente transformation, pendant un milliard d'années ou plus, d'un ancêtre procaryote en un gros microbe phagocytaire doté de la plupart des attributs des cellules eucaryotes modernes. La science commence à lever le voile qui entoure cette transformation prodigieuse sans laquelle une bonne part du monde vivant, dont l'homme, n'existerait pas.

Christian de DUVE a partagé le prix Nobel de physiologie ou de médecine, en 1974, avec Albert Claude et George Palade pour « leurs découvertes concernant l'organisation structurale et fonctionnelle des cellules ». Il est professeur émérite de biochimie à l'Université de Louvain et à l'Université Rockefeller, à New York. En Belgique, il a fondé l'*International Institute of Cellular and Molecular Pathology* (ICP).

Christian de DUVE, *Les microcorpuscules de la cellule vivante*, in *Pour la Science*, n° 69, juillet 1983.

Christian de DUVE, *Une visite guidée de la cellule vivante*, De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 1987 ; collection « L'Univers des Sciences », éditions *Pour la Science*, diffusion Belin, Paris, 1987.

T. CAVALIER-SMITH, *The Origin of Eukaryote and Archaeobacterial Cells*, in *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 503, pp. 17-54, juillet 1987.

Christian de DUVE, *Construire une cellule : Essai sur la nature et l'origine de la vie*, De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 1990 ; InterÉditions, Paris, 1990.

Christian de DUVE, *Poussière de vie : Une histoire du vivant*, Éditions Fayard, Paris, 1996.

Trop Monopoly pour être honnête ?

IAN STEWART

En dépit de sa complexité apparente, le Monopoly est un jeu équitable.

Tout le monde a déjà joué au Monopoly. Cependant, peu de personnes ont déjà songé à sa mathématisation. Au début des années 1900, le mathématicien russe Andreï Andreïevitch Markov inventa une théorie des probabilités et la probabilité de tomber sur une case donnée au Monopoly peut être décrite par des outils mathématiques nommés chaînes de Markov. Je passerai sous silence la plus grande partie du travail de Markov et je ne rappellerai pas toutes les règles du Monopoly, mais j'essayerai de vous convaincre qu'après un certain temps,

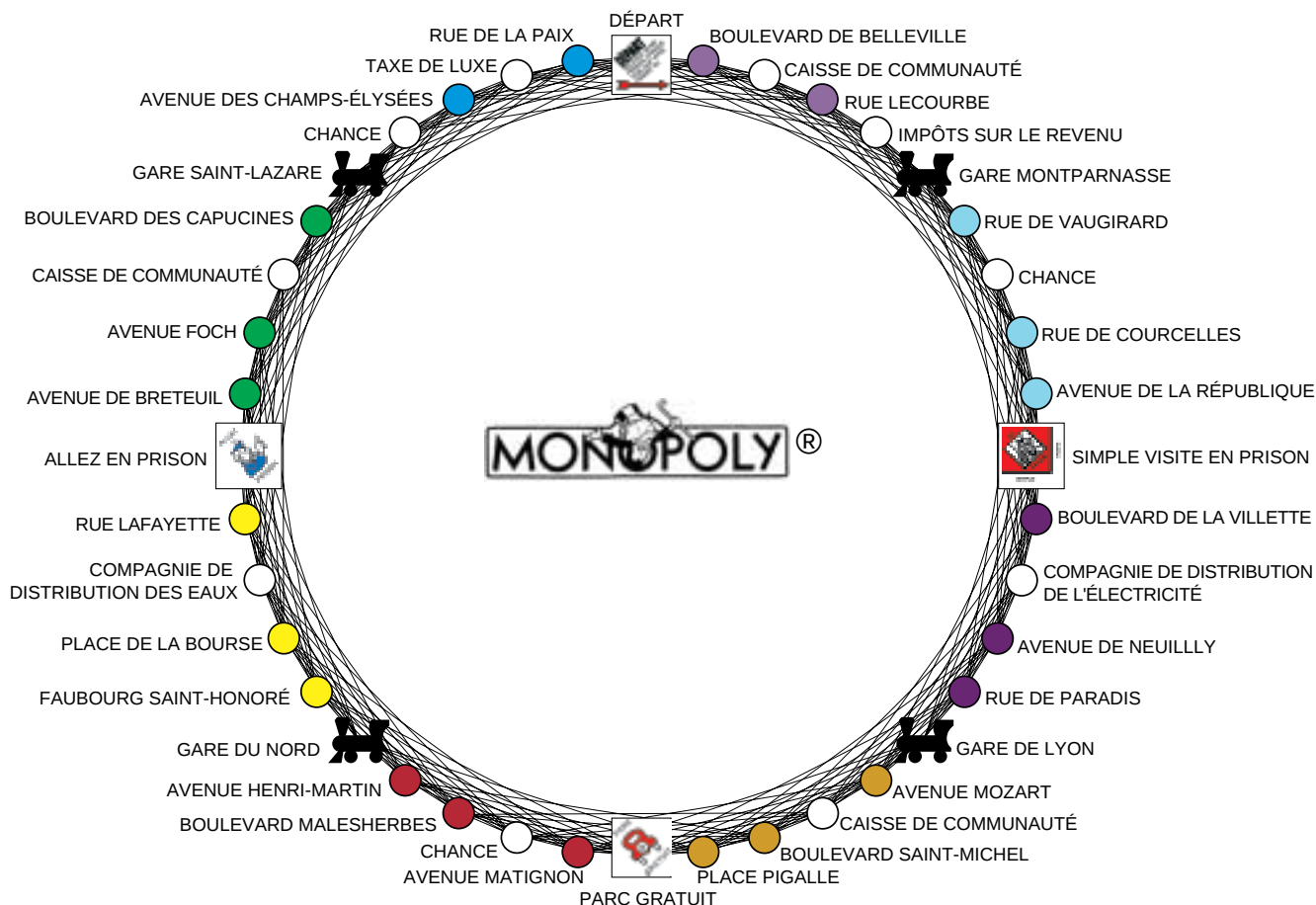
les probabilités de tomber sur n'importe quelle case du plateau de jeu sont égales.

En début de partie, les joueurs sont sur la case «Départ». Ils lancent à tour de rôle une paire de dés dont la somme des points détermine de combien de cases un joueur avance autour du plateau de jeu. Un joueur qui tire un double rejoue.

Certains totaux, tel 7, sont plus probables que d'autres. Parmi les 36 possibilités équiprobables, il existe six manières de réaliser un 7 ($1 + 6$, $2 + 5$, $3 + 4$, $4 + 3$, $5 + 2$, $6 + 1$). De sorte que la probabilité d'obtenir 7 est $6/36$, soit

$1/6$. Puis viennent 6 et 8, dont la probabilité de sortie est pour chacun $5/36$; puis 5 et 9, de probabilité $1/9$. On a une chance sur 12 de réaliser un total de 4 et 10, une chance sur 18 de réaliser 3 et 11, et enfin une chance sur 36 de réaliser 2 et 12 (il n'y a qu'une manière de réaliser ces totaux : $1 + 1$ et $6 + 6$). Sur un grand nombre de parties, le joueur qui commence atterrira le plus souvent sur la septième case, une case «Chance». Il doit alors tirer une carte du paquet «Chance» et se conformer aux instructions qui y figurent. S'il n'obtient pas 7, il arrivera plus probablement, de part et d'autre de la case 7, sur «rue de Vaugirard» ou «rue de Courcelles». Le premier joueur a donc une excellente chance de s'approprier l'un de ces terrains. S'il en achète un, il diminue la probabilité que les autres joueurs puissent acheter quelque chose à leur premier jet de dés.

C'est sans doute pourquoi les concepteurs du jeu ont placé des propriétés bon marché près du départ et celles qui sont onéreuses, mais lucratives, «avenue des Champs-Élysées» et «rue de la Paix», loin du départ : si au début, les probabilités de tomber sur des cases données sont différentes, on espère assister, après plusieurs jets de dés, à un nivellement des probabilités. Pour étudier ce niveau-



1. LA REPRÉSENTATION MATHÉMATIQUE d'un plateau de jeu de Monopoly est un cercle où chaque case est liée aux six suivantes.