

En théorie quantique des champs, qui intègre la théorie de la relativité restreinte, les entités fondamentales sont les **CHAMPS QUANTIQUES**, objets mathématiques définis partout et à tout instant, et obéissant à des équations analogues à celles des ondes classiques. Un champ quantique transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement par quantités bien définies appelées **QUANTA**. Ainsi, les quanta du champ électromagnétique sont les **PHOTONS**. Les électrons et les positrons sont les quanta d'un autre type de champ, etc.

De façon analogue, les **PHONONS** sont les quanta des **ONDES DE VIBRATION** qui se propagent dans un réseau cristallin, et les **MAGNONS** sont les quanta des **ONDES DE SPIN** (ondes où la grandeur qui change est l'orientation du spin ou moment magnétique des atomes).

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Dans les **ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES**, dont font partie les **ONDES LUMINEUSES**, c'est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propage (voir ci-dessous).

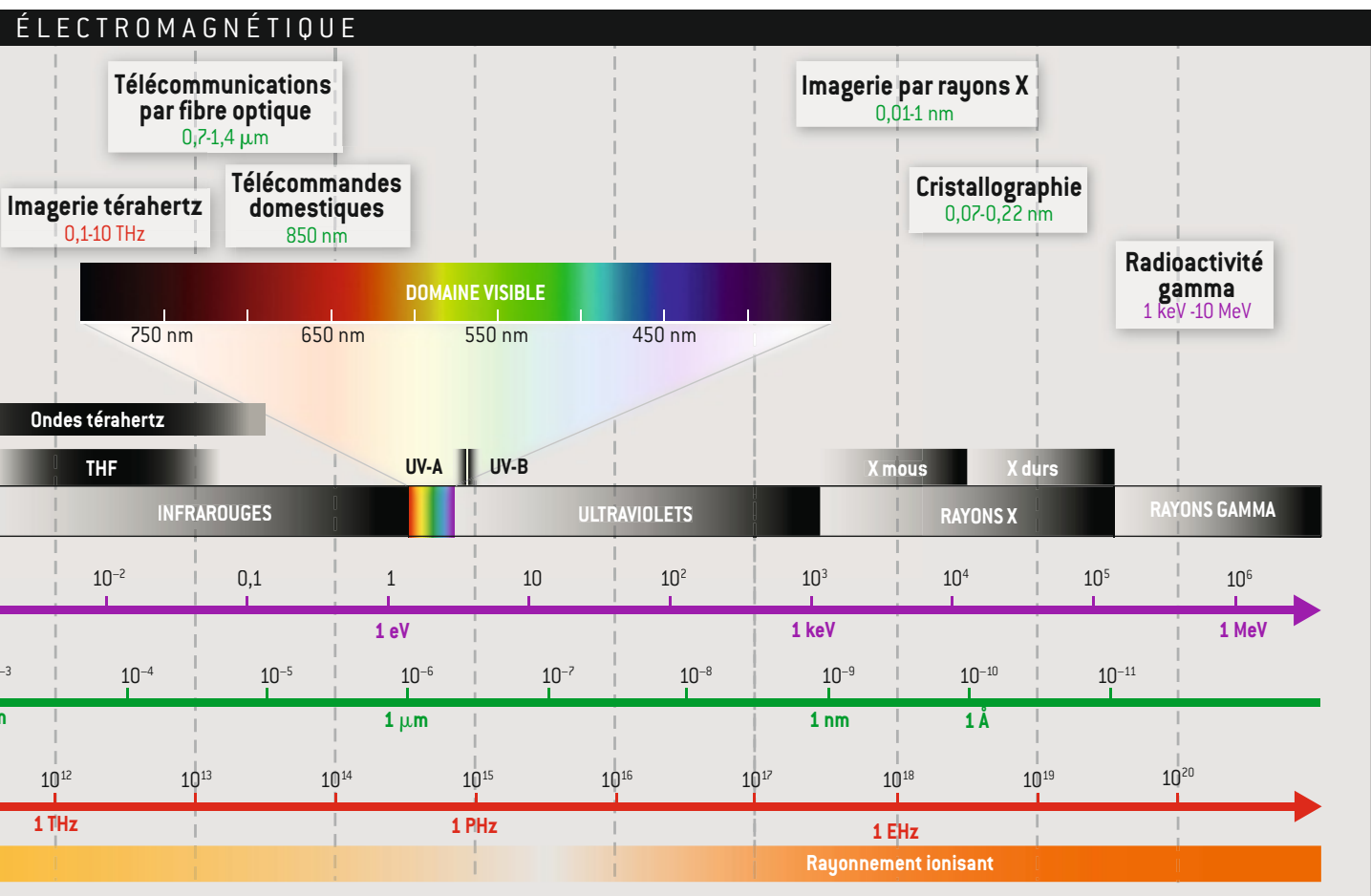
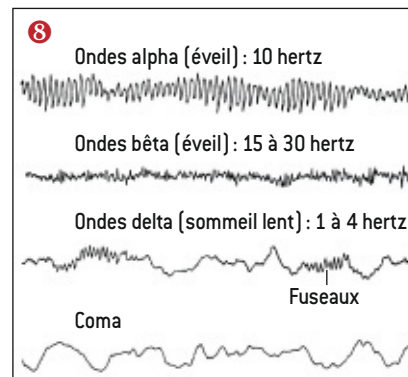
LES ONDES DU CERVEAU

On peut enregistrer à la surface du cerveau des différences de potentiel variant de quelques microvolts à plusieurs millivolts. Ces variations résultent de la présence d'ondes électriques qui naissent et se propagent dans le cerveau. En effet, de minuscules courants électriques se créent dans les neurones, dus à la circulation d'ions entre l'intérieur et l'extérieur de ces cellules, au niveau des synapses (les connexions entre neurones). Les courants individuels sont infimes,

mais, parce que les prolongements des neurones où ils se déplacent sont parallèles, la somme d'innombrables courants infimes donne un courant macroscopique, à l'origine des ondes électriques cérébrales.

Le tracé d'un électroencéphalogramme, EEG, est extrêmement compliqué, mais il est possible de le décomposer en types d'ondes particuliers que l'on sait associer aux différentes phases de vigilance de l'individu : éveil (au repos, en activité, méditation, etc.), sommeil (sommeil lent profond ou paradoxal) ou encore absence de conscience, par exemple coma. Chacun de ces types d'ondes présente une bande de fréquences caractéristique ⑧.

Les données enregistrées sur un EEG varient selon l'emplacement des électrodes sur le cuir chevelu. C'est l'analyse de toutes les composantes d'un EEG qui donnent accès en temps réel aux processus cognitifs en cours, normaux ou pathologiques. Les EEG ont une précision temporelle (une milliseconde) supérieure à celle qu'offrent les autres méthodes d'investigation de l'activité cérébrale. ■



HISTOIRE DES SCIENCES

La victoire posthume de Robert Scott

Il y a 100 ans, l'explorateur britannique Robert Scott perdait la course à la conquête du pôle Sud, choisissant de privilégier les objectifs scientifiques de son expédition. Ses découvertes jouèrent un rôle majeur dans l'acceptation de la théorie de l'évolution.

Edward LARSON

Juin 1911. Robert Scott et 32 explorateurs – scientifiques, officiers et marins britanniques, pour la plupart – patientent, reclus dans leur campement, en plein hiver austral. Dans l'Antarctique, à cette époque de l'année, le soleil ne dépasse jamais l'horizon et une couche de 2,50 mètres de glace fige la mer alentour. Le blizzard souffle presque sans discontinuer. Les températures hivernales sur l'île de Ross, la terre émergée la plus méridionale qu'ait pu atteindre le bateau de Scott, peuvent descendre en dessous de -45°C . Coupé du monde extérieur, l'équipage attend les journées printanières du mois d'octobre. Alors, certains parcourront les quelque 1 500 kilomètres de banquise qui couvrent la baie de Ross (voir la figure 4). Leur objectif : le pôle Sud.

Deux expéditions britanniques ont déjà tenté l'aventure, l'une menée par Scott (1901-1904) et l'autre par Ernest Shackleton (1907-1909). Sans succès. Cette fois, Scott est parti confiant. Ayant tiré les leçons des expéditions précédentes, il a organisé celle-ci de façon méthodique, afin non seulement d'être le premier à atteindre le pôle, mais aussi de remplir d'ambitieux objectifs scientifiques. Il a mis en place plusieurs équipes qui se déploieront dans la baie de la mer de Ross, collecteront des fossiles et diverses données scientifiques. Et au printemps, sa propre équipe se mettra en route vers le Sud, pour atteindre le pôle au début de l'été austral et y planter le drapeau anglais.

Mais un événement a perturbé ces plans. En février 1911, en tentant de rallier la péninsule Édouard VII, à l'Est de la baie de Ross,

des hommes de Scott se sont retrouvés nez à nez avec un autre équipage, à environ 560 kilomètres du campement britannique : neuf hommes originaires de Norvège, avec à leur tête Roald Amundsen, expert dans la manœuvre des chiens d'attelage et skieur hors pair. En 1905, il a été le premier à franchir le passage du Nord-Ouest dans l'Arctique canadien. Amundsen aurait dû être en route pour le pôle Nord. Mais, dans le plus grand secret, il a modifié ses plans et mis le cap sur



1. GEORGE SIMPSON, météorologue de l'expédition, effectue des observations au cap Evans.

le Sud. Une tentative de prendre les explorateurs britanniques de vitesse, interprétera Scott. Les hommes d'Amundsen voyagent légers, sans objectifs scientifiques. Avec leurs seuls skis et chiens de traîneau, ils ont prévu de foncer vers le pôle à partir d'une base plus proche de 100 kilomètres que celle de Scott.

La nouvelle a créé le trouble dans le campement de Scott. Certains membres de l'équipe ont suggéré d'abandonner la partie scientifique pour se concentrer sur le pôle. Mais Scott n'était pas de cet avis. Sa première expédition avait permis d'amasser une grande quantité d'échantillons géologiques et biologiques, de relevés météorologiques et magnétiques et de découvertes océanographiques et glaciologiques. Une part importante de la nouvelle expédition doit rester dévolue à la science : « Pour suivre l'exécution de notre programme, comme si aucun fait nouveau ne s'était produit, c'est le seul parti à prendre », note-t-il dans son journal. D'un point de vue scientifique, on ne peut que lui être reconnaissant d'avoir maintenu ses plans : ses découvertes constitueront une preuve importante en faveur de la théorie de l'évolution de Darwin. Mais lui et ses hommes paieront cher cette décision.

À la recherche d'une plante fossile

Au début du XX^e siècle, la théorie de l'évolution, publiée par le naturaliste britannique en 1859, est un sujet brûlant. Les scientifiques sont à l'affût d'un fossile qui appuierait les thèses de Darwin : une plante de l'ère paléozoïque appelée *Glossopteris*. Des fossiles de cette plante à feuilles larges ont été retrouvés en Afrique, en Australie et en Amérique du Sud. Les créationnistes, qui défendent une lecture littérale du récit biblique de la création et s'opposent à la vision darwinienne de l'évolution des espèces, sou-

2. L'UN DES 32 MEMBRES de l'expédition Scott passe en luge devant Castle Berg, une énorme masse de glace au large de l'île de Ross, en Antarctique.



tiennent que ce genre de plante est apparu de façon soudaine et isolée sur ces continents. De son côté, Darwin a proposé que la plante se soit développée sur un bloc continental polaire qui aurait été relié aux autres continents de l'hémisphère Sud. Lors de sa première expédition, Scott avait découvert des affleurements de charbon qui prouvaient que des plantes avaient un jour poussé dans l'Antarctique. Et Shackleton avait trouvé des plantes fossilisées, mais pas de *Glossopteris*. Scott a bien l'intention, cette fois, de résoudre l'énigme.

Il a donc imaginé une expédition en plusieurs étapes, et avec divers groupes de soutien qui, une fois leur tâche accomplie, rebrousseront chemin, laissant un tout petit équipage rejoindre le pôle à pied, avec une seule luge. Cette tactique, pense Scott, offrira une marge de sécurité et permettra peut-être aux équipes de collecter des données scientifiques tout au long du chemin. De même, plusieurs officiers et scientifiques resteront au camp de base pour enregistrer les données météorologiques et magnétiques, tandis que les marins et

d'autres scientifiques demeureront à bord du bateau de Scott pour mener des recherches océanographiques.

Le programme scientifique de Scott est chargé. Dès l'établissement du camp de base, en janvier 1911, Scott a envoyé dix hommes en deux groupes pour explorer montagnes et glaciers. Le plus important des deux groupes est retourné peu après sur le terrain pour une autre mission scientifique : explorer les affleurements, les glaciers et les anses sur la côte septentrionale de la terre Victoria. Comme prévu, cette équipe passe là-bas l'hiver austral 1911. Elle ne rentrera au camp de base qu'en novembre 1912 – avec quantité de fossiles, dont une empreinte d'arbre étonnante, mais sans *Glossopteris*.

En parallèle, de février à mars 1911, le second groupe, dont font partie les géologues Griffith Taylor et Franck Debenham, a exploré les vallées sèches, les pics émergeant de la glace et les gigantesques glaciers au milieu de la côte de la terre Victoria. D'avril à octobre 1911, le groupe passe les longs mois d'hiver au camp de base, examinant ses trouvailles, dont de nombreux

L'AUTEUR



Edward LARSON est professeur d'histoire et de droit à l'Université Pepperdine (Malibu, Californie, États-Unis).

fossiles, mais toujours pas de *Glossopteris*. Début novembre 1911, Taylor et Debenham repartent pour une mission encore plus longue, juste après le départ de Scott pour le pôle. Ils emmènent Tryggve Gran, le meilleur skieur nordique de Scott, et Robert Forde, le plus costaud des conducteurs de traîneau, pour affronter les terrains difficiles. En choisissant d'affecter Gran et Forde au groupe des scientifiques plutôt qu'à son propre équipage, Scott montre bien son parti pris scientifique. Cette stratégie se révélera payante : Taylor et Debenham exploreront une vaste région de montagnes et de glaciers jusque-là inconnus, où ils découvriront un remarquable ensemble de fossiles de l'ère paléozoïque (mais hélas, pas de *Glossopteris*).

La mission qui éloigna le plus Scott de la conquête du pôle était liée à une promesse qu'il avait faite au médecin et naturaliste Edward Wilson. Lors de la première expédition de Scott dans l'Antarctique, Wil-



3. LE GÉOLOGUE Franck Debenham polit des échantillons de roche.

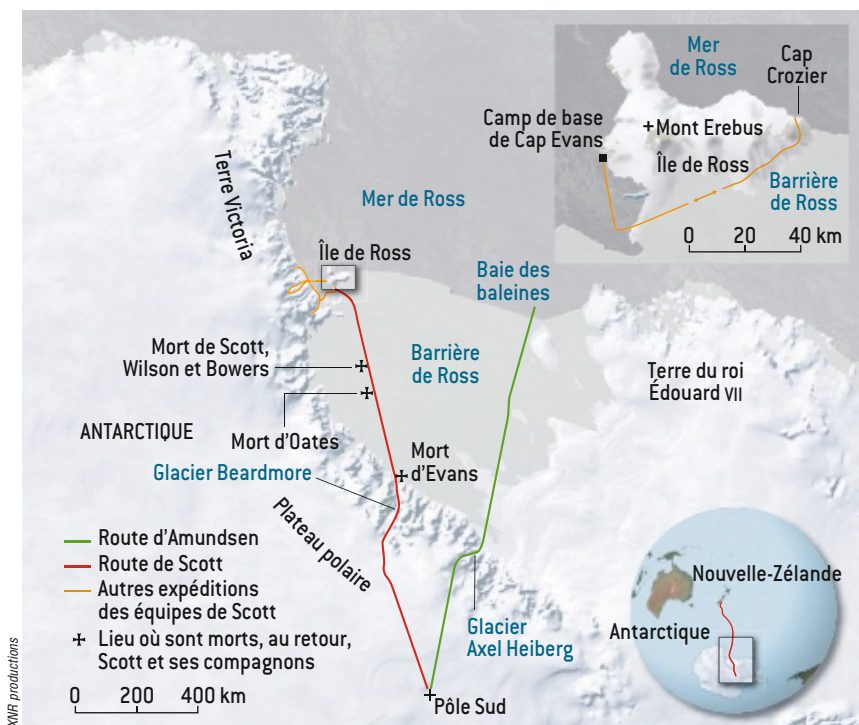
son s'était distingué en tant que zoologiste. Il avait trouvé une colonie de manchots empereurs au cap Crozier, à l'Est de l'île de Ross, et découvert que ces oiseaux marins poussaient et couvaient leurs œufs pendant l'hiver. Scott avait promis à Wilson que s'il l'accompagnait à nouveau, il pourrait rejoindre cette colonie en période hivernale pour prélever des œufs et observer si les embryons de manchots empereurs montraient des vestiges de dentition reptilienne. Wilson espérait trouver le chaînon manquant entre les oiseaux et les reptiles.

Avec cette mission, Scott s'est privé de trois aides précieuses pour planifier et préparer l'expédition au pôle : Wilson, son assistant zoologiste Apsley Cherry-Garrard et le lieutenant Henry Bowers. Soumis aux aléas d'une marche de 110 kilomètres sur la barrière de Ross, en pleine nuit polaire, Wilson et ses coéquipiers sont partis le 27 juin 1911 avec 340 kilogrammes de matériel scientifique, de vêtements chauds et de vivres chargés sur deux luges attachées l'une à l'autre et tirées par les hommes munis de harnais.

L'équipe revient quelques semaines plus tard dans un piteux état : une forte tempête a détruit leur tente et enseveli les six œufs difficilement récoltés ; les conditions météorologiques ont rendu le retour éprouvant. En septembre 1911, enfin, Scott entreprend avec Bowers et Edgar Evans, officier de la marine britannique, une dernière mission de deux semaines avant l'expédition vers le pôle : 280 kilomètres pour vérifier les piquets qu'une autre équipe a plantés dans les glaciers afin de mesurer leurs mouvements.

La conquête du pôle

Le mauvais temps et divers soucis d'organisation diffèrent le départ vers le pôle au 1^{er} novembre 1911. Amundsen devance déjà les Britanniques de 12 jours. Peu avant de quitter le camp de base, Scott note dans son journal qu'il ne sait pas trop quoi penser des chances d'Amundsen d'atteindre le pôle. Il raconte comment, très tôt, il a décidé de faire comme si ce dernier n'avait pas existé, car entrer dans la course aurait fait échouer son plan. Plusieurs équipes de soutien coopèrent : l'une hale des luges sur la première pla-



4. LES ROUTES EMPRUNTÉES PAR SCOTT (en rouge) et Amundsen (en vert) pour atteindre le pôle Sud. Avant que Scott ne quitte le cap Evans où se trouvait son camp de base, ses hommes ont passé des mois à effectuer des recherches scientifiques sur l'île de Ross et au-delà, au cap Crozier ou sur la terre Victoria. Même lors de leur retour, qui leur fut fatal, Scott et ses compagnons – Evans, Oates, Bowers et Wilson – ont collecté 15 kilogrammes de fossiles et de roches.

teforme glaciaire à l'aide de deux traîneaux automobiles. D'autres, avec des chiens et des poneys, iront jusqu'au pied du glacier Beardmore, voire jusqu'au sommet. Chaque équipe constitue des dépôts de vivres pour le retour de l'expédition, puis se sépare du groupe pour retourner à la base, jusqu'à ce qu'une seule équipe demeure, pour tirer la luge et traverser le plateau polaire à une altitude de 3 000 mètres en direction du pôle. La progression est lente, car les poneys avancent difficilement dans la poudreuse.

Le 3 janvier 1912, la dernière équipe de soutien quitte le plateau. Scott et ses hommes – Wilson, Bowers, Evans et le capitaine de l'armée britannique Lawrence Oates – sont désormais seuls face aux 240 kilomètres de glace qui les séparent du pôle. Les objectifs scientifiques sont réduits à quelques relevés météorologiques ou à des observations de la surface, balayée par le vent.

Pendant ce temps, Amundsen et ses hommes, soutenus par des chiens d'attelage efficaces, progressent vite. Ils atteignent le pôle le 14 décembre 1911, deux mois après leur départ. Leur retour est encore plus rapide : la surface est ferme, la pente favorable et les dépôts de vivres bien espacés. Cinq semaines leur suffisent pour rejoindre leur base.

Le 17 janvier 1912, Scott atteint le pôle et trouve le drapeau norvégien. « Grand Dieu, écrit-il, quel horrible pays ! »

Triste retour

Le pire reste à venir. Le froid devient intense et la neige prend l'aspect d'une couche sableuse. Les hommes s'enfoncent. Pas moyen de faire glisser la luge, il faut la tirer. Il reste des vivres, mais en quantité insuffisante pour un tel effort. Les hommes s'épuisent. Les mains d'Evans sont entaillées et ses blessures s'infectent. Oates souffre d'engelures. Tous présentent des symptômes du scorbut. Ils prennent néanmoins le temps d'effectuer quelques observations géologiques. En descendant le glacier Beardmore, ils se dirigent vers la moraine située au-dessous du mont Buckley. « La moraine est très intéressante ; aussi [...] je décide de camper et de passer le reste de la journée à faire de la géologie » écrit Scott le 8 février. « Au-des-



5. SCOTT, WILSON, EVANS ET OATES photographiés au pôle par Bowers après la découverte du drapeau planté par Amundsen.

sus de nous s'élèvent les falaises perpendiculaires constituées par des grès Beacon très attaqués par l'érosion subaérienne et recoupées de veines de charbon. Dans ce charbon, Wilson récolte des empreintes de plantes, notamment un fragment composé de lits de feuilles très nettes. » Ces plantes ressemblent fort à des *Glossopteris*. Avec l'aide de Bower, Wilson extrait 15 kilogrammes de fossiles et d'échantillons de roche.

Evans et Oates meurent les premiers. Après une semaine pénible consacrée à la descente du glacier, Evans est de plus en plus désorienté. Il perd connaissance et meurt le 17 février. Les engelures d'Oates s'aggravent au point qu'il ne peut plus suivre. Refusant de retarder les autres, il quitte la tente le 16 mars, en pleine tempête, pour ne plus revenir. Les derniers membres de l'expédition marchent encore le 19 mars. Ils ne portent que le strict nécessaire. À la demande de Wilson, ils ont pris avec eux leurs notes de terrains et les spécimens géologiques. À moins de 20 kilomètres d'un dépôt de vivres, coincés pendant huit jours par un blizzard sans nourriture ni combustible, ils meurent les uns contre les autres.

Une équipe de secours retrouvera leurs corps gelés au printemps, ainsi que leurs écrits et les fameux spécimens. Wilson avait vu juste : il s'agissait bien des *Glossopteris* tant recherchés. Scott aurait été comblé. Darwin avait raison, et il avait contribué à le prouver.

✓ BIBLIOGRAPHIE

E. J. Larson, *An Empire of Ice : Scott, Shackleton and the Heroic Age of Antarctic Science*, Yale University Press, 2011.

A. Cherry-Garrard, *Le pire voyage au monde. Antarctique 1910-1913*, Paulsen, 2008.

D. Crane, *Scott of the Antarctic*, Vintage, 2007.

S. Solomon, *The Coldest March*, Yale University Press, 2001.

R. Huntford, *The Last Place on Earth : Scott and Amundsen's Race to the South Pole*, Modern Library, 1999.

Le Pôle meurtrier, 1910-1912. Robert Falcon Scott, Pygmalion, 1997.

Le Pôle meurtrier, 1910-1912. Journal du capitaine Scott, Hachette, 1914.

R. Amundsen, *Au Pôle Sud. Expédition du Fram. 1910-1912*, Hachette, 1913.

Scott Polar Research Institute, University of Cambridge

 LOGIQUE & CALCUL Les surprises du jeu de pile ou face

Les erreurs de nos jugements spontanés sont parfois étonnantes. Le hasard créé par les lancers d'une pièce de monnaie en est l'exemple le plus frappant : tout y semble paradoxal.

Jean-Paul DELAHAYE

Les suites de piles ou faces obtenues avec une pièce non truquée nous semblent sans grand mystère et nous ne doutons guère de nos prédictions statistiques. Ce faisant, nous ignorons une multitude de subtilités, ignorance qui nous conduit à l'erreur, voire nous ferait perdre de l'argent en cas de paris. Comprendre pourquoi et tirer toutes les leçons des pièges tendus à la raison par ces suites de tirages équitables et indépendants est un travail délicat et difficile comme l'attestent les dizaines d'articles publiés depuis 40 ans sur ce sujet.

Un premier exemple de piège, dont l'idée a été proposée en 1969 par l'amateur de récréations mathématiques Walter Penney, consiste à lancer une pièce de monnaie (non truquée) autant de fois qu'il le faut jusqu'à obtenir des séquences de piles ou faces fixées à l'avance. On cherche par exemple à obtenir la séquence pile-face, notée PF, ou face-face, notée FF. La question posée est : laquelle a le plus de chances de se présenter en premier, et combien est-il raisonnable de parier sur elle ?

Raisonnement A. Considérons deux tirages successifs d'une pièce de monnaie ; il y a autant de chances d'obtenir PF que FF, et cette probabilité est $(1/2)^2 = 1/4$. Les deux séquences PF et FF étant équiprobables, chacune a la même probabilité de sortir en premier, et la probabilité que PF survienne avant FF est donc $1/2$. Les deux séquences mises en compétition partant sur des bases égales, si l'on nous pro-

pose de parier, nous pouvons choisir indifféremment l'une ou l'autre et miser 1 euro contre 1 euro.

Or la réalité est bien différente : dans une compétition entre PF et FF, la séquence PF gagnera trois fois sur quatre. Il est donc intéressant d'accepter de miser 2 euros pour PF contre 1 euro en faveur de FF ; un pari ne favorisant aucun joueur consiste à miser 3 euros pour PF contre 1 pour FF. Voici la démonstration de ces affirmations.



Raisonnement B. Les deux premiers tirages peuvent être PF, FP, PP ou FF. Ces quatre débuts possibles sont équiprobables, chacun survenant avec une probabilité $1/4$. Si c'est FF qui sort, la séquence FF aura gagné la compétition. Dans les trois autres cas, la gagnante sera toujours PF. En effet, dès qu'un P tombe, FF ne peut plus sortir avant PF : tant que des P continuent de tomber, aucune ne gagne, et dès que F tombe, PF gagne. Si l'on vous propose ce jeu, choisissez PF : vous gagnerez trois fois sur quatre.

Où est l'erreur dans le raisonnement A ? Sa première phrase est indubitable. Elle implique d'ailleurs que dans une longue séquence de P ou F tirée avec une pièce de monnaie non truquée, il y aura en moyenne autant de couples PF que de couples FF.

L'erreur est dans la seconde phrase : « Les deux séquences PF et FF étant équiprobables, chacune a la même probabilité d'être obtenue en premier, et donc, la probabilité que PF survienne avant FF est $1/2$. » En effet, même si les deux séquences sont équiprobables, les relations qu'elles entretiennent, comme le détaille le raisonnement B, ont pour conséquence que dès qu'un P est tombé, FF ne peut plus gagner, ce qui entraîne alors que la séquence PF apparaîtra en premier trois fois plus souvent que FF.

Le même type de blocage d'une séquence par une autre montre que si l'on oppose PFF à FFF, la première séquence gagne sept fois sur huit. Plus généralement, si l'on oppose $PF...F$ ($[n-1]$ fois F) à $FF...F$ (n fois F), alors la première séquence gagne $(2^n - 1)$ fois sur 2^n : nous ne devons donc pas hésiter à parier 1 000 euros contre 1 euro en choisissant PFFFFFFF contre FFFFFFFF.

Si votre doute persiste, opérez un contrôle expérimental avec une pièce de monnaie, en programmant une simulation avec votre ordinateur ou encore en associant P aux décimales impaires de π et F aux décimales paires (voir la série illustrée ci-dessus et ci-contre). Dans ce dernier cas, vous pouvez commencer la série

