

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Mars 1998

édition française de

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

La dissémination des gènes

Les fausses
pierres précieuses

Ultrasons
et micro-électronique

Des déchets nucléaires
sous les océans

Les ancêtres
des Néandertaliens

Lise Meitner

La sonde Ulysse

L'architecture du vivant

Canada : \$ 8,75

BLOC-NOTES de Didier Nordon

5

JEU-CONCOURS

Cercles tangents

6

par Pierre Tougne

TRIBUNE DES LECTEURS

7

POINT DE VUE

Les biotechnologies

9

par Pierre Tambourin

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Le rouet des armes à feu

10

par Vernard Foley

SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le rôti de bœuf

15

par Hervé This

SCIENCE ET FINANCE

Pour identifier le délit d'initié

17

par Christian Walter

La création d'entreprise

20

par Linh Nguyen

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

22

- Lentille à focale variable ■ Deux vieux enfants
- Une enzyme artificielle ■ Le lysosome : l'appareil digestif des cellules ■ Implumés ou non ■ Les langues en péril
- Jeu de go ■ Convection intrinsèque

LOGIQUE ET CALCUL

Aléas du hasard informatique

92

par Jean-Paul Delahaye

VISIONS MATHÉMATIQUES

Us et chimes des dés

100

par Ian Stewart

L'EXPÉRIENCE DU MOIS

Marcher sur l'eau

105

par Caroline Loubet

SAVOIR TECHNIQUE

Les hologrammes

107

par Stephen Benton

L'IMAGE DU MOIS

Fractures

109

par H. van Damme, F. Duval et Y. Abdelhaye

ANNONCES DE LIVRES

110

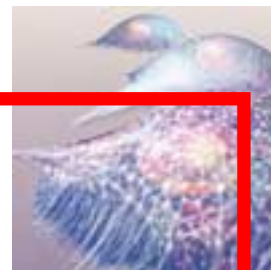
- Volcans ■ Granites et fumées ■ Le Trésor, dictionnaire des sciences ■ Un pharmacien raconte
- Électrostatique et magnétostatique

L'architecture de la vie

34

par Donald Ingber

Un ensemble universel de règles de construction guide la conception des structures organiques, des simples composés carbonés jusqu'aux cellules et aux tissus les plus complexes.



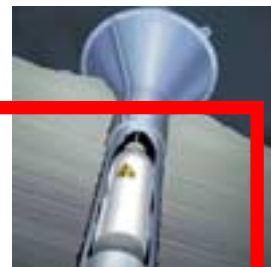
Sim Films

Enfouissement sous-marins des déchets radioactifs

46

par Charles Hollister et Steven Nadis

Peut-on stocker les déchets nucléaires dans les sédiments des fonds océaniques? Les conditions sont favorables, mais des études restent à faire.



Climat de l'Europe et l'origine des Néandertaliens

52

par Jean-Jacques Hublin

Plus d'un million d'années, les premiers hommes sont arrivés en Europe. Isolés lors de périodes glaciaires, ils sont les ancêtres d'un groupe humain différent des hommes modernes des Néandertaliens.



Échanges de gènes entre bactéries

60

par Robert L. Miller

Le transfert de gènes entre bactéries d'espèces différentes est plus fréquent qu'on ne le pensait. Il faudra explorer ce phénomène pour maîtriser les possibles contaminations de l'environnement.



À partir du 2 mars 1998,
Pour la Science change de numéro de téléphone : 01-55-42-84-00

Le traitement des gemmes

66

par Emmanuel Fritsch, Jim Shigley et Bernard Lecomte

Les gemmes subissent des traitements pour être plus brillants, qui en améliorent l'aspect. Grâce aux outils d'analyse, on détecte certaines modifications frauduleuses. C'est la lutte entre l'épée et le bouclier.

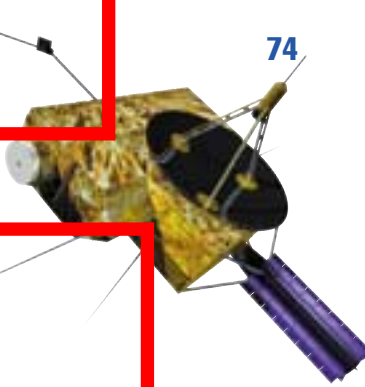


La mission Ulysse

74

par Edward Smith et Richard Marston

La sonde *Ulysse* a survolé les pôles du Soleil et analysé le fonctionnement de notre étoile. Le champ magnétique est plus régulier qu'on ne le croyait.



Lise Meitner et la fission nucléaire

80

par Ruth Lewin Sime

Lise Meitner, exilée en Suède, fit découvrir la fission nucléaire à Fritz Strassmann et à Otto Hahn. Pourtant, seul ce dernier reçut le prix Nobel.

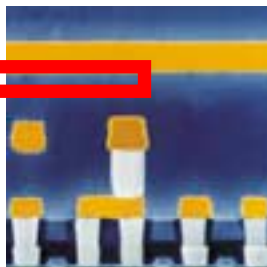


L'acoustique picoseconde

88

par Humphrey Maris

À l'aide d'ultrasons de très haute fréquence, on teste les connexions des circuits intégrés.



ÉDITORIAL

La beauté contrefaite

Selon la légende, les aigles d'Alexandre le Grand auraient volé les diamants de la vallée des serpents pour les disséminer sur toute la Terre. Cette double évocation, évasion et distribution des richesses, illustre la fascination exercée par les pierres précieuses : leur rareté et leur beauté tranchent avec la monotonie et la grisaille du quotidien.

Les gemmes sont au confluent des extrêmes scientifiques : par leur formation et leur résistance aux hautes pressions, elles intéressent le géologue ; par leur exceptionnelle dureté, le chimiste et l'industriel ; par leur fort indice de réfraction et leur transparence dans le visible et l'ultraviolet, les spécialistes de l'optique ; par leur qualité de conduction thermique et électrique, l'électronicien ; et par leur prix, les contrefacteurs, qui mettent à profit les connaissances pour teinter et parfaire les pierres (voir *Le traitement des gemmes*, page 66). Les traitements ont temporairement le dessus : certaines méthodes de traitement sont inconnues et difficilement décelables.

Outre la joaillerie, le diamant est la matière première d'une industrie considérable, d'une taille comparable à l'industrie de l'acier, du charbon et des semi-conducteurs.

Les hasards du journalisme nous ont fait interroger deux scientifiques, Pierre Tambourin et Linh Nuyen (pages 9 et 20), sur le trop faible nombre des créations d'entreprises en France. Leurs voix convergent : ni l'enseignement, ni la culture sociale n'incitent les jeunes ingénieurs à prendre le risque de la création. Pourquoi ? Parce que le succès est socialement mal apprécié et économiquement trop pénalisé. L'image du patron qui tire sa richesse de l'exploitation des travailleurs prévaut, alors que les fondateurs de *start-up* augmentent la taille du gâteau à partager par tous.

Les créateurs sont des diamants rares et comme eux, leur valeur est ostentatoire.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

Nous sommes chocolat

Rien de tel que de trop seriner à un enfant les vertus de telle ou telle chose pour qu'en déguster à jamais. Heureusement pour eux, les amateurs de chocolat ne sont pas tous des enfants. Sinon, ils pourraient finir par être dégoûtés, eux aussi, à force de subir les éloges du chocolat qui se multiplient depuis quelque temps. Ainsi, un article paru dans *Le Monde* du 26 décembre 1997 prétendait justifier scientifiquement la fameuse formule selon laquelle le cacao est la nourriture des dieux. Et on y lisait des phrases comme celle-ci : «Les N-acétylthanolamines apportées par le cacao élèvent les taux d'anandamide et augmenteraient ainsi les effets cannabinoïdes.»

Il m'est arrivé de me sentir lourd après un tête-à-tête prolongé avec un ballotin de chocolats. Mais aussi lourd qu'une prose pareille, ça, Dieu merci, jamais !

Une précision ponctuelle précise et une prévision en moyenne ne relèvent certes pas du même ordre de choses. Par exemple, il n'est pas scientifique de prétendre prévoir que tel lancer d'une pièce de monnaie va donner «pile» ou qu'il va donner «face», mais il est scientifique de prévoir que, sur mille lancers, il y aura en moyenne à peu près cinq cents «pile» et cinq cents «face». Je sais bien, mais quand même ! Dans une situation simple et familière, où je pourrais vérifier ses dires, la science se défie : elle s'avoue incapable de prévoir le temps de la semaine prochaine. Et là où je ne peux pas vérifier, elle affirme. Pis encore : elle veut imposer des restrictions au nom de ce qui, selon elle, se passera dans un siècle.

Même si les scientifiques s'appuient sur d'excellentes raisons, on comprend que l'image publique de la science paraisse embourbée.

si officielleût-elle, se concluait par ce geste aussi puéril qu'efficace : tirer la langue pour mouiller quelque chose. Aujourd'hui, ne reste que la nostalgie de cette époque. Les enveloppes sont autocollantes, les timbres, remplacés par des vignettes elles aussi autocollantes. Tout cela est sans doute plus hygiénique – et moins écologique : songeons à toutes les bandes protectrices ôtées et jetées avant de fermer les enveloppes. Seuls quelques métiers exigent encore la pratique de la salivation. La couture (pour passer le fil dans le chas de l'aiguille) ; l'épicerie (pour saisir la feuille de papier dans laquelle emballer fromage ou jambon) ; la banque (pour compter des liasses de billets). C'est toute une civilisation qui vient de disparaître, et personne ne semble s'en soucier.

Atmosphère, atmosphère

D'un côté, la science explique que, les équations réoissant le déplacement des masses d'air étant complexes, il est déraisonnable de prétendre prévoir, à plus de quelques jours, le temps qu'il fera en un lieu donné. D'un autre côté, la même science nous met en garde : si nous continuons à polluer l'atmosphère comme nous le faisons, l'effet de serre aura de graves conséquences sur le climat dans moins d'un siècle.

Nostalgie du salvage

Certains – mais ils se font de plus en plus rares – ont encore l'habitude de saliver lorsque, terminant d'écrire une lettre, ils arrivent au moment de la signer. Cette salivation n'exprime pas leur contentement devant leur propre prose. Elle n'est que la manifestation d'un vieux réflexe conditionné. Il n'y a pas si longtemps, le moment de la signature précédait le collage du timbre, où les humeurs aqueuses étaient nécessaires. Toute lettre,

Un danger chasse l'autre

Dans son introduction à l'ouvrage collectif *Une même éthique pour tous ?* (éditions Odile Jacob, 1997), Jean-Pierre Changeux note que certains chercheurs acceptent de discuter les problèmes éthiques posés par leurs travaux, mais que d'autres refusent et s'en tiennent à une position strictement techniciste. Il écrit : «On rencontre [la position strictement techniciste] plus fréquemment chez les physiciens, mécaniciens, chimistes, ingénieurs, qui font néanmoins pressentir des menaces sur l'avenir de l'humanité beaucoup plus redoutables que les sciences biologiques et médicales. Je ne me mêlerai pas de discuter la dangerosité comparée des diverses espèces de chercheurs. Reste l'étonnante banalité du propos. Aux beaux jours du scientisme triomphant, chaque science promettait mille exploits. Temps passé : le biologiste J.-P. Changeux sera déjà content d'apparaître moins dangereux que ses collègues physiciens ou chimistes.»

Toujours dans l'introduction signée par J.-P. Changeux, on lit cette phrase : «Les enfants distinguent sans ambiguïté, dès trois ans et trois mois, d'une part les règles morales proprement dites, et d'autre part les règles conventionnelles.» Qu'un physicien trouve exactement trois ans et trois mois pour la durée de tel ou tel phénomène, fort bien. Mais cette précision quant au développement psychologique est d'une délirante précision.

À quelque chose Mahler est bon

Mahler... Pour certains, c'est le nom d'un musicien. Pour d'autres (qui peuvent être les mêmes, d'ailleurs), c'est celui d'un mathématicien. Et s'il court des anecdotes sur le musicien Gustav Mahler (1860-1911), il en court aussi sur le mathématicien Kurt Mahler (1903-1988). En voici une. Il est arrivé à Mahler – cruelle mésaventure ! – de trouver un théorème en croyant à tort être le premier. Alors que l'article où l'énonçait ce théorème était déjà en cours de publication, Mahler fut prévenu qu'il avait un prédécesseur. Conscientieux, il ajouta *in extremis* une note lui rendant justice. Ce genre de rencontre malheureuse est relativement banal pour un mathématicien. Ce qui est moins banal – et que Mahler se garda bien de dire dans sa note –, c'est qu'il avait été lui-même rapporteur de l'article dudit prédécesseur ! Oui, c'est à Mahler qu'il faut attribuer le problème qui voulait savoir si l'article méritait qu'on le publie... Bel exemple de l'arbitrage. Mahler était honnête, ce qui n'est pas toujours le cas : il avait tout oublié. Allez croire à un «progrès cumulatif des sciences» après cela...

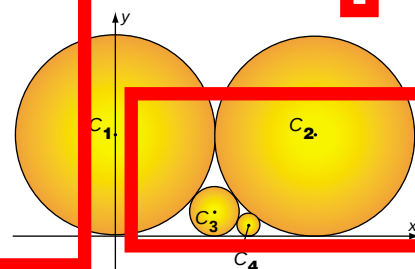
Le plus triste est que le devancier n'a pas laissé de souvenir marquant. La plupart des mathématiciens ignorent jusqu'à son nom. J'ai consulté les érudits : il s'agirait d'un nommé Christer Lech. Le voilà-t-il tiré de l'oubli ?

JEU-CONCOURS N° 45

PIERRE TOUGNE

Cercles tangents

La suite de Fibonacci $F_{n+1} = F_n + F_{n-1}$ avec $F_0 = F_1 = 1$ ainsi que le nombre d'or $\phi = (1 + \sqrt{5})/2$ limite du rapport F_n/F_{n-1} quand n tend vers l'infini ont la particularité d'intervenir dans des problèmes mathématiques où l'on ne l'attend guère. Sauriez-vous la débusquer dans le problème suivant : dans un repère xOy , on considère deux cercles de rayon 1 centrés en $(0,1)$ noté C_1 et $(2,1)$ noté C_2 et soit C_3 le cercle tangent à C_1 , C_2 et l'axe x , C_4 le cercle tangent à C_3 , C_2 et l'axe x , ..., C_n le cercle tangent à C_{n-1} , C_{n-2} et l'axe x (voir la figure)? Plus précisément si l'on désigne par (x_n, y_n) les coordonnées du centre du cercle C_n , trouver une expression pour calculer x_n et y_n et en déduire l'abscisse limite des cercles C_n quand n tend vers l'infini.



Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à **Pour la Science**, rue Ferrou, 75006 PARIS. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de mars 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 43

L'ingéniosité des très nombreux lecteurs pour raconter les neuf histoires de 1998 m'aurait permis *a posteriori* ! de restreindre le choix des symboles utilisables. Curieusement, le nombre minimum de symboles utilisés pour les neuf histoires semble être 77 que ce soit avec les sept symboles $+, -, \times, /, ^, (,)$ ou $+, -, \times, /, ^, \sqrt{}, !$ comme pour les neuf histoires suivantes :

1998 = $(2^4 - 1) \times (3^2 - 1) \times (4^2 - 1) \times (5^2 - 1) \times (6^2 - 1) \times (7^2 - 1) \times (8^2 - 1) \times (9^2 - 1)$ (pas de 2)
 1998 = $1 - 4^5 + 6 \times 7 \times 8 \times 9$ (pas de 2)
 1998 = $-1 - 2 - 4^5 + 6 \times 7 \times 8 \times 9$ (pas de 3)
 1998 = $(1/2 + 3 + 5 \times 6 \times 7 + 8) \times 9 = 1/2 \times 3 + 5/6 \times 7^8 - \sqrt{9}$ (pas de 4)
 1998 = $1 + 3 - 4 \times (6 - 7 \times 8 \times 9) = -1 + 2 \times 3 \times 4 \times 6 \times 7 - 8 - 9$ (pas de 5)
 1998 = $1 - 3 + 4 \times (5 - 7 \times 8 \times 9) = 1 - 2 - 3^4 \times 5 + \sqrt{7^8 + 9}$ (pas de 6)
 1998 = $-1 - 2 \times 3^4 + 5 \times 6 \times 8 \times 9$ (pas de 7)
 1998 = $1/2 \times (3^2 - 1) \times (4^2 - 1) \times (5^2 - 1) \times (6^2 - 1) \times (7^2 - 1) \times (8^2 - 1) \times (9^2 - 1)$ (pas de 8)
 1998 = $(1 - 3) \times (4 - 5) \times (6 - 7) \times (8 - 9) \times (10 - 11) \times (12 - 13) \times (14 - 15) \times (16 - 17) \times (18 - 19) \times (20 - 21) \times (22 - 23) \times (24 - 25) \times (26 - 27) \times (28 - 29) \times (30 - 31) \times (32 - 33) \times (34 - 35) \times (36 - 37) \times (38 - 39) \times (40 - 41) \times (42 - 43) \times (44 - 45) \times (46 - 47) \times (48 - 49) \times (50 - 51) \times (52 - 53) \times (54 - 55) \times (56 - 57) \times (58 - 59) \times (60 - 61) \times (62 - 63) \times (64 - 65) \times (66 - 67) \times (68 - 69) \times (70 - 71) \times (72 - 73) \times (74 - 75) \times (76 - 77) \times (78 - 79) \times (80 - 81) \times (82 - 83) \times (84 - 85) \times (86 - 87) \times (88 - 89) \times (90 - 91) \times (92 - 93) \times (94 - 95) \times (96 - 97) \times (98 - 99) \times (100 - 101) \times (102 - 103) \times (104 - 105) \times (106 - 107) \times (108 - 109) \times (110 - 111) \times (112 - 113) \times (114 - 115) \times (116 - 117) \times (118 - 119) \times (120 - 121) \times (122 - 123) \times (124 - 125) \times (126 - 127) \times (128 - 129) \times (130 - 131) \times (132 - 133) \times (134 - 135) \times (136 - 137) \times (138 - 139) \times (140 - 141) \times (142 - 143) \times (144 - 145) \times (146 - 147) \times (148 - 149) \times (150 - 151) \times (152 - 153) \times (154 - 155) \times (156 - 157) \times (158 - 159) \times (160 - 161) \times (162 - 163) \times (164 - 165) \times (166 - 167) \times (168 - 169) \times (170 - 171) \times (172 - 173) \times (174 - 175) \times (176 - 177) \times (178 - 179) \times (180 - 181) \times (182 - 183) \times (184 - 185) \times (186 - 187) \times (188 - 189) \times (190 - 191) \times (192 - 193) \times (194 - 195) \times (196 - 197) \times (198 - 199) \times (200 - 201) \times (202 - 203) \times (204 - 205) \times (206 - 207) \times (208 - 209) \times (210 - 211) \times (212 - 213) \times (214 - 215) \times (216 - 217) \times (218 - 219) \times (220 - 221) \times (222 - 223) \times (224 - 225) \times (226 - 227) \times (228 - 229) \times (230 - 231) \times (232 - 233) \times (234 - 235) \times (236 - 237) \times (238 - 239) \times (240 - 241) \times (242 - 243) \times (244 - 245) \times (246 - 247) \times (248 - 249) \times (250 - 251) \times (252 - 253) \times (254 - 255) \times (256 - 257) \times (258 - 259) \times (260 - 261) \times (262 - 263) \times (264 - 265) \times (266 - 267) \times (268 - 269) \times (270 - 271) \times (272 - 273) \times (274 - 275) \times (276 - 277) \times (278 - 279) \times (280 - 281) \times (282 - 283) \times (284 - 285) \times (286 - 287) \times (288 - 289) \times (290 - 291) \times (292 - 293) \times (294 - 295) \times (296 - 297) \times (298 - 299) \times (300 - 301) \times (302 - 303) \times (304 - 305) \times (306 - 307) \times (308 - 309) \times (310 - 311) \times (312 - 313) \times (314 - 315) \times (316 - 317) \times (318 - 319) \times (320 - 321) \times (322 - 323) \times (324 - 325) \times (326 - 327) \times (328 - 329) \times (330 - 331) \times (332 - 333) \times (334 - 335) \times (336 - 337) \times (338 - 339) \times (340 - 341) \times (342 - 343) \times (344 - 345) \times (346 - 347) \times (348 - 349) \times (350 - 351) \times (352 - 353) \times (354 - 355) \times (356 - 357) \times (358 - 359) \times (360 - 361) \times (362 - 363) \times (364 - 365) \times (366 - 367) \times (368 - 369) \times (370 - 371) \times (372 - 373) \times (374 - 375) \times (376 - 377) \times (378 - 379) \times (380 - 381) \times (382 - 383) \times (384 - 385) \times (386 - 387) \times (388 - 389) \times (390 - 391) \times (392 - 393) \times (394 - 395) \times (396 - 397) \times (398 - 399) \times (400 - 401) \times (402 - 403) \times (404 - 405) \times (406 - 407) \times (408 - 409) \times (410 - 411) \times (412 - 413) \times (414 - 415) \times (416 - 417) \times (418 - 419) \times (420 - 421) \times (422 - 423) \times (424 - 425) \times (426 - 427) \times (428 - 429) \times (430 - 431) \times (432 - 433) \times (434 - 435) \times (436 - 437) \times (438 - 439) \times (440 - 441) \times (442 - 443) \times (444 - 445) \times (446 - 447) \times (448 - 449) \times (450 - 451) \times (452 - 453) \times (454 - 455) \times (456 - 457) \times (458 - 459) \times (460 - 461) \times (462 - 463) \times (464 - 465) \times (466 - 467) \times (468 - 469) \times (470 - 471) \times (472 - 473) \times (474 - 475) \times (476 - 477) \times (478 - 479) \times (480 - 481) \times (482 - 483) \times (484 - 485) \times (486 - 487) \times (488 - 489) \times (490 - 491) \times (492 - 493) \times (494 - 495) \times (496 - 497) \times (498 - 499) \times (500 - 501) \times (502 - 503) \times (504 - 505) \times (506 - 507) \times (508 - 509) \times (510 - 511) \times (512 - 513) \times (514 - 515) \times (516 - 517) \times (518 - 519) \times (520 - 521) \times (522 - 523) \times (524 - 525) \times (526 - 527) \times (528 - 529) \times (530 - 531) \times (532 - 533) \times (534 - 535) \times (536 - 537) \times (538 - 539) \times (540 - 541) \times (542 - 543) \times (544 - 545) \times (546 - 547) \times (548 - 549) \times (550 - 551) \times (552 - 553) \times (554 - 555) \times (556 - 557) \times (558 - 559) \times (560 - 561) \times (562 - 563) \times (564 - 565) \times (566 - 567) \times (568 - 569) \times (570 - 571) \times (572 - 573) \times (574 - 575) \times (576 - 577) \times (578 - 579) \times (580 - 581) \times (582 - 583) \times (584 - 585) \times (586 - 587) \times (588 - 589) \times (590 - 591) \times (592 - 593) \times (594 - 595) \times (596 - 597) \times (598 - 599) \times (600 - 601) \times (602 - 603) \times (604 - 605) \times (606 - 607) \times (608 - 609) \times (610 - 611) \times (612 - 613) \times (614 - 615) \times (616 - 617) \times (618 - 619) \times (620 - 621) \times (622 - 623) \times (624 - 625) \times (626 - 627) \times (628 - 629) \times (630 - 631) \times (632 - 633) \times (634 - 635) \times (636 - 637) \times (638 - 639) \times (640 - 641) \times (642 - 643) \times (644 - 645) \times (646 - 647) \times (648 - 649) \times (650 - 651) \times (652 - 653) \times (654 - 655) \times (656 - 657) \times (658 - 659) \times (660 - 661) \times (662 - 663) \times (664 - 665) \times (666 - 667) \times (668 - 669) \times (670 - 671) \times (672 - 673) \times (674 - 675) \times (676 - 677) \times (678 - 679) \times (680 - 681) \times (682 - 683) \times (684 - 685) \times (686 - 687) \times (688 - 689) \times (690 - 691) \times (692 - 693) \times (694 - 695) \times (696 - 697) \times (698 - 699) \times (700 - 701) \times (702 - 703) \times (704 - 705) \times (706 - 707) \times (708 - 709) \times (710 - 711) \times (712 - 713) \times (714 - 715) \times (716 - 717) \times (718 - 719) \times (720 - 721) \times (722 - 723) \times (724 - 725) \times (726 - 727) \times (728 - 729) \times (730 - 731) \times (732 - 733) \times (734 - 735) \times (736 - 737) \times (738 - 739) \times (740 - 741) \times (742 - 743) \times (744 - 745) \times (746 - 747) \times (748 - 749) \times (750 - 751) \times (752 - 753) \times (754 - 755) \times (756 - 757) \times (758 - 759) \times (760 - 761) \times (762 - 763) \times (764 - 765) \times (766 - 767) \times (768 - 769) \times (770 - 771) \times (772 - 773) \times (774 - 775) \times (776 - 777) \times (778 - 779) \times (780 - 781) \times (782 - 783) \times (784 - 785) \times (786 - 787) \times (788 - 789) \times (790 - 791) \times (792 - 793) \times (794 - 795) \times (796 - 797) \times (798 - 799) \times (800 - 801) \times (802 - 803) \times (804 - 805) \times (806 - 807) \times (808 - 809) \times (810 - 811) \times (812 - 813) \times (814 - 815) \times (816 - 817) \times (818 - 819) \times (820 - 821) \times (822 - 823) \times (824 - 825) \times (826 - 827) \times (828 - 829) \times (830 - 831) \times (832 - 833) \times (834 - 835) \times (836 - 837) \times (838 - 839) \times (840 - 841) \times (842 - 843) \times (844 - 845) \times (846 - 847) \times (848 - 849) \times (850 - 851) \times (852 - 853) \times (854 - 855) \times (856 - 857) \times (858 - 859) \times (860 - 861) \times (862 - 863) \times (864 - 865) \times (866 - 867) \times (868 - 869) \times (870 - 871) \times (872 - 873) \times (874 - 875) \times (876 - 877) \times (878 - 879) \times (880 - 881) \times (882 - 883) \times (884 - 885) \times (886 - 887) \times (888 - 889) \times (890 - 891) \times (892 - 893) \times (894 - 895) \times (896 - 897) \times (898 - 899) \times (900 - 901) \times (902 - 903) \times (904 - 905) \times (906 - 907) \times (908 - 909) \times (910 - 911) \times (912 - 913) \times (914 - 915) \times (916 - 917) \times (918 - 919) \times (920 - 921) \times (922 - 923) \times (924 - 925) \times (926 - 927) \times (928 - 929) \times (930 - 931) \times (932 - 933) \times (934 - 935) \times (936 - 937) \times (938 - 939) \times (940 - 941) \times (942 - 943) \times (944 - 945) \times (946 - 947) \times (948 - 949) \times (950 - 951) \times (952 - 953) \times (954 - 955) \times (956 - 957) \times (958 - 959) \times (960 - 961) \times (962 - 963) \times (964 - 965) \times (966 - 967) \times (968 - 969) \times (970 - 971) \times (972 - 973) \times (974 - 975) \times (976 - 977) \times (978 - 979) \times (980 - 981) \times (982 - 983) \times (984 - 985) \times (986 - 987) \times (988 - 989) \times (990 - 991) \times (992 - 993) \times (994 - 995) \times (996 - 997) \times (998 - 999) \times (1000 - 1001) \times (1002 - 1003) \times (1004 - 1005) \times (1006 - 1007) \times (1008 - 1009) \times (1010 - 1011) \times (1012 - 1013) \times (1014 - 1015) \times (1016 - 1017) \times (1018 - 1019) \times (1020 - 1021) \times (1022 - 1023) \times (1024 - 1025) \times (1026 - 1027) \times (1028 - 1029) \times (1030 - 1031) \times (1032 - 1033) \times (1034 - 1035) \times (1036 - 1037) \times (1038 - 1039) \times (1040 - 1041) \times (1042 - 1043) \times (1044 - 1045) \times (1046 - 1047) \times (1048 - 1049) \times (1050 - 1051) \times (1052 - 1053) \times (1054 - 1055) \times (1056 - 1057) \times (1058 - 1059) \times (1060 - 1061) \times (1062 - 1063) \times (1064 - 1065) \times (1066 - 1067) \times (1068 - 1069) \times (1070 - 1071) \times (1072 - 1073) \times (1074 - 1075) \times (1076 - 1077) \times (1078 - 1079) \times (1080 - 1081) \times (1082 - 1083) \times (1084 - 1085) \times (1086 - 1087) \times (1088 - 1089) \times (1090 - 1091) \times (1092 - 1093) \times (1094 - 1095) \times (1096 - 1097) \times (1098 - 1099) \times (1100 - 1101) \times (1102 - 1103) \times (1104 - 1105) \times (1106 - 1107) \times (1108 - 1109) \times (1110 - 1111) \times (1112 - 1113) \times (1114 - 1115) \times (1116 - 1117) \times (1118 - 1119) \times (1120 - 1121) \times (1122 - 1123) \times (1124 - 1125) \times (1126 - 1127) \times (1128 - 1129) \times (1130 - 1131) \times (1132 - 1133) \times (1134 - 1135) \times (1136 - 1137) \times (1138 - 1139) \times (1140 - 1141) \times (1142 - 1143) \times (1144 - 1145) \times (1146 - 1147) \times (1148 - 1149) \times (1150 - 1151) \times (1152 - 1153) \times (1154 - 1155) \times (1156 - 1157) \times (1158 - 1159) \times (1160 - 1161) \times (1162 - 1163) \times (1164 - 1165) \times (1166 - 1167) \times (1168 - 1169) \times (1170 - 1171) \times (1172 - 1173) \times (1174 - 1175) \times (1176 - 1177) \times (1178 - 1179) \times (1180 - 1181) \times (1182 - 1183) \times (1184 - 1185) \times (1186 - 1187) \times (1188 - 1189) \times (1190 - 1191) \times (1192 - 1193) \times (1194 - 1195) \times (1196 - 1197) \times (1198 - 1199) \times (1200 - 1201) \times (1202 - 1203) \times (1204 - 1205) \times (1206 - 1207) \times (1208 - 1209) \times (1210 - 1211) \times (1212 - 1213) \times (1214 - 1215) \times (1216 - 1217) \times (1218 - 1219) \times (1220 - 1221) \times (1222 - 1223) \times (1224 - 1225) \times (1226 - 1227) \times (1228 - 1229) \times (1230 - 1231) \times (1232 - 1233) \times (1234 - 1235) \times (1236 - 1237) \times (1238 - 1239) \times (1240 - 1241) \times (1242 - 1243) \times (1244 - 1245) \times (1246 - 1247) \times (1248 - 1249) \times (1250 - 1251) \times (1252 - 1253) \times (1254 - 1255) \times (1256 - 1257) \times (1258 - 1259) \times (1260 - 1261) \times (1262 - 1263) \times (1264 - 1265) \times (1266 - 1267) \times (1268 - 1269) \times (1270 - 1271) \times (1272 - 1273) \times (1274 - 1275) \times (1276 - 1277) \times (1278 - 1279) \times (1280 - 1281) \times (1282 - 1283) \times (1284 - 1285) \times (1286 - 1287) \times (1288 - 1289) \times (1290 - 1291) \times (1292 - 1293) \times (1294 - 1295) \times (1296 - 1297) \times (1298 - 1299) \times (1300 - 1301) \times (1302 - 1303) \times (1304 - 1305) \times (1306 - 1307) \times (1308 - 1309) \times (1310 - 1311) \times (1312 - 1313) \times (1314 - 1315) \times (1316 - 1317) \times (1318 - 1319) \times (1320 - 1321) \times (1322 - 1323) \times (1324 - 1325) \times (1326 - 1327) \times (1328 - 1329) \times (1330 - 1331) \times (1332 - 1333) \times (1334 - 1335) \times (1336 - 1337) \times (1338 - 1339) \times (1340 - 1341) \times (1342 - 1343) \times (1344 - 1345) \times (1346 - 1347) \times (1348 - 1349) \times (1350 - 1351) \times (1352 - 1353) \times (1354 - 1355) \times (1356 - 1357) \times (1358 - 1359) \times (1360 - 1361) \times (1362 - 1363) \times (1364 - 1365) \times (1366 - 1367) \times (1368 - 1369) \times (1370 - 1371) \times (1372 - 1373) \times (1374 - 1375) \times (1376 - 1377) \times (1378 - 1379) \times (1380 - 1381) \times (1382 - 1383) \times (1384 - 1385) \times (1386 - 1387) \times (1388 - 1389) \times (1390 - 1391) \times (1392 - 1393) \times (1394 - 1395) \times (1396 - 1397) \times (1398 - 1399) \times (1400 - 1401) \times (1402 - 1403) \times (1404 - 1405) \times (1406 - 1407) \times (1408 - 1409) \times (1410 - 1411) \times (1412 - 1413) \times (1414 - 1415) \times (1416 - 1417) \times (1418 - 1419) \times (1420 - 1421) \times (1422 - 1423) \times (1424 - 1425) \times (1426 - 1427) \times (1428 - 1429) \times (1430 - 1431) \times (1432 - 1433) \times (1434 - 1435) \times (1436 - 1437) \times (1438 - 1439) \times (1440 - 1441) \times (1442 - 1443) \times (1444 - 1445) \times (1446 - 1447) \times (1448 - 1449) \times (1450 - 1451) \times (1452 - 1453) \times (1454 - 1455) \times (1456 - 1457) \times (1458 - 1459) \times (1460 - 1461) \times (1462 - 1463) \times (1464 - 1465) \times (1466 - 1467) \times (1468 - 1469) \times (1470 - 1471) \times (1472 - 1473) \times (1474 - 1475) \times (1476 - 1477) \times (1478 - 1479) \times (1480 - 1481) \times (1482 - 1483) \times (1484 - 1485) \times (1486 - 1487) \times (1488 - 1489) \times (1490 - 1491) \times (1492 - 1493) \times (1494 - 1495) \times (1496 - 1497) \times (1498 - 1499) \times (1500 - 1501) \times (1502 - 1503) \times (1504 - 1505) \times (1506 - 1507) \times (1508 - 1509) \times (1510 - 1511) \times (1512 - 1513) \times (1514 - 1515) \times (1516 - 1517) \times (1518 - 1519) \times (1520 - 1521) \times (1522 - 1523) \times (1524 - 1525) \times (1526 - 1527) \times (1528 - 1529) \times (1530 - 1531) \times (1532 - 1533) \times (1534 - 1535) \times (1536 - 1537) \times (1538 - 1539) \times (1540 - 1541) \times (1542 - 1543) \times (1544 - 1545) \times (1546 - 1547) \times (1548 - 1549) \times (1550 - 1551) \times (1552 - 1553) \times (1554 - 1555) \times (1556 - 1557) \times (1558 - 1559) \times (1560 - 1561) \times (1562 - 1563) \times (1564 - 1565) \times (1566 - 1567) \times (1568 - 1569) \times (1570 - 1571) \times (1572 - 1573) \times (1574 - 1575) \times (1576 - 1577) \times (1578 - 1579) \times (1580 - 1581) \times (1582 - 1583) \times (1584 - 1585) \times (1586 - 1587) \times (1588 - 1589) \times (1590 - 1591) \times (1592 - 1593) \times (1594 - 1595) \times (1596 - 1597) \times (1598 - 1599) \times (1600 - 1601) \times (1602 - 1603) \times (1604 - 1605) \times (1606 - 1607) \times (1608 - 1609) \times (1610 - 1611) \times (1612 - 1613) \times (1614 - 1615) \times (1616 - 1617) \times (1618 - 1619) \times (1620 - 1621) \times (1622 - 1623) \times (1624 - 1625) \times (1626 - 1627) \times (1628 - 1629) \times (1630 - 1631) \times (1632 - 1633) \times (1634 - 1635) \times (1636 - 1637) \times (1638 - 1639) \times (1640 - 1641) \times (1642 - 1643) \times (1644 - 1645) \times (1646 - 1647) \times (1648 - 1649) \times (1650 - 1651) \times (1652 - 1653) \times (1654 - 1655) \times (1656 - 1657) \times (1658 - 1659) \times (1660 - 1661) \times (1662 - 1663) \times (1664 - 1665) \times (1666 - 1667) \times (1668 - 1669) \times (1670 - 1671) \times (1672 - 1673) \times (1674 - 1675) \times (1676 - 1677) \times (1678 - 1679) \times (1680 - 1681) \times (1682 - 1683) \times (1684 - 1685) \times (1686 - 1687) \times (1688 - 1689) \times (1690 - 1691) \times (1692 - 1693) \times (1694 - 1695) \times (1696 - 1697) \$

Concours mandarinaux

Un détail m'intrigue dans la première illustration de l'article de Rainier Lanselle sur les concours mandarinaux (voir *Pour la Science*, décembre 1997), en haut à droite («la tablette dorée sur laquelle les examinateurs inscrivaient les admis au concours mandarinaux suprême»). Les noms des admis sont tous des transcriptions de noms chrétiens, qui plus est à consonance portugaise (ou italienne ?). On reconnaît, par exemple, de gauche à droite, dans la partie supérieure du disque, Marco, Filippo, Paulo, Francisco, Domingo, etc. Quelle est l'origine de cette tablette ?

Fabien BESNARD, Paris

Réponse de Rainier Lanselle

L'illustration a été tirée de l'ouvrage du père jésuite Étienne Zi, *Pratique des examens littéraires en Chine* (dont les références figurent dans l'article). On peut supposer qu'il a retenu les noms d'un certain nombre de ses propres catéchumènes, des Chinois. En tant que baptisé, ceux-ci s'étaient attribués des noms chrétiens, comme c'est toujours la coutume lorsqu'un Chinois reçoit le baptême. Il n'y avait bien sûr aucun empêchement pour que des Chinois chrétiens se présentent à l'examen sous le nom de baptême qu'ils s'étaient choisi – leur foi, en retour, n'ayant aucune incidence sur l'examen officiel qu'ils subissaient. Les «querelles des rites chinois» du XVIII^e siècle laissèrent toutefois aux chrétiens chinois et, en particulier, à leurs pasteurs, la pénible impression d'être soupçonnés d'hésitation entre leur foi et les caractéristiques propres à leur nation ; par ailleurs, ces mêmes chrétiens chinois étaient souvent perçus, par leurs compatriotes et par les Occidentaux, comme une population déclassée, attirée surtout par les avantages matériels qu'offraient les missions. Quand ce n'était pas déloyal vis-à-vis de sa propre tradition nationale. Ce jésuite chinois souhaitait peut-être montrer que des lettrés, candidats aux concours impériaux, pouvaient être en même temps d'authentiques chrétiens, mais aussi, à l'inverse, que des chrétiens pouvaient être de vrais lettrés.

Modification et amélioration

Dans l'encadré *Pruniers et virus* (voir *Le riz génétiquement modifié*, *Pour la Science*, janvier 1998), Michel Ravelonandro écrit que l'autorisation de la culture de maïs génétiquement modifié prouve que

«les autorités ont accepté l'application du génie génétique pour l'amélioration des plantes». La modification des plantes est-elle toutefois réellement une amélioration de celles-ci ?

Francis GLANE, Voiron

Réponse de Michel Ravelonandro

Les sociétés agricoles primitives vivent principalement de profits issus de l'agriculture sans soucier des problèmes environnementaux : quand la terre ne produit plus, l'homme abandonne le site et en colonise un autre. Au contraire, l'agriculteur qui vit dans un pays industrialisé ne peut pas abandonner sa terre, et il doit affronter des problèmes environnementaux, tels que les ravageurs parasites, qui causent des dégâts considérables, ou les compétiteurs nuisibles («mauvaises herbes»), dont le coût d'élimination est élevé.

Le chercheur peut aider l'agriculteur à résoudre ces problèmes. L'intervention est toujours précise : si une plante a besoin d'être protégée contre un parasite identifié ou manque d'une propriété physiologique quelconque, le biologiste s'attaquera spécifiquement à ce problème. Son intervention ne peut donc être que bénéfique pour la plante qui a été génétiquement modifiée, car celle-ci dispose d'un caractère nouveau qui lui permet de résister à des agressions, par exemple, et surtout pour l'agriculteur qui l'exploite.

Espérance et décision

L'article de Christian Walter *La grande peur de l'inconnu* (voir *Pour la Science*, janvier 1998) révèle le caractère non rationnel de certaines décisions, qui ne reposent pas sur l'espérance mathématique des gains. L'espérance est-elle un bon critère de décision ? Quand une situation est répétée un grand nombre de fois, l'espérance se confond avec la moyenne des gains : c'est la loi des grands nombres. Que signifie l'espérance dans une situation qui ne se présente qu'une fois ? Considérons le situation du joueur de Loto. Si l'on juge la rationalité de la décision par l'espérance, alors jouer est irrationnel puisque l'espérance de gain est négative. En revanche, l'espérance est concrète pour l'État (ou la Française des jeux) : c'est la recette engrangée à la fin de l'année. Pour un joueur occasionnel, l'espérance a-t-elle une signification ?

Emmanuel GRENIER, Beauvais

Réponse de Christian Walter

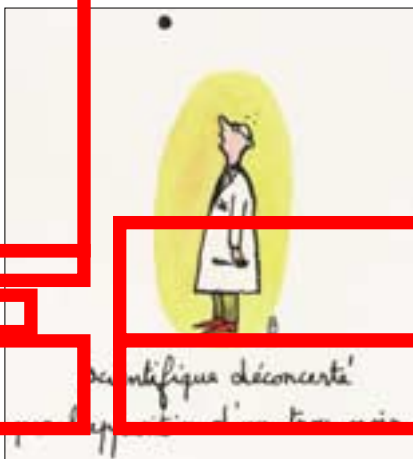
La rationalité de la décision n'est pas liée à l'espérance, mais à l'indépendance des préférences par rapport au montant des gains

(axiome de Savage). Le paradoxe d'Allais porte sur la violation de cet axiome et non sur l'usage de l'espérance mathématique. La question de la signification de l'espérance mathématique dans des situations de jeu à un seul tirage renvoie à la controverse sur l'usage des probabilités subjectives dans la théorie des jeux.

Classiquement, on distingue l'approche probabiliste objective, ou fréquentiste, de type Bernoulli, qui a été reprise par la physique (application des lois des grands nombres et théorie des erreurs de mesure), et la conception subjective de la probabilité, introduite par Pascal pour la résolution du problème des partis, et reprise par Finetti, et Savage, puis par Von Neumann et Morgenstern : cette approche a, dès son introduction, fait l'objet de violentes controverses, mais même que la notion de fréquence n'existait pas encore. La question de la pertinence de l'espérance mathématique dépasse donc la seule applicabilité d'une loi des grands nombres. Toutefois, il est vrai que, dans le cas des jeux comme le loto, l'organisateur du jeu applique une loi des grands nombres, donc une probabilité objective.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique. Courriel électronique : 1016413525@compuserve.com. Retrouvez la Tribune sur l'Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>

Erratum



Dans l'édition spéciale consacrée aux «TROUS NOIRS», publiée le 11 juillet 1997, nous avons malencontreusement reproduit en page 6, une carte postale intitulée «LE TROU NOIR».

Nous vous informons que cette carte créée par Monsieur Jean-Vincent SÉNAC, est éditée par la société HISTOIRE DE VOIR.



Les biotechnologies

PIERRE TAMBOURIN

En France, les industries biotechnologiques restent très insuffisamment développées.

Les chiffres sont éloquentes : au cours des 20 dernières années, moins d'une centaine de sociétés de biotechnologies se sont créées en France... contre plus de 1 300 aux États-Unis, 4 000 emplois directs contre 150 000 ! Pourquoi l'industrie américaine a-t-elle, mieux que l'industrie française, su profiter des bouleversements de la biologie ? Comment les États-Unis ont-ils réussi à créer un tel tissu industriel, source de richesses, d'emplois, et aussi, et on l'oublie trop souvent, de nouvelles connaissances fondamentales ?

Les raisons économiques ont été souvent évoquées. Notre pays a toujours pratiqué le capital-risque avec parcimonie, par manque de moyens financiers et de culture en ce domaine : le chercheur qui avait besoin de capitaux pour créer une société s'adressait aux banques, qui réclamaient des dossiers solides, démontrant un risque à sens unique. Ce n'est évidemment plus du capital-risque !

Aux États-Unis, le système bancaire a compris que l'intérêt à long terme passe, dans ce domaine, dans le financement de très nombreuses sociétés de petite taille, créées parfois sur des idées insolites, mais dont les retombées attendues, ne serait-ce que de quelques-unes d'entre elles, sont immenses.

À quelques exceptions près, l'industrie française, de son côté, commence seulement à intégrer dans sa stratégie les progrès et les enjeux des biotechnologies, de la génomique et de la génétique, notamment. Après un engouement excessif et passager dans le début des années 1980, les groupes français (et européens) les plus importants avaient considérablement réduit leurs ambitions biotechnologiques, tandis que l'industrie pharmaceutique française ne faisait qu'une trop lente mutation de la chimie à la biologie. L'agro-alimentaire, enfin, reste encore, dans son ensemble, bien hésitant. Mais des semenciers comme Limagrain semblent avoir compris l'enjeu mondial des biotechnologies.

La recherche publique française, de son côté, dont tout le monde s'accorde pour reconnaître la qualité au plan international, paraît, de ce point de vue, engoncée dans une culture surannée. Les

jeunes chercheurs sont restés sur leur seule qualité : le talent. Ils ont des connaissances dans une atmosphère de désintéressement financier personnel dont ils sont fiers. Leur statut, et plus encore celui des organismes qui les emploient, sont en partie inadaptés au transfert industriel.

Les règles tatillonnes, l'inexpérience, les mentalités qui se drapent très vite dans un manteau de vertu, sont autant d'entraves. Combien de chercheurs qui, obéissant aux recommandations, et qui, disposant d'un résultat intéressant et d'une idée originale, ont voulu valoriser ce résultat se sont jurés qu'on ne les y reprendrait plus ?

Ne nous fondons pas le haut fonctionnaire qui « fantoufle » dans l'industrie, où sa compétence et son carnet d'adresses lui servent à la fois de passeport et justifient un salaire intéressant, avec le chercheur qui veut rester dans son laboratoire tout en aidant la création d'une entreprise dont il tirerait quelques éventuels avantages pour sa recherche. Notre système cultivé depuis des décennies, mais que l'on ne peut pas à la fois faire une recherche fondamentale de haut niveau et avoir des préoccupations plus finalisées ou plus appliquées. S'il est probablement exact qu'une seule et même personne peut difficilement mener de front ces deux activités, on doit comprendre et admettre que cela doit se pratiquer à des moments successifs.

Comment rattraper le retard ? Il me semble qu'il faut mener d'urgence une action à trois niveaux. On devrait d'abord réfléchir en profondeur certains aspects du statut des chercheurs et certaines règles de la fonction publique qui s'appliquent à eux. Ils sont aujourd'hui des fonctionnaires, astreints au respect de règles certainement légitimes lorsqu'il s'agit de fonctionnaires qu'il faut protéger des sources de corruption. Les affaires qui ont entaché le monde politique ces dernières années et certaines autres dans le monde industriel, jointes à quelques anomalies dans le fonctionnement d'organismes d'État ou nationalisés, démontrent qu'il faut rester vigilant, mais tout est question d'adaptation et d'état d'es-

prit. En tout cas, on ne peut pas dire, en France, aux chercheurs : « Valorisez vos résultats », tout en les suspectant et en les culpabilisant. Mon devoir de réserve m'empêche de citer des exemples probants, mais je demande que l'on me croie lorsque j'affirme que les obstacles encouragent les chercheurs à rester tranquillement dans les laboratoires, où la publication de bons articles dans de bonnes revues paraît beaucoup plus simple et plus gratifiant que l'aventure industrielle.

Le gouvernement précédent avait réfléchi et préparé des textes de loi pour que les chercheurs puissent jouer un rôle plus actif dans la création d'entreprises. Souhaitons qu'après des corrections et des améliorations, ils soient adoptés le plus rapidement possible par la représentation nationale. Modifions aussi, en profondeur, le statut des organismes, afin que l'administration ne soit pas contrainte de s'ériger, en permanence, en gardien du temple face aux initiatives des chercheurs. Je ne propose pas d'initier en France un système à l'américaine. En revanche, si nous voulons garder notre spécificité et nos valeurs, évoluons en nous adaptant.

Enfin, Claude Allègre l'a maintes fois répété, nous devons nous préoccuper de l'emploi des jeunes chercheurs. Ils ont, en général, une grande dégratée méconnaissance de ce qu'est le monde industriel (au moins en sciences de la vie). Aucun jeune chercheur ne devrait ignorer ce qu'est un brevet, une licence, un minimum de droits des sociétés, ce qu'est la valorisation d'un résultat, nous devrions aussi, au cours de ces périodes de formation, repérer ceux qui ont l'esprit d'entreprise au sens propre comme au sens figuré.

Retenons et appliquons la leçon d'Antoine de Saint-Exupéry : « Si tu veux bâtir un navire, ne te fais pas de plans, ne recrute pas du bois, délégue des fonctions et distribue les travaux, apprends leur plutôt le désir de la mer insolite. »

Pierre TAMBOURIN a dirigé le Département des Sciences de la vie au CNRS. Il est aujourd'hui chargé de mission au Génomole d'Évry.

Scala/Art Resource

Le rouet des armes à feu

VERNAUD POLET

Léonard de Vinci a-t-il inventé le rouet, un dispositif efficace de mise à feu ? Certains historiens sont affirmatifs ; pour d'autres, le rouet serait d'origine allemande.

Combien de réalisations inspirées des dessins de Léonard de Vinci ont-elles été réalisées au cours des 67 années de sa vie (1452-1519) ? Ses carnets de notes sont couverts de dessins : sont-ils des inventions ou des reproductions d'objets contemporains ? Lors de la première publication des manuscrits de Léonard de Vinci, à la fin des années 1800, les lecteurs découvrirent des pages entières d'« inventions », mais, au milieu du ^{xx}e siècle, les historiens ont montré que Léonard de Vinci s'est beaucoup inspiré des manuscrits de la Renaissance, antérieurs aux siens, et qu'il les a souvent copiés. Aujourd'hui, les historiens admettent que la science de Léonard en matière militaire n'était pas en avance sur son temps, et qu'à l'exception de la machine à polir les miroirs et de quelques machines à fabriquer les textiles, toutes les « inventions » techniques de Léonard de Vinci ont été empruntées à des devanciers ou à des contemporains. En ce qui concerne le rouet des armes à feu, deux thèses s'affrontent, l'une accordant la paternité du rouet à Léonard de Vinci, l'autre accreditant l'origine allemande de ce mécanisme.

Le rouet est l'adaptation aux armes du procédé de mise à feu utilisé dans les briquets ; ce procédé est employé dès l'époque médiévale par les artisans serruriers. Du temps de Léonard de Vinci,

le rouet est surtout utilisé sur les petites armes, notamment sur les armes portatives. Ces armes ont trois parties : le rouet, le fût et le canon. Le long canon cylindrique renferme la poudre et la balle. Le rouet est monté à l'arrière du canon et le fût en bois solidarise ces deux pièces.

Comme fonctionne le rouet ? Il est formé d'une roue en acier dont l'axe est relié à un puissant ressort par une chaîne plate. Au moyen d'une clé, on remonte l'axe qui entraîne la chaîne, laquelle s'enroule sur l'axe et tend le ressort. Lorsque l'ensemble est sous tension (le rouet a fait trois quarts de tour), on le verrouille : sur la gâchette, un ergot s'encastre dans un trou percé dans le rouet.

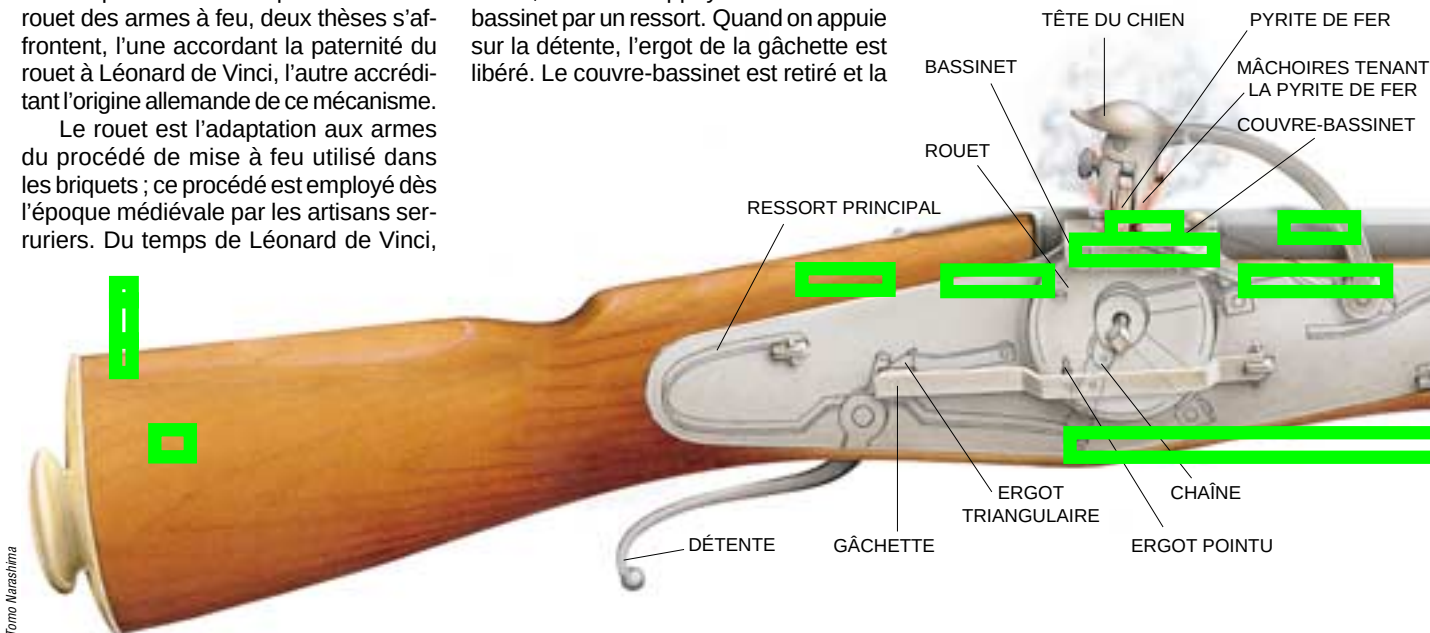
Le « couvre-bassinnet », un petit couvercle coulissant recouvre le réservoir de poudre, le bassinnet. Il évite que la poudre ne soit mouillée par la pluie ou qu'une manipulation involontaire n'y mette le feu. La tête du chien tient entre ses mâchoires un morceau de pierre dure, de la pyrite de fer, maintenu appuyé sur le couvre-bassinnet par un ressort. Quand on appuie sur la détente, l'ergot de la gâchette est libéré. Le couvre-bassinnet est retiré et la

pyrite tombe sur la tranche du rouet. La roue, mise en mouvement par le ressort qui se détend, se met à tourner en frottant contre la pyrite. Le bord supérieur de la roue passe dans une mince fente percée dans le fond du bassinnet. Une pluie d'étincelles enflamme la poudre et amorce.

LA CONTROVERSE

Des historiens ont déduit des croquis du *Codex Atlanticus*, un recueil de manuscrits conservés à Milan, que Léonard de Vinci a inventé le rouet des armes à feu, mais d'autres réfutent cette affirmation, car, prétendent-ils, les premiers rouets auraient été fabriqués plus au nord, dans ce qui est aujourd'hui l'Allemagne. Léonard de Vinci aurait dessiné sa propre version du rouet après avoir eu connaissance de l'invention allemande.

Les premières illustrations allemandes de rouets datent du début du ^{xvi}e siècle



Tomo Narashima

et ressemblent aux croquis de Léonard de Vinci ; la datation des textes relatifs aux platines à rouet ou des rares armes à feu qui nous sont parvenues n'est pas très précise et il est difficile de trancher sur l'origine allemande ou italienne du rouet.

Pour le savoir, j'ai analysé la mécanique des tout premiers rouets, et j'ai étudié la forme des différentes pièces. J'en ai conclu que Léonard de Vinci avait utilisé des éléments d'autres machines sur lesquelles j'avais travaillé dans les années 1480 et 1490 (notamment des loquets) et qu'il les avait assemblés d'une façon inédite pour créer le rouet des armes à feu, vers 1493.

Observons une page du *Codex Atlanticus*. On y voit (voir la figure 2) des croquis de chaînes et de ressorts présents dans les rouets des armes à feu. Selon les spécialistes de Léonard de Vinci, ces schémas prouvent qu'il connaissait le dispositif. Des ciseaux à bois en forme de «V» ont également été représentés ; apparemment, Léonard de Vinci cherchait à s'en inspirer pour fabriquer des ciseaux qui découperaient le métal.

Ces ciseaux sont intéressants : leur pointe en V aurait dessiné une rainure sur la tranche d'une roue d'acier. Les premiers rouets avaient précisément plusieurs rainures de ce type sur la tranche. Ils avaient aussi une seconde série de très fines rainures faites à la lime, perpendiculaires aux filets courant le long de la tranche et espacées de façon à former un ensemble de dents semblables

à celles d'une scie circulaire. Cette structure paraît d'une complexité excessive, car chaque dent des rainures aurait dû être taillée dans le fond du bassinnet (pour que le rouet glisse sans frottements) et les rainures transversales auraient risqué de gêner le chauffage de la poudre et, donc, la mise à feu.

Toutefois, j'ai compris l'avantage des rainures transversales lorsque j'ai essayé quelques rouets d'armes à feu : je me suis aperçu que les dents jouent effectivement le rôle d'une scie circulaire à métal. La roulette découpe elle-même la fente dans le fond du bassinnet à poudre et assure ainsi un ajustage très précis. Un tel ajustage est indispensable, car la poudre, très fine, s'échapperait par le moindre interstice lors de la manipulation ou du transport de l'arme. Bien que les scies du ^{xv}e siècle aient été lentes, il fallait plusieurs heures pour accomplir les tâches que les outils de coupe modernes exécutent en quelques secondes. Leur précision était excellente (avec une marge d'erreur de 0,3 millimètre environ). Avant cette découverte, on pensait que les scies circulaires en métal avaient été utilisées pour la première fois dans les années 1540, c'est-à-dire bien après la mort de Léonard de Vinci.

À l'évidence, Léonard de Vinci qui travaillait sur les ressorts, les chaînes et les ciseaux connaissait les différentes pièces des rouets d'armes à feu. Reste toutefois la question : les a-t-il assemblées pour inventer le rouet ? En 1493,

Léonard de Vinci prend son service Giulio Tedesco, aussi connu sous le nom de Giulio le Germain, ce qui signifie pendant plusieurs années comme technicien chez Léonard de Vinci, à Milan. On ignore la date exacte à laquelle Giulio quitte Milan, mais c'est probablement avant 1500. Giulio est un spécialiste des loquets et des mécanismes à ressorts, tels que les arbalètes et les cisailles.

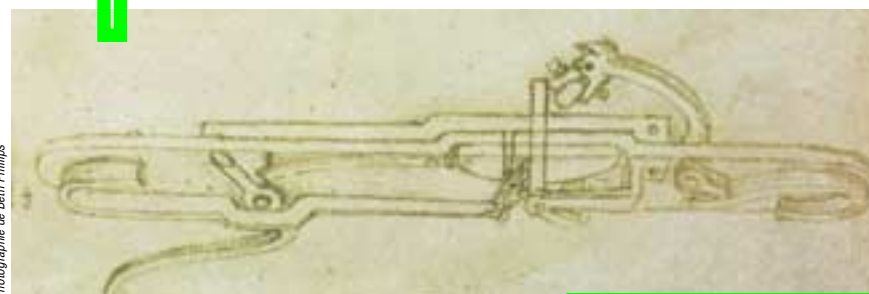
LE RÔLE DE GIULIO TEDESCO

Les dessins de Léonard de Vinci de cette époque relatifs aux loquets destinés à fermer les portes ou les coffres, contiennent des éléments proches de ceux du rouet d'arme à feu. Ainsi, le rouet aurait été mis au point par Léonard de Vinci en collaboration avec Giulio Tedesco, au milieu des années 1490. De surcroît, Giulio Tedesco aurait emporté l'invention du rouet quand il quitta Léonard de Vinci pour rejoindre son pays d'origine, ce qui expliquerait comment le dispositif aurait atteint l'Europe du Nord au début des années 1500.

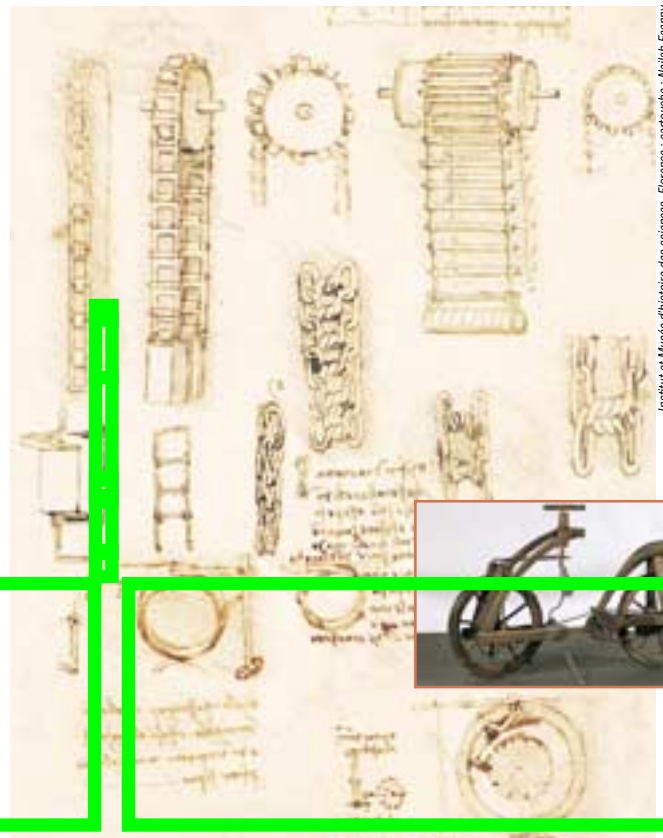
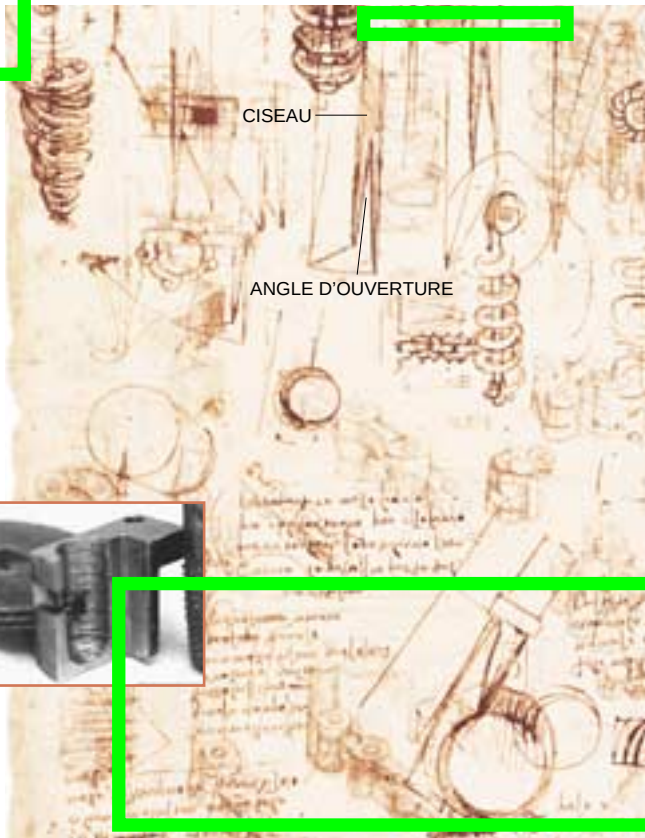
L'historien Claude Dhal a aussi découvert des preuves que Léonard de Vinci a inventé le rouet des armes à feu. Il a montré qu'à Cividale, dans la région du Frioul, au Nord de l'Italie, la fabrication de rouets pour les armes à feu a commencé avant 1510. Or, avant 1500, Léonard de Vinci a travaillé pendant quelque temps dans le Frioul, surveillant la construction des fortifications de divers châteaux.

Toutefois, d'autres historiens, notamment Marco Morini, un spécialiste vénétien des armes anciennes, réfutent tous les arguments des tenants de l'origine italienne, montrant que les armes décrites dans les différents recueils de Léonard de Vinci ne sont pas originales. Le rouet aurait été inventé en Allemagne, qui avait une longue tradition de la manufacture des armes. La fabrication de ce mécanisme n'aurait commencé en Italie du Nord

Photographie de Beth Phillips



1. LE DESSIN D'UN ROUET d'arme à feu, figurant dans le *Codex Atlanticus* de Léonard de Vinci, montre une coupe passant par l'axe de la roue (en haut). On remonte la roue de trois quarts de tour, au moyen d'une clé. Une courte chaîne plate de transmission est fixée, à une extrémité, sur l'axe de la roue et, à l'autre extrémité, à un puissant ressort. Quand on remonte le mécanisme, la chaîne s'enroule autour de l'axe et elle tend ce ressort. Lorsque le système est sous tension, un cliquet situé sur la gâchette se loge dans un trou percé dans la roue. Puis on abaisse le chien du fusil, et le morceau de pyrite de fer fixé dans les mâchoires appuie sur la roue. Quand on appuie sur la détente, le cliquet sort de son logement, ce qui libère le ressort et, par conséquent, la roue. Cette dernière tourne rapidement, frotte sur la pyrite de fer, ce qui produit des étincelles, enflamme la poudre et fait partir le projectile.



Institut et Musée d'histoire des sciences, Florence ; cartouche : Nijliah Ramny



2. DES CROQUIS (à gauche) du Codex Atlanticus montrent deux types de pièces d'un rouet d'arme à feu : des ressorts hélicoïdaux et des chaînes de transmission plates à peine visibles, dessinées au verso et dont l'encre a traversé le papier. Les ressorts hélicoïdaux semblent avoir intéressé Léonard de Vinci pour leur utilisation dans un rouet à feu, que les ressorts à lames utilisés à cette époque. Dans le haut de la page, Léonard de Vinci a dessiné une série de ciseaux en forme de V, dont l'angle d'ouverture s'élargit de droite à gauche (Léonard de Vinci était gaucher et écrivait de droite à gauche). En bas à droite, le ciseau est représenté incliné le long d'un cercle, probablement la tranchée d'un

rouet d'arme à feu. L'auteur a utilisé de tels ciseaux pour creuser les rainures observées sur la tranchée des premiers rouets d'arme à feu (voir le cartouche de gauche). Les engrenages et les chaînes extraits du Codex Madrid (à droite) ressemblent beaucoup aux chaînes reliant l'axe et le ressort principal d'un rouet d'arme à feu. Des pièces de bicyclette figurent parmi les schémas de rouets. Un prototype de bicyclette (voir le cartouche de droite) a récemment été construit avec diverses pièces décrites dans les carnets de notes de Léonard de Vinci : le système de direction et les freins (au bas de la page). Ces derniers fonctionnent comme des freins à rétropédalage.

qu'après 1550, époque où l'industrie des armes, à Nuremberg et à Augsbourg, était déjà florissante.

DES LOQUETS AUX ROUETS

En recherchant l'origine du rouet pour les armes à feu, j'ai aussi découvert comment Léonard de Vinci empruntait des éléments aux machines existantes pour les réarranger et créer de nouveaux instruments. Ce procédé apparaît clairement lorsque l'on étudie les croquis de ses loquets de portes.

Pour ouvrir ses loquets de coffres et de portes et vaincre la pression des puissants ressorts qui les maintenaient fermés, Léonard de Vinci utilise parfois des clés qui servent à comprimer les ressorts du loquet. Ces clés ont souvent la forme d'un écrou papillon, les ailes étant généralement perforées. Sur certains des tout premiers rouets, de telles clés sont fixées à la roue et servent à armer le mécanisme. Les loquets de portes et les rouets d'armes à feu de Léonard de Vinci se res-

semblent sur un autre point : la présence d'un over de verrouillage qui maintient le ressort sous tension. Sur les dessins de Léonard de Vinci, les leviers des loquets de portes et des rouets d'arme à feu sont constitués d'une barre (la gâchette, dans les armes à feu) pourvue, d'un côté, d'un ergot triangulaire et, d'autre part, d'une petite tige métallique, qui bloque le mécanisme quand il est sous tension (voir la figure 1).

Le rouet n'a pas évité tous les accidents lors du maniement des armes à feu. La première décharge accidentelle d'une arme à feu (la première que l'on connaisse) eut lieu en 1515, à Constance, en Allemagne, l'incident fut rapporté par Wilhelm Rem, un écrivain allemand. Un dénommé Laux Pfister avait invité une prostituée et « quand elle fut avec lui dans une petite pièce, il prit l'arme chargée, dont la mise à feu était automatique ». Pfister s'amusait avec l'arme lorsque la balle partit et traversa le menton de la jeune femme. Il fut condamné à lui payer les frais médicaux et une pension annuelle à vie.

Malgré de tels incidents, l'invention du rouet pour les armes à feu fut une réalisation essentielle. Les fusils à mèche nécessitent des sources de chaleur externes, telles que des braises incandescentes ou des mèches enflammées pour la mise à feu de la poudre. Après l'invention du rouet, les armes à feu pouvaient être dissimulées, tout en restant prêtes à être utilisées sans que l'on n'ait à enflammer de mèche. Ce progrès technique allait modifier à jamais la place des armes à feu dans la société.

Le nombre croissant d'armes à rouet brandies par les bandits de grands chemins et autres brigands amena les autorités à interdire leur fabrication. Cependant, ni les fabricants ni les utilisateurs d'armes ne respectèrent ces lois, et les efforts déployés pour contrôler l'usage des armes à feu furent sans effet.

Vernard FOLEY est professeur d'histoire des sciences et des techniques à l'Université Purdue.

Le rôti de bœuf

HERVÉ THIS

Il doit reposer après la cuisson, de sorte que le jus qui a été conservé en son centre se répartisse dans la périphérie asséchée.

Les cuisiniers modernes sont souvent pressés, mais leur hâte les empêche de manger de bons rôts de bœuf : ils omettent souvent, après la cuisson, un indispensable repos de la viande, à la bouche du four entrouvert. Sans cet intermède, leur viande est sèche, dure... Les bons professionnels savent mieux, que le repos de la viande est indispensable pour que la viande soit tendre, mais ils expliquent que le jus «voudrait échapper» à la chaleur du four, de sorte qu'il refluerait vers le cœur du morceau. Est-ce vraisemblable ?

Analysons la cuisson du rôti avec l'œil froid et calme du physico-chimiste. Celui-ci sait que la viande est composée de cellules, les fibres musculaires, sacs limités par une membrane et dont le milieu intérieur, essentiellement aqueux, contient des molécules qui assurent le métabolisme et la contraction ; ces cellules sont gainées de collagène, regroupées en faisceaux, eux-mêmes regroupés en faisceaux. Naturellement cette description est simplifiée : le muscle animal contient également de la matière grasse, du sang, etc.

Comment cette structure réagit-elle quand on la chauffe ? Comme la chaleur s'introduit dans un rôti par conduction, à partir d'air chauffé par le four à une température de 200 °C environ, l'eau est évaporée de la couche externe, jusqu'à une profondeur où la température est égale à 100 °C ; cette couche complètement asséchée, croustillante, est mince. Plus au centre, la température de chaque point augmente lentement lors de la cuisson,

et la structure de la viande se transforme par étapes, car les diverses protéines de la viande coagulent à des températures différentes. Par exemple, à partir de 70 °C, la myoglobine, qui transporte l'oxygène dans le sang, est oxydée : le fer ferreux qu'elle portait se transforme en fer ferrique, de sorte que la viande vire au rose. Puis vers 80 °C, les parois cellulaires sont rompues, ce qui met en contact la myoglobine avec des composés oxydants et fait virer la couleur au brun.

Les sang peut-il refluer vers le cœur du rôti ? Dès qu'une température de 50 °C est atteinte dans la couche périphérique, le collagène se contracte, expulsant le jus vers l'extérieur du rôti, et aussi vers l'intérieur. Toutefois, les rôts sont composés de liquides et de solides quasi incompressibles, ne peut refluer le jus. Ceux qui ont l'habitude de cuire des rôts de bœuf, en pesant les morceaux et en déterminant leur masse volumique (on déterminera leur volume en les plongeant dans de l'eau et en pesant la masse d'eau déplacée) avant et après la cuisson.

Ces mesures sont révélatrices. Tout d'abord, on constate qu'un rôti perd, par exemple, rétrécit et perd jusqu'à un sixième de son poids, lors d'une cuisson classique ! Cette perte résulte de l'éjection du jus, chassé par la contraction du collagène, ainsi que de l'évaporation d'eau périphérique. Profitons de l'occasion pour signaler que cette observation abat la

théorie de la cautérisation, qui stipule que la surface coagulée des viandes s'oppose à la perte du jus interne. Au XIX^e siècle, l'auteur anonyme de l'ouvrage intitulé *Le cuisinier modèle* indique par exemple : «Mettez le rôti à la broche devant un feu très vif, afin de saisir et de resserrer les pores de la viande, qui conserve ainsi son jus». De même, Auguste Escoffier écrit dans *Le guide culinaire* que le broilage «a pour but de former autour de la pièce une sorte de cuirasse qui empêche les sucs intérieurs de s'échapper trop tôt, ce qui transformerait le rôti en bouilli». D'une part, la notion de «pores» de la viande n'a pas de réalité anatomique et, d'autre part, les mesures de rôts montrent que la perte de jus augmente avec la cuisson.

Les mesures de masse volumique confirment également que le jus ne reflue pas à cœur : la masse volumique du cœur cuit n'est pas significativement différente de celle de la viande crue. C'est l'indication que le cœur n'a pas été modifié lors de la cuisson (ce qui est compréhensible, car le rôti français reste presque cru, à cœur) et aussi que le cœur n'a pas été enrichi par le jus qui provient de la périphérie.

Pourquoi, alors, la viande doit-elle reposer après la cuisson ? Des mesures de cœur et de périphéries de rôts montrent notamment que le cœur cuit perd plus de jus, lors du repos qui suit la cuisson, que les parties périphériques (qui ont été asséchées et ont moins de possibilité de perdre encore leur jus). Ainsi le repos de la viande permet une redistribution des jus du cœur vers la périphérie. Et c'est ainsi que la périphérie regagne de la tendreté.

Une proposition, enfin : puisque la tendreté de la viande dépend de la quantité de jus, pourquoi ne pas réinjecter, à la servinge, le jus qui est sorti du rôti lors de la cuisson ? Salé et poivré, ce jus viendrait donner à la viande un goût qu'elle n'a jamais eu.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 mars 1998, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Les trois zones discernables dans un rôti de bœuf cuit correspondent à des températures différentes atteintes en fin de cuisson : moins de 70 °C à cœur, entre 70 °C et 80 °C pour les zones roses, et plus de 80 °C pour les zones brunes.

Pour identifier le délit d'initié

CHRISTIAN WALTER

L'examen en statistique des gains montre que les initiés connaissent le futur du marché.

Léonard de Solva

L'arrivée d'informations nouvelles sur le marché déclenche les décisions d'achats ou de ventes des titres financiers. Pour que le marché soit un lieu efficace d'échanges, c'est-à-dire pour que les prix reflètent la valeur d'un titre, il faut que toute l'information disponible et pertinente soit intégrée dans les cours. Il faut aussi, pour que le jeu boursier soit équitable, que tous les acteurs puissent avoir accès à la même information. Lorsque ces deux conditions sont réunies, le marché est alors qualifié d'informationnellement efficace.

Certains agents ont accès à une information privilégiée, par exemple la connaissance de la fusion prochaine entre entreprises, ou l'acquisition d'une société par une autre. Quiconque connaît et utilise l'opération projetée gagnera de l'argent sans prendre de risque... C'est l'argent dit facile, parce qu'obtenu sans prise de risque : le « délit d'initié » est condamné par le législateur.

Deux chercheurs du CNRS, Monique Pontier et Michel Berard, ont mis au point un test de détection de délit d'initié dans ce contexte de marché informationnellement efficace, en ajoutant à l'efficacité informationnelle du marché une hypothèse complémentaire : le processus aléatoire qui régit les variations des cours est, pour les acteurs honnêtes, une marche au hasard.

Ainsi, l'approche modélisée de la détection d'un délit d'initié formalise à la fois la notion d'information disponible sur le marché, et les performances des portefeuilles des agents, lesquels ont accès plus ou moins rapidement à différents types d'informations.

L'information diffusée est reçue plus ou moins rapidement par les différents types d'agents. En conséquence, l'ensemble de ces informations disponibles est divisé en quatre sous-ensembles : (1)

l'information relative au seul passé du marché, c'est-à-dire la succession des cours passés cotés ; (2) l'information relative aux résultats des entreprises, publiés dans les bilans et rapports des sociétés, et donc disponibles publiquement ; (3) l'information accessible uniquement aux professionnels des marchés que sont, par exemple, les gérants de portefeuille, et qui inclut toute la documentation que reçoivent ces professionnels ; (4) l'ensemble des informations concernant le futur du marché : c'est l'information des initiés.

Les stratégies de placement optimales diffèrent, selon que l'on est initié ou non. Elles se traduisent par des gains différents. Pour identifier les stratégies incluant des informations sur le futur, on calcule alors, avec le modèle mis au point, les fluctuations de richesse des quatre types d'agents et on cherche s'il existe des performances de portefeuilles supérieures à celles que l'on aurait dû obtenir dans un marché informationnellement efficace.

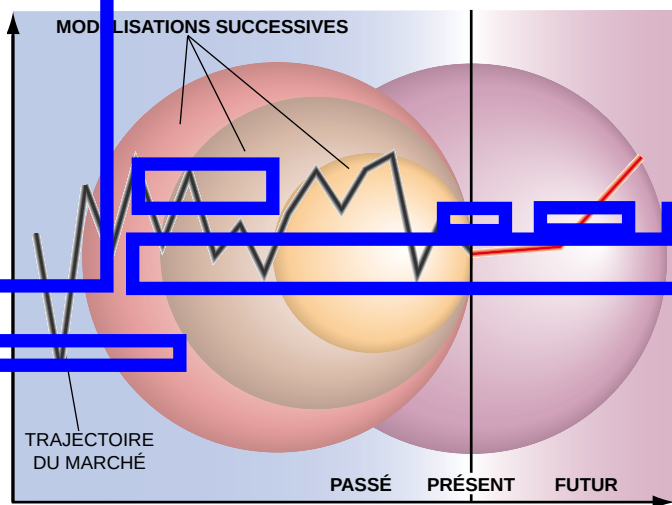
Les équations représentant les variations de richesse s'appuient sur des processus de diffusion de type « marche au hasard ». Quand toute l'information nouvelle est immédiatement intégrée dans

les cours du jour et mesure de son arrivée sur le marché, la seule source de variation des prix est l'élément informationnel nouveau, par définition non prévisible, sauf pour l'initié. En l'absence de délit d'initié, les variations futures des cours sont imprévisibles. Mais certaines caractéristiques des fluctuations de fortune des agents, par exemple la volatilité, c'est-à-dire l'ampleur des fluctuations, dépendent de l'information recueillie.

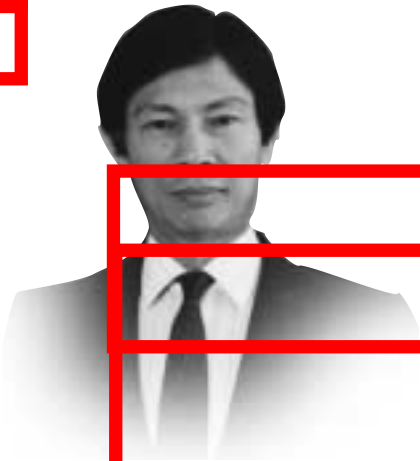
Les fluctuations boursières sont des processus aléatoires de type « marche au hasard ». Cela ne signifie pas que les fluctuations des bourses sont dues au hasard mais que ces variations sont la résultante d'un grand nombre de chocs d'information indépendants immédiatement absorbés. Les agents initiés qui suivent une politique d'investissement optimale par rapport à un ensemble d'information – incluant des informations futures – accèdent à un enrichissement qui peut devenir infini au voisinage de la date publique des opérations financières conclues d'avance.

En 1983, J. M. Suret et E. Cormier, de l'Université de Lausanne, ont construit un observatoire des délits d'initiés analysant l'activité boursière. Quand l'activité de certains acteurs est trop intense, les rentabilités anormales apparaissent. L'étude décrivait des indicateurs de délits d'initiés, et la manière de capter l'information qu'ils recelaient.

On pourrait donc se demander si les agents non initiés n'auraient pas la possibilité d'utiliser l'information des initiés. Si, à partir d'une analyse des couples prix-volumes, c'est-à-dire d'arbitrer le marché en captant l'information des initiés à travers la propre action des initiés sur le marché. En ce cas, le marché serait rendu à nouveau efficace grâce à l'arbitrage des non-initiés...



L'agent initié a une vision vers le futur du marché, alors que les modélisations honnêtes ne peuvent analyser que les fluctuations passées.



La création d'entreprise

LINH NUYEN

En France, beaucoup d'ingénieurs, peu d'entrepreneurs. La société étouffe les vocations.

Les entreprises naissent d'une idée technique : sans innovation, sans percée technologique, il n'est pas de réussite. Toutefois le succès, s'il dépend de ces éléments initiaux rationnels nécessaires, relève aussi de facteurs macro-économiques dont l'entrepreneur n'a pas la maîtrise. La crise actuelle en Asie en est un exemple. La réussite dépend de facteurs hasardeux, que le scientifique, tout au long de ses études, considère comme indésirables. L'esprit entrepreneurial considère que ces risques sont pondérables ou tout au moins croit au vieil adage : qui ne risque rien, n'a rien.

À la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, les entrepreneurs français sont légion : les Eiffel, les Claude, les Citroën, les Renault étaient les Bill Gates de l'époque. Ils n'ont pas eu de continuateurs et la France semble avoir perdu une partie de son esprit d'entreprise. Non que ses scientifiques soient moins inventifs, mais que le contexte socio-économico-politique en France est détestable. À qui la faute ? À personne. À tout le monde.

Des cadres de la nation se préoccupent de ce manque d'initiative. Bel et bon. Mais leur attitude intellectuelle est celle de l'entomologiste qui épingle et décrit les rares cas d'entrepreneurs efficaces et chanceux. Il y a plus d'observateurs que de témoins dans les couloirs des ministères parce qu'il existe plus de candidats à l'ENA que de vocations de patrons de *start up*. Ce conformisme frileux de la société française est révélé par de petits indices : essayez de louer un appartement si vous n'avez pas les émoluments réguliers d'un fonctionnaire !

L'argent n'est pas le moteur premier des scientifiques qui se lancent dans l'aventure industrielle ; la réussite de l'entreprise leur est plus importante. Mais le risque individuel est énorme. Modernes Palissy, les créateurs misent leur vie matérielle, et tous n'ont pas la réussite de l'inventeur des terres cuites émaillées.

La société française n'a pas compris la mutation : elle garde l'image des patrons

exploitant la masse ouvrière. Les entrepreneurs créateurs d'emplois sont les « nouveaux soldats de la République »... et on peut leur louer un appartement sans trop d'intérêt. Pourtant, force est de constater que les bons exemples nous proviennent d'outre Atlantique : nul ne songe à reprocher au Président d'*Intel* de dégager des bénéfices colossaux pour son entreprise et pour lui-même. En France l'argent a une odeur. Nous faisons semblant de ne pas comprendre que l'entreprise naît avec le concours de l'argent et prospère avec l'argent.

Je ne connais pas d'ingénieurs ou de chercheurs suffisamment riches pour financer eux-mêmes la création et l'expansion de leur entreprise. Ils doivent s'adresser au capital-risque, dont le métier est de prendre ces risques financiers dans l'espoir de gagner beaucoup d'argent en cas de succès afin de compenser les échecs. Et, en cas d'échec, l'argent, il faut que d'autres investisseurs rémunèrent les investisseurs. Le marché boursier est alors le seul lieu de compensation.

Heureusement, *Intel*, *Microsoft*... Ils sont tous passés par là, à la satisfaction de tous. L'argent gagné par le capital-risque est réinvesti dans d'autres créations d'entreprises qui engendrent encore plus d'emplois.

Nul n'accepte jamais entièrement les lois du capitalisme et les règles du jeu boursier. L'introduction en Bourse d'une société n'est pas une romance ; présenter un bilan chaque trimestre est astreignant. Pourtant, je ne vois pas d'autre logique que celle qui permet aux individus d'acquiescer de choisir l'entreprise où ils veulent faire fructifier leur épargne. Il n'empêche : nombre de scientifiques et de gouvernants pensent encore qu'en Bourse, on gagne de l'argent « en dormant », en profitant de la sueur des autres...

Les devoirs que l'industriel doit remplir vis-à-vis d'actionnaires anonymes semblent, à beaucoup, moins impératifs que la satisfaction des salariés qui sont

la richesse fondamentale de l'entreprise. Ils n'ont pas compris qu'il faut rémunérer l'argent qui permet à une entreprise de se créer et de prospérer. Les jeunes Américains connaissent mieux les règles du jeu capitaliste, ne serait-ce que par les petits bouts qu'ils font pour gagner de l'argent de poche.

Pour lancer une entreprise, il faut un pôle répulsif et un pôle attractif. Dans mon cas, le pôle répulsif a été le Président de l'entreprise industrielle où j'étais salarié. Celui-ci méprisait par trop la technique qui, pour moi, ingénieur et chercheur, est l'assise d'une entreprise de haute technologie. J'ai relevé le défi. Le pôle positif a été l'émulation : des amis créaient leur entreprise aux États-Unis, des parents et un dynamisme m'a galvanisé.

La question reste posée : comment augmenter la motivation des scientifiques ?

Je ne révois pas, le succès résultera d'un effort patient. Je ne crois guère à l'efficacité des lois incitatrices diverses. J'aurais plus foi en l'émulation créée par des exemples de succès industriels et financiers.

Et si c'était à refaire ? Aurais-je franchi le pas ? Lorsque par orgueil et avec un brin de folie, j'ai lancé mon entreprise, je ne connaissais pas toutes les amourettes que j'avais à affronter. Néanmoins, ayons confiance : les difficultés courantes d'une entreprise se résolvent avec du bon sens et une dose d'humilité. J'ai appris à vendre, à gérer, et je reste convaincu qu'un scientifique, qui a intégré les règles du jeu, fait un bon créateur d'entreprise.

Linh NUYEN, fondateur de la SEMI, est président de la Société Française qui fabrique des transistors à arsénium de gallium, plus rapides et moins « bruyants » que les transistors au silicium. La société a été développée sur la base de techniques qu'il avait mises au point alors qu'il était ingénieur à Thomson-CSF.

Lentille à focale variable

La forme d'une goutte est commandée par la tension électrique.

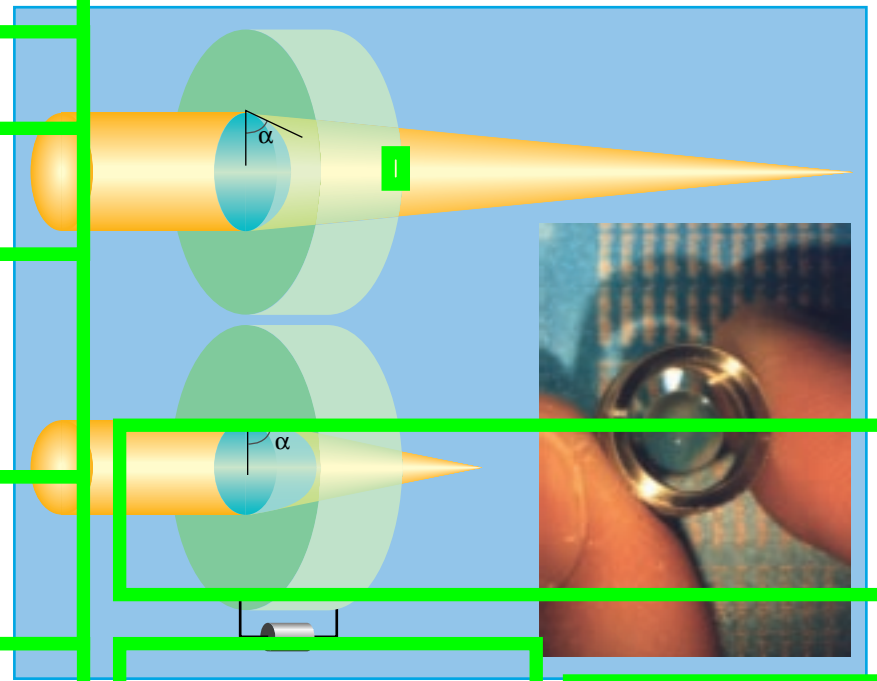
Est-il un phénomène plus familier que l'étalement d'un liquide sur un solide : applications de peinture sur une surface, dépôts d'encre ou de colorants, etc. ? Le liquide s'étale plus ou moins sur le substrat solide en fonction de la tension de surface qui mesure l'attraction des molécules du liquide pour celles du solide.

Cette affinité est modifiée par une différence de potentiel électrique appliquée entre le liquide et le substrat : en 1873, le physicien français Gabriel Lippmann a expliqué la déformation électrostatique d'une goutte de mercure par l'apparition de charges à l'interface du liquide et du substrat.

Aujourd'hui, on amplifie la déformation des gouttes posées sur un isolant en chargeant la goutte électriquement. Nous avons ainsi mis au point une lentille dont la focale varie en fonction de la tension appliquée.

On définit l'étalement d'une goutte sur une surface par l'angle entre la surface et la tangente à la goutte au point de contact (comptée à partir de l'intérieur de la goutte). Pour des surfaces hydrophiles, comme du verre ou du métal, l'étalement d'une goutte d'eau est bon, et l'angle de contact est de quelques degrés. En revanche, lorsque la surface est hydrophobe, comme celle d'une poêle en *Téflon*, les groupes fluorés en surface du *Téflon* ont très peu d'affinité pour les molécules d'eau, de sorte que la tension de surface entre la poêle et la goutte est élevée : la goutte s'étale mal, et l'angle de contact est important, parfois supérieur à 90°.

La variation de cet angle de contact avec la tension appliquée étant rapide et réversible, nous avons eu l'idée de fabriquer une lentille à focale variable. Dans notre dispositif, une goutte d'un liquide à fort indice de réfraction est plongée dans un second liquide conducteur, recouvert d'un film isolant. Les deux liquides ne se mélangent pas, mais possèdent la même densité, de sorte que la lentille, insensible à la poussée d'Archimède, fonctionne bien, quelle que soit son orientation. Confor-



À l'intérieur d'un liquide conducteur (en vert) et sur une surface isolante, on place une goutte de liquide qui ne se mélange pas au premier (en bleu). En l'absence de tension électrique, la goutte prend une forme dictée par l'affinité entre le liquide et la surface. La goutte est alors une lentille à focale longue (en haut). Lorsque l'on place un générateur de tension entre la surface isolante et le liquide conducteur (en bas), les charges modifient la tension superficielle du liquide extérieur et donc la courbure de la goutte : l'angle de contact α augmente, et la focale de la lentille diminue.

mément à ce qui est observé pour une goutte posée sur une surface, la tension superficielle entre le liquide extérieur et le film diminue avec la tension, de sorte que ce liquide s'étale. Par réaction, la goutte a le mouvement contraire : elle se contracte. En appliquant une tension, on modifie la forme de la goutte, et donc sa focale.

Cette lentille est l'analogue du cristallin de l'œil humain, lequel accommode des objets à différentes distances. La qualité des prototypes mis au point a été une heureuse surprise : pour un diamètre de pupille identique, la capacité à accommoder (la variation de puissance optique) de la goutte est dix fois supérieure à celle de l'œil humain ! La précision de ces mesures, la réversibilité est parfaite et deux centièmes de seconde suffisent pour changer la focale. De multiples applications sont envisageables : dans le domaine médical, ces petites lentilles pourraient équiper les endoscopes et, utilisation plus large, les têtes des lecteurs de disques optiques du futur. Un brevet a été déposé.

Bruno BERGE,
Laboratoire de spectrométrie physique,
Université Joseph Fourier, Grenoble

Deux vieux enfants

Le cerveau des premiers hommes se développait déjà plus lentement que celui des autres hominidés.

En 1925, Raymond Dart, de l'Université du Witwatersrand, à Johannesburg, annonce que les restes fossilisés d'un crâne d'enfant, nommé l'enfant de Taung, appartiennent à un nouveau genre d'hominidés très anciens, *Australopithecus*. Cet hominidé serait, selon Dart, un proche parent de l'homme, non son ancêtre. L'hypothèse de Dart est vivement contestée : un crâne d'enfant ne suffisait pas pour des comparaisons anatomiques entre espèces. Elle fut pourtant confirmée par la découverte de fossiles d'*Australopithecus* adultes (ce genre s'est répandu en Afrique il y a probablement quatre millions d'années).

Aujourd'hui, au contraire, la découverte à Drimolen, en Afrique du Sud, de deux fossiles de très jeunes hominidés

est accueillie avec intérêt par les paléontologues : ils apportent des informations sur le développement des individus de deux genres différents et précisent ainsi leurs relations avec l'homme moderne.

Ces deux enfants, découverts dans les mêmes couches sédimentaires, ont deux millions d'années. L'un, dont il ne reste que quelques éléments du crâne, des dents et de l'avant-bras gauche, appartient à l'espèce *Homo habilis*, la plus ancienne du genre *Homo*, auquel nous appartenons. L'autre est un petit *Paranthropus*, un genre plus proche de l'homme que *Australopithecus*, mais qui ne figurerait pas parmi nos ancêtres. Il n'en reste que des éléments de la face. Ce n'est pas la première fois que des vestiges de ces deux genres sont découverts sur un même site : sans nécessairement se fréquenter, ils vivaient dans les mêmes milieux.

Huit autres enfants d'hominidés de ces périodes anciennes étaient déjà connus, mais les deux fossiles de Dri-molen sont les plus jeunes de leurs groupes respectifs. Les restes dentaires et crâniens du petit *Homo habilis* indiquent qu'il est mort à moins de trois ans. La morphologie de son cerveaulet, déduite de la forme de deux os de son crâne, ressemble déjà beaucoup à celle des enfants actuels. Le diamètre du canal où passait une artère céphalique nous permet de calculer la taille du cerveau de l'enfant : plus gros que celui d'un *Paranthropus*

adulte, mais plus petit que celui d'un *Homo habilis* adulte.

Nous savions que les premiers hommes avaient une capacité cérébrale supérieure à celle des autres hominidés. Nous avons désormais la preuve que le cerveau de nos ancêtres d'il y a deux millions d'années se développait déjà, comme le nôtre, sur une durée plus longue que celle des singes : chez *Australopithecus* et chez le chimpanzé, le cerveau atteint sa taille adulte à l'âge de trois ans. Dès son apparition, l'homme, se distingue ainsi des autres hominidés par une enfance plus longue, et donc par une plus grande capacité d'apprentissage.

Les restes du bébé *Paranthropus*, qui est mort encore plus jeune, précisent son proche apparentement avec l'homme ; c'est notamment le cas de l'os prémaxillaire qui porte les incisives supérieures. Comme chez l'homme, l'os prémaxillaire est petit et se soude très tôt à l'os maxillaire ; ainsi, les incisives sont même projetées vers l'avant, comme chez *Australopithecus*. Par ailleurs, tandis que chez *Australopithecus*, les molaires permanentes poussent bien avant les incisives, les incisives permanentes du petit *Paranthropus*, que nous observons au scanner à l'intérieur de l'os, se calcifient en même temps que les premières molaires permanentes, comme chez l'homme.

José BRAGA, Université Bordeaux 1,
Dominique GOMMERY, Muséum
national d'histoire naturelle.

BRÈVES

Le pont irlandais

Les archéologues pensaient que le savoir-faire des ingénieurs romains d'avant l'an mil de notre ère avait disparu. Cette idée vient d'être abattue par la découverte

d'un pont de 160 m de long près de Clonmacnoise, en Irlande. C'est la plus grande structure de bois connue pour la période médiévale. Le bois utilisé pour ce pont date de 800 : la construction eut lieu plusieurs siècles avant que les Normands n'imposent leurs techniques.



Des yeux derrière les genoux

On sait que les alternances de sommeil et de veille sont synchronisées avec l'alternance du jour et de la nuit : la lumière reçue par les yeux déclenche le sommeil. Surprise : on perturbe le rythme circadien de personnes bien réglées en éclairant pendant trois heures... la face postérieure d'un de leurs genoux. Ainsi, le rythme circadien serait réglé à la fois par les récepteurs oculaires et par des récepteurs sensibles à la lumière, localisés dans la peau.

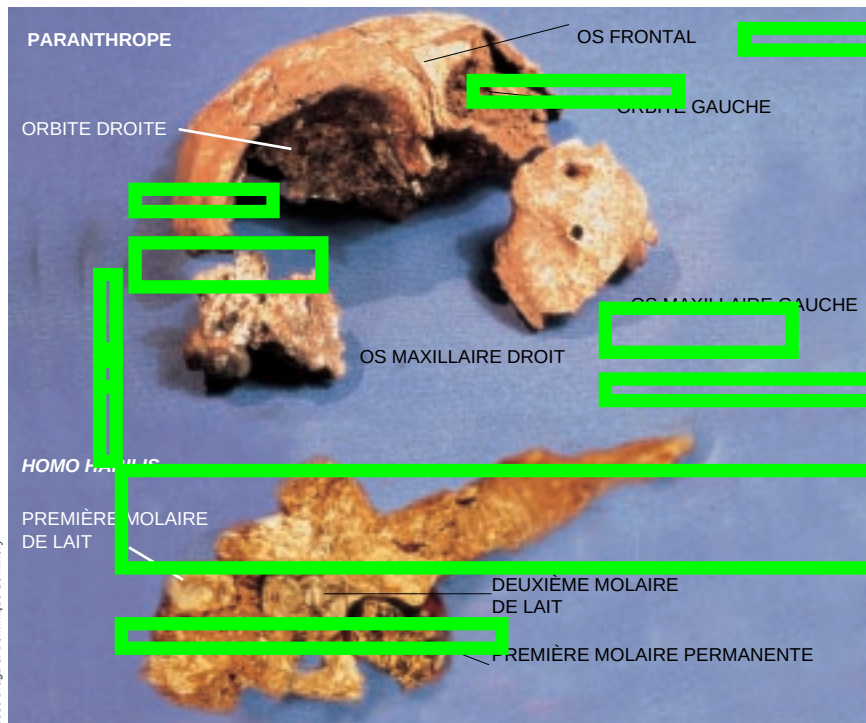
Un ange étrange...

Plus dense que les naines blanches ou que les étoiles à neutrons, mais moins denses que les trous noirs, les étoiles étranges viennent de s'ajouter au bestiaire cosmique. Ces étoiles, nées de l'explosion de certaines supernovae, seraient constituées de quarks étranges, au lieu de tous les quarks. Vladimir Usov, de l'Institut Veizmann, vient d'établir les critères de distinction entre ces étoiles et les étoiles à neutrons. En réexaminant les données, les astronomes pourraient découvrir que certains objets que l'on pensait être des étoiles à neutrons sont en fait des étoiles étranges.

L'origine de l'eau

Des astronomes français et américains, ont mesuré la quantité de deutérium dans les molécules d'eau de la comète Hale-Bopp, qui s'approcha de la Terre en 1997. Cette quantité étant supérieure à celle mesurée sur Terre, les astronomes déduisent que les comètes ne sont pas l'unique source des océans terrestres.

Suite page 24



Ces os fossiles d'un bébé *Paranthropus* (en haut) et d'un bébé *Homo habilis* (en bas) ont environ deux millions d'années. Les restes du bébé *Homo habilis* montrent qu'il est mort à moins de trois ans : la première molaire permanente est encore logée dans sa crypte osseuse. Elle n'était pas visible chez l'enfant, mais elle apparaît ici parce que la paroi de la crypte a été détruite.

La fin des chauves?

Afin d'identifier les causes moléculaires de l'alopecie (la perte des cheveux), une équipe internationale a étudié des personnes atteintes de cette maladie. Les cheveux de ces personnes sont tombés et le gène est muté. Ce gène, aussi actif chez les hommes que chez les femmes, ne détient certainement pas toutes les clés de l'alopecie, mais il aidera les biologistes à comprendre comment s'organisent les protéines qui participent à la pousse des cheveux et à identifier les étapes incorrectes qui déclenchent leur chute.

Des instruments en béton

N'en déplaisent aux musiciens, le son d'un instrument à vent ne dépend pas du matériau constitutif de l'instrument : même des musiciens avertis ne distinguent pas une flûte en béton



que celle d'une flûte en métal. L'état de surface de l'instrument soient identiques. D'où vient alors que, selon les flûtistes, une flûte en or ou en argent sonne mieux qu'une flûte en métal? Sans doute de la facture : les instruments en métal ou en bois précieux sont mieux finis que les instruments en matériaux moins nobles.

Verre recyclé

Spécialiste des molécules azotées, Yves Laurent, à Rennes, avait observé que les verres de nitrures gonflent quand ils fondent, puis se rétractent à la fusion. L'azote gazeux est libéré et la fusion du verre de récupération additionné de verres de nitrures... et obtenu une mousse de verre, très bon isolant thermique et phonique, très résistant chimiquement et imputrescible. Le nouveau matériau, qui sera produit par les Sociétés Cockerill-Sambre et Car Meuse, pourrait remplacer l'amiante.

La génétique du langage

Environ cinq pour cent des enfants qui se développent par ailleurs normalement ont des difficultés pour s'exprimer et pour comprendre les textes écrits. Les études de jumeaux avaient déjà montré le rôle des facteurs génétiques dans les troubles du langage, mais des généticiens anglais viennent d'en apporter la preuve. Ils ont étudié une famille dont la moitié des membres, sur trois générations, ont des troubles du langage, et des difficultés à coordonner les muscles faciaux de la parole. Ils ont localisé sur le chromosome 7 une région impliquée dans ces troubles.

Suite page 26

Une enzyme artificielle

Les biologistes fabriquent une enzyme «sur mesure» en modifiant une protéine naturelle.

Les enzymes accélèrent diverses réactions chimiques naturelles. Il n'existe pas toute une panoplie, mais certaines interrompent le spectre de ces activités catalytiques. André Méne, Éric Quéménéur et leurs collègues du Commissariat à l'énergie atomique, le CEA, à Saclay, ont fabriqué l'une des enzymes manquantes, la première protéase artificielle.

Les protéases découpent les protéines spécifiquement à proximité de certains acides aminés : ainsi, l'élastase découpe les protéines à proximité des acides aminés alanine, la trypsine près des acides aminés basiques (la lysine et l'arginine), la chymotrypsine près des acides aminés aromatiques (la tyrosine, le tryptophane et la phénylalanine). En revanche, aucune protéase naturelle ne découpe les protéines près de l'acide aminé proline. La proline est disposée dans les zones charnières où s'effectue le repliement des protéines. L'équipe du CEA a fabriqué une protéase spécifique de la proline à partir d'une enzyme qui reconnaît spécifiquement cet acide aminé, mais qui, normalement, ne découpe pas les molécules qui portent ce groupe.

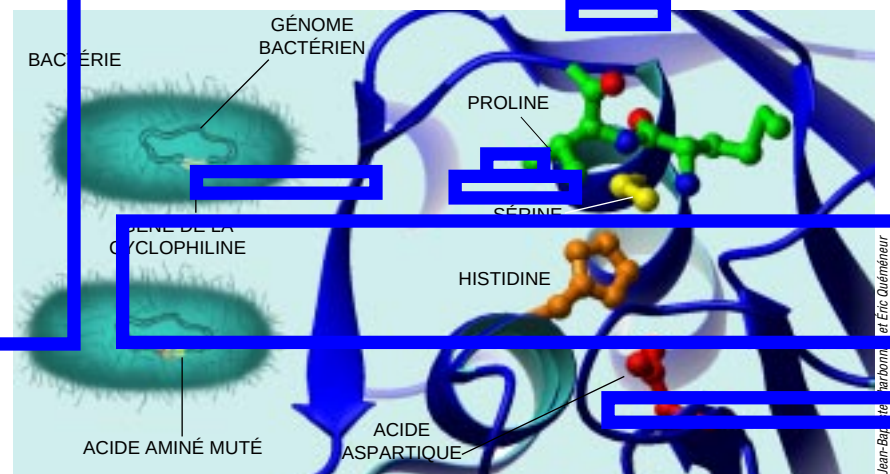
Cette enzyme de départ est la cyclophiline, qui, dans tous les organismes vivants, catalyse le repliement des protéines en facilitant la torsion des chaînes autour des acides aminés proline. Comme toutes les enzymes, la cyclophiline a un site actif, une «poche» où s'adapte par-

faitement la proline. Les protéases sont pourvus, en plus de leur site actif spécifique, de «ciseaux moléculaires», souvent un triade de trois acides aminés (une sérine, une histidine et un acide aspartique), la même dans toutes les protéases.

Les biologistes ont modifié la séquence connue du gène de la cyclophiline de la bactérie *Escherichia coli* ; ainsi, dans la protéine qui code ce gène, trois acides aminés ont été remplacés par le groupe des trois acides aminés qui assurent l'activité lytique (de «ciseaux») des protéases. Pour choisir l'emplacement de ce trio d'acides aminés, ils ont utilisé la modélisation moléculaire. Effectivement, la nouvelle molécule, la cyproase 1, découpe les protéines à proximité des acides aminés proline.

Quelle est l'intérêt d'une telle protéase? Tout d'abord, on dispose ainsi d'un nouvel outil pour le séquençage des protéines. Pour élucider la séquence d'une protéine, on doit la découper en morceaux, ou peptides, avec diverses protéases. Par recouplement des différents peptides obtenus, on détermine l'enchaînement des acides aminés. La cyproase 1 permettra de placer de nouveaux jalons (les acides aminés proline) sur les protéines. Cette enzyme devrait aussi être utile dans le domaine agroalimentaire. Ainsi l'amertume des agumes provient de petits peptides qui ont une proline à leur extrémité : une protéase spécifique comme la cyproase 1, en coupant l'amertume, envisager une application dans le domaine médical : le collagène, une protéine fibreuse, riche en proline, est présent dans les os et dans les tissus conjonctifs. Or, le collagène est anormal dans certaines pathologies. On pourrait utiliser la cyproase 1 pour diagnostiquer *in vitro*, ces anomalies de structure ou de séquence.

Marie-Thérèse LANDOUSY



La séquence du gène codant la cyclophiline de la bactérie *Escherichia coli* a été modifiée en trois endroits pour que la nouvelle protéine (à droite) codée par le gène muté porte les ciseaux moléculaires que constitue la triade des acides aminés sérine (en jaune), histidine (en orange) et acide aspartique (en rouge). La nouvelle enzyme coupe spécifiquement les protéines à proximité des acides aminés proline (en vert).

Le lysosome : l'appareil digestif des cellules

De nouveaux traitements évitent l'accumulation des sucres, des lipides ou des protéines dans cette structure cellulaire.

En 1955, Christian de Duve (prix Nobel de physiologie et médecine en 1974) découvrait les lysosomes. Depuis, on a montré que ces structures arrondies sont présentes dans la plupart des cellules. Les lysosomes sont entourés d'une membrane qui isole leur contenu «corrosif» du reste de la cellule : ils contiennent des enzymes qui «lysent», c'est-à-dire découpent en morceaux, les protéines, les sucres, les lipides et autres molécules qui y sont transportées. Les lysosomes sont souvent plusieurs centaines par cellule et leur morphologie est variée, mais, malgré cette diversité structurale, leur fonction biochimique est la même : ce sont des sites de digestion. Lorsque les enzymes lysosomales manquent ou ne sont pas actives, la fonction de nettoyage n'est plus assurée : les molécules non dégradées s'accumulent et perturbent le métabolisme cellulaire. De nouveaux traitements de ces maladies sont issus d'une meilleure compréhension des mécanismes moléculaires.

Les maladies lysosomales (on en a décrit une cinquantaine) sont des maladies génétiques rares, c'est-à-dire touchant moins d'une personne sur 1 000. En France, 350 nouveaux cas environ sont diagnostiqués chaque année. Si la plupart des gènes responsables de ces maladies ont été identifiés, ce n'est pas le cas de la cystinose. Cette maladie, progressive, résulte d'une accumulation d'un acide aminé, la cystine, issu de la dégradation des protéines, dans les lysosomes. La cystine s'y accumule parfois sous forme de cristaux, ce qui perturbe le fonctionnement des cellules, notamment des cellules rénales. Depuis le début des années 1980, on dispose d'une substance salvatrice : la cystéamine. Toutefois cette substance, préparée par la Pharmacie centrale des hôpitaux et distribuée aux enfants hospitalisés, n'avait pas le statut de médicament. Paradoxe ? Non, car la Pharmacie centrale prépare ainsi quelques substances, présentes en pharmacie notamment, sous la responsabilité des médecins hospitaliers. Cette procédure sauve des vies, mais pour que les produits deviennent des médicaments, ils doivent subir de nombreux tests que seuls des laboratoires pharmaceutiques peuvent assurer.

Ainsi la cystéamine, utilisée depuis une quinzaine d'années, vient de devenir un médicament officiel, car le Laboratoire Orphane Europe a obtenu l'autorisation de mise sur le marché.

À défaut d'un diagnostic et d'un traitement précoce, l'évolution vers une insuffisance rénale est inévitable. Toutefois une greffe de rein est possible. Selon Michel Broyer, qui dirige le Service de néphrologie pédiatrique à l'Hôpital Necker-Enfants Malades, on évite ou on retarde l'insuffisance rénale et les autres complications, notamment les plus graves, les complications neurologiques, en administrant de la cystéamine aussi tôt que possible.

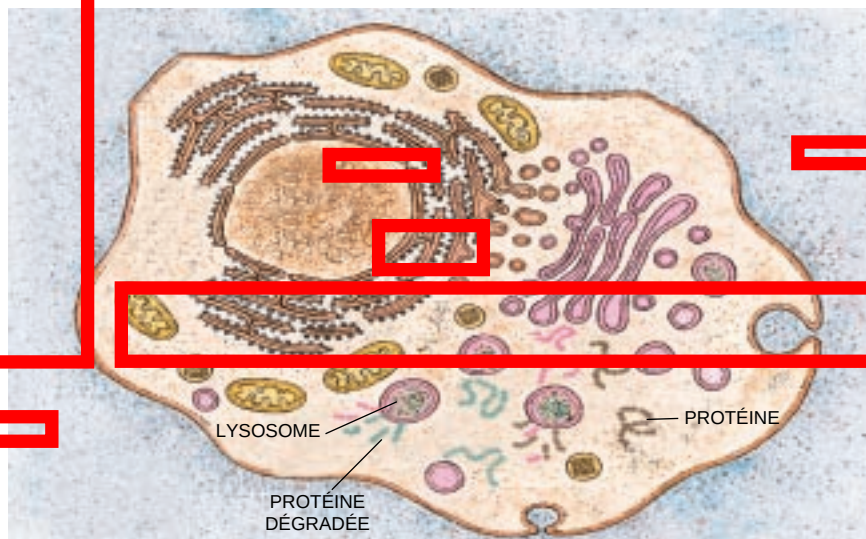
Bien que chacune des maladies lysosomales soit due à un gène particulier, l'évolution physiopathologique est souvent la même : les maladies se traduisent par une dégradation des fonctions motrices et cérébrales, une perte de l'acquis. Ce sont des maladies dites de surcharge, qui entraînent des modifications du visage, des os, une augmentation du foie et de la rate, des troubles moteurs douloureux.

Dans la maladie de Niemann-Pick de type C, l'élément qui s'accumule dans les lysosomes est le cholestérol. Deux gènes responsables de cette pathologie ont été récemment identifiés ; quand ils sont mutés le cholestérol s'accumule dans les lysosomes. Ce mécanisme diffère de celui qui intervient dans les maladies cardio-vasculaires, mais quand on aura élucidé les mécanismes de la régulation du transport du cholestérol dans les lysosomes, peut-être saura-t-on mieux prévenir l'accumulation de cette molécule dans les maladies cardio-vasculaires.

Une des méthodes qui empêchent l'accumulation d'un substrat dans les lysosomes consiste à diminuer la concentration de la molécule dont elle dérive, mais les

précurseurs des molécules non dégradées ne proviennent pas directement de l'alimentation : ils sont synthétisés dans les cellules. Toutefois, dans la maladie de Tay-Sachs, les biochimistes ont récemment décodé à l'anneau des réactions qui aboutissent à la molécule qui n'est pas dégradée dans les lysosomes. Ils ont identifié les enzymes qui interviennent dans cette synthèse et ont trouvé un inhibiteur d'une de ces enzymes : on inhibe ainsi la synthèse de la molécule que les lysosomes ne dégradent pas dans cette maladie.

D'autres traitements sont envisageables. Ainsi, on traite certaines maladies lysosomales avec des enzymes de substitution. C'est déjà le cas de la maladie de Gaucher. Ce type de traitement semble aussi efficace (chez l'animal) dans la maladie de Pompe (on administre l'enzyme α -glucosidase). La maladie de Pompe de l'enfant entraîne une insuffisance cardiaque aiguë. Chez l'adulte, il existe une forme bénigne de cette maladie : bien que dix pour cent seulement de l'enzyme déficitaire soient fabriqués, l'organisme fonctionne. Une partie des enzymes lysosomales est excrétée hors de la cellule productrice et pénètre dans les cellules environnantes, compensant les déficits. Ainsi, une production notablement inférieure à la normale (environ dix pour cent) suffirait à assurer un fonctionnement quasi normal de l'organe. Selon Emmanuelle Picot, professeur de génétique à la Faculté de médecine Cochin-Port Royal, on espère que, grâce à cette particularité, une thérapie génique appliquée aux maladies lysosomales serait efficace : il est possible que quelques cellules génétiquement modifiées produisent assez d'enzymes pour compenser les anomalies fonctionnelles des cellules environnantes déficitaires.



Dans les cellules normales, les protéines codées par le génome sont transportées jusqu'aux lysosomes. Elles y sont dégradées. Lorsqu'une enzyme lysosomale manque, des protéines s'accumulent dans les lysosomes, perturbant le fonctionnement des cellules.

La fin de la fraise?

Une invention suédoise reléguera-t-elle au musée les techniques du dentiste et de l'orthodontiste? La Société Médicale Team vient de mettre au point un gel qui, appliqué sur une dent cariée, dissout l'ivoire abîmé en moins de 30 secondes: à une goutte d'acide placée sur la dent, on ajoute un gel qui protège la partie saine de la dent. Une fois préparées et nettoyées, les cavités cariées sont ensuite rebouchées avec un amalgame classique.

Le système nerveux des momies

À l'aide d'anticorps, des neurologues britanniques ont découvert, dans des momies égyptiennes âgées de 2 500 à 3 000 ans, des neuromédiateurs, des molécules qui transfèrent l'information entre les cellules nerveuses. Comme



D.R.

réduisent le nombre de neuromédiateurs échangés, on espère que la détection de ces molécules révélera l'importance de maladies qui provoquent ces lésions, comme le diabète ou l'alcoolisme, dans d'anciennes civilisations.

Levures et hormones humaines

La levure *Saccharomyces cerevisiae* fabrique des protéines avec un bon rendement et à faible coût. Peut-on lui faire produire les hormones stéroïdes humaines? Denis Pompon et ses collègues du Centre de génétique humaine de Gif-sur-Yvette, ont construit et assemblé tous les gènes qui assurent la synthèse de ces hormones, et ils les ont ensuite intégrés dans le génome de la levure sans que cela ne perturbe son métabolisme: la levure produit désormais les hormones stéroïdes humaines. Ce travail a été soutenu par les Laboratoires Hoechst Marion Roussel.

Le regard commande

Chaque année, à la suite d'accidents, 1 000 Français deviennent tétraplégiques et ne peuvent plus utiliser d'ordinateurs pour travailler. Pour y remédier, l'Association des tétraplégiques a mis au point un système de commande par le regard. Constitué d'une caméra pilotée par un dispositif de traçage et de suivi de l'œil, cet appareil identifie la position et l'orientation de l'œil de l'utilisateur par rapport à l'écran d'un ordinateur. Un utilisateur tétraplégique peut ainsi «taper» avec les yeux un texte à la vitesse maximale de 60 caractères par minute.

Emplumés ou non?

Des fossiles chinois relancent le débat sur le plumage de certains dinosaures.

À l'automne de 1996, une rumeur fait vibrer les paléontologues: on aurait découvert en Chine les restes fossiles d'un dinosaure montrant les traces d'un plumage! Le fossile provient de dépôts lacustres de la province du Liaoning, au Nord-Est de Pékin. Depuis quelques années, les gisements de cette région (exploités par les paysans du cru) avaient livré une faune abondante, variée et très bien conservée, datée du début du Crétacé, il y a 130 millions d'années.

Ainsi, en 1996, deux chercheurs de Pékin, Ji Qiang et Ji Shuan, décrivent le fossile d'un mystérieux animal baptisé

Sinosauropteryx prima. Selon eux, les traces de revêtement épidermique visibles autour du squelette étaient bel et bien des plumes, et *Sinosauropteryx* devait être classé parmi les oiseaux: ce serait le plus ancien et le plus primitif d'entre eux. La question est d'importance: selon certains

paléontologues, les oiseaux seraient les descendants des dinosaures.



Pei-Ji Chen

Fossile de *Sinosauropteryx prima* (à gauche) et sa reconstitution (à droite).

paléontologues, l'interprétation ne fit pas l'unanimité. Plusieurs spécialistes de l'origine des oiseaux se rendirent en Chine pour examiner le spécimen et ses prétendues plumes. Durant l'année 1997, une certaine confusion régna quant au statut de *Sinosauropteryx*. Trois paléontologues chinois, Chen Peiji, Dong Zhiming et Zhen Shuonan, ont mis fin à cette confusion en publiant une description détaillée de cet animal, fondée sur deux spécimens conservés à l'Institut de paléontologie de Pékin (l'un d'entre eux étant l'autre face du spécimen de Pékin: ces fossiles immergés dans une roche feuilletée apparaissent lorsqu'on fend en deux les dalles les contenant, une face du squelette apparaissant sur chacune des moitiés). Les fossiles chinois sont remarquablement conservés: non seulement le squelette est préservé, avec ses os en connexion, mais on distingue les restes de «parties molles» qui, d'ordinaire, ont disparu. Il s'agit non seulement du revêtement épidermique, mais aussi des restes de certains organes internes. Le plus grand des spécimens décrits contient aussi deux œufs non encore pondus, ainsi que les restes de son dernier repas, un petit lézard (un troisième exemplaire, pas encore décrit, contiendrait les restes d'un mammifère).

L'étude du squelette montra que *Sinosauropteryx* est très proche du petit dinosaure *Compsognathus*, dont on a trouvé deux squelettes dans des calcaires du Jurassique supérieur, l'un en Bavière, l'autre dans le Var. La sanction tomba: les fossiles chinois ne sont pas des oiseaux, mais de petits dinosaures carnivores, des théropodes de la famille des Compsognathidés. Les spécimens du Liaoning nous apportent une foule d'informations nouvelles sur ces bipèdes aux membres antérieurs très courts, ne dépassant guère, pour

le plus grand, une longueur totale d'environ un mètre, à la queue plus longue que le reste du corps. Un groupe de chercheurs américains (J. Ruben, T. Jones, N. Geist et W. Hilleenius), en examinant la disposition des vertèbres

thoracique et abdominale, a même conclu que ces petits dinosaures avaient des poumons plus proches de ceux des crocodiles que de ceux des oiseaux, et qu'ils étaient donc probablement des animaux à sang froid.

Quid du revêtement? S'agit-il de véritables plumes, comme l'ont pensé certains, ou de «proto-plumes» à partir

desquelles de vraies plumes auraient pu évoluer, ou encore de tout autre chose? La question prend toute son importance dans le cadre de la vieille controverse sur l'origine des oiseaux : ceux-ci, qui se caractérisent notamment par leurs plumes, sont-ils des descendants directs de petits dinosaures (peut-être emplumés eux-mêmes), comme le pensent de nombreux paléontologues, ou bien faut-il chercher leur origine plus loin parmi des reptiles plus primitifs? Selon Chen Peng et Zhen Jin, les formations végétales qui couvrent le corps de *Sinosauropteryx* sont des sortes de filaments, probablement creux et peut-être creux, longs de 4 à 20 millimètres. Ils sont particulièrement apparents le long du dos et de la queue, et de la partie ventrale de celle-ci.

pas de vraies plumes pourvues de barbes et de barbules, et il n'est même pas certain qu'on puisse y voir des proto-plumes, bien que Chen, Dong et Zhen n'excluent pas cette possibilité. Seules des études plus poussées, notamment biochimiques si cela est possible, permettront peut-être de résoudre l'énigme.

Sinosauropteryx ne saurait être considéré comme un ancêtre potentiel des oiseaux, pour la bonne raison qu'il existait déjà, de son temps, de vrais oiseaux (comme le montrent les fossiles trouvés dans les mêmes sédiments lacustres chinois), et aussi parce que le plus ancien fossile indubitable d'oiseau, connu, *Archaeopteryx*, est très probablement plus ancien que les spécimens chinois.

mettre le voler (ce que son squelette ne lui permettait pas non plus, d'ailleurs). À quoi servaient-ils? Peut-être à isoler le corps de l'animal, pour maintenir une température corporelle constante (auquel cas ce ne serait plus vraiment un animal à sang froid comme son système respiratoire semblait l'indiquer...).

Sinosauropteryx prima ne démontre ni n'infirme l'origine dinosaurienne des oiseaux, mais ce que l'origine des oiseaux intéresse se rassure : les couches fossilifères du Liaoning ont livré un autre animal étrange, auquel Ji Qiang et Ji Shuan ont donné le nom de *Protarchaeopteryx*, et qui possède, semble-t-il de véritables plumes, même s'il est improbable qu'il ait été capable de voler, à en juger par son squelette.

Les langues en péril

La diversification des langues, la malédiction de Babel, empêchait les hommes de se comprendre. Aujourd'hui, apparaît le péril inverse : le village électronique global réunifie les langues, menaçant les cultures associées aux langues et aux dialectes.

Les langues naissent, vivent et évoluent ; certaines meurent. Des épidémies, des catastrophes, des invasions, et la colonisation ont amené la disparition de dialectes, la culture dominante gommant celle des ancêtres. Certains enfants, tels les Gallois ou les Aborigènes d'Australie, n'ont pas le droit de parler leur langue maternelle en classe. Parfois, des groupes ont été délocalisés et contraints d'apprendre une nouvelle langue : les tribus des Africains envoyés comme esclaves en Amérique.

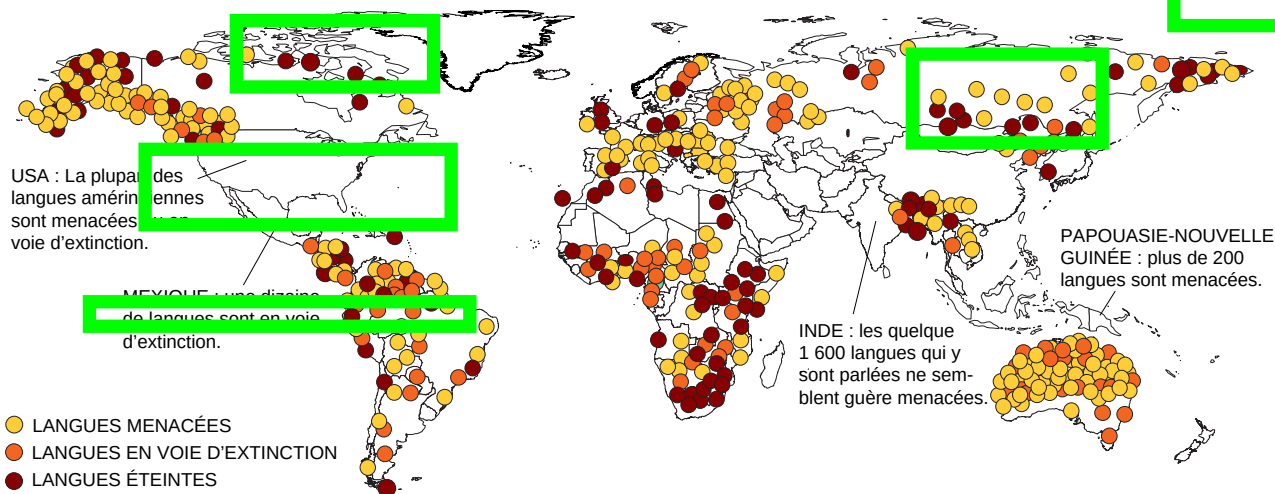
La mort d'une langue est un drame pour ses derniers locuteurs et pour le patrimoine culturel mondial. Par sa langue, chaque culture exprime son identité, et les efforts visant à préserver la variété linguistique reposent sur le respect universel des différentes cultures. Pour préserver cet aspect du patrimoine mondial, l'UNESCO cherche à préserver les langues menacées et a publié, en 1996, un atlas des langues en voie de disparition.

Sur la carte, établie à partir des données qui figurent dans l'atlas de l'UNESCO, on a représenté les langues éteintes au

cours des 50 dernières années ; on a également marqué les langues menacées, c'est-à-dire celles que les enfants n'apprennent plus (ceux qui parlent ces langues ont plus d'une quarantaine d'années), et les langues en voie d'extinction (les langues parlées seulement par les personnes âgées).

On constate que, partout, même en Europe, plusieurs langues risquent de disparaître. Ainsi la langue des îles britanniques (le *norn*) et celle de l'île de Man (le *manx*) se sont éteintes au profit de l'anglais ; en France, l'avenir du breton, du provençal et du basque est incertain.

Pour sauver les langues en voie d'extinction, les linguistes suivent deux approches : pour les langues moribondes, ils tentent de préserver le vocabulaire, la grammaire, les sons et les traditions pour que les étudiants et leurs enfants puissent les apprendre ; en fait, il existe environ 5 000 langues et dialectes parlés aujourd'hui de par le monde : la moitié est en danger. Seule la moitié des 3 000 langues en péril ont été correctement étudiées par les linguistes, et plusieurs centaines le seront lors des dix prochaines années. L'étude des langues menacées est relativement peu coûteuse, et préserverait un patrimoine culturel dont on ne mesure pas toujours l'intérêt. Que deviendront nos consignes pour le stockage des déchets nucléaires si, dans 20 000 ans, la langue utilisée n'était plus comprise?



Jeu de go

Un programme d'ordinateur construit des programmes qui jouent au go.

La victoire de l'ordinateur *Deeper Blue* sur le champion d'échecs Gary Kasparov inciterait à croire que les ordinateurs surpassent désormais les humains dans les jeux de l'esprit. Il n'en est rien : le jeu de go résiste encore à l'intelligence artificielle. La construction de programmes qui élaborent eux-mêmes des programmes de jeu de go est une voie prometteuse.

Depuis plus de dix ans, chercheurs et programmeurs améliorent des programmes de go sans dépasser le niveau d'un amateur moyen. Ce n'est pas faute de motivation : un riche Taiswanais, Mr. Ing, a offert un prix de huit millions de francs au premier programme de go qui battrait le professionnel de son choix.

Le jeu de go paraît plus simple que les échecs : le damier est un quadrillage de 18 cases de côté, et les joueurs posent alternativement une pierre (blanche pour un joueur, noire pour l'autre) sur une intersection vide du quadrillage. Au début d'une partie entre deux joueurs de forces égales, le damier est vide, et c'est Noir qui a le trait. Un joueur capture une chaîne de pierres adverses s'il les entoure complètement de ses propres pierres. Le but du jeu est d'entourer le plus de territoire possible sans se faire entourer. À la fin de la partie, chaque intersection vide entourée compte pour un point, ainsi que

chaque pierre capturée ; le joueur qui a le plus de points a gagné.

Aux échecs, un joueur a le choix, en moyenne, entre 35 coups possibles. Les meilleurs programmeurs, tel *Deeper Blue*, essaient ces coups, envisagent les réactions possibles de l'adversaire, puis les réactions aux réactions, et ainsi de suite. Le nombre de positions à évaluer croît exponentiellement avec la profondeur d'analyse, mesurée en nombre de coups. Les programmes d'échecs les plus rapides examinent jusqu'à 14 coups à l'avance, soit environ 80 milliards de positions.

Au go, le problème est pire, car, en moyenne, chaque joueur a environ 250 coups possibles. Si l'on utilisait la puissance de *Deeper Blue* pour exécuter un programme de go, celui-ci ne pourrait envisager que cinq coups à l'avance. Le surcroît, au contraire des échecs, un programme de go ne peut recourir à des fonctions d'évaluation simples permettant de mesurer l'intérêt d'une position.

Aussi l'approche par la force brute est inadaptable au go : l'ordinateur doit reconnaître des formes complexes de territoires, faire de longs raisonnements, et utiliser parfois des connaissances floues et difficilement formalisables.

Les meilleurs programmes de go actuels sont le fruit de sept à vingt ans de travail. Chen Zhixing, professeur de chimie chinoise à la retraite et excellent joueur de go, s'est fait aider d'une joueuse professionnelle pour réaliser le meilleur, nommé *Handtalk*, et tenter de maîtriser ce qu'il considère comme «un des plus grands des jeux de l'esprit». Pour ce spécialiste lyrique, «La pensée est séduite par la beauté des formes qui se développent sur le damier, et les séquences de coups sont comparables à des mor-

EndNote EndLink

Gestion de bibliographies

TARIFS SPÉCIAUX
M.E.N.R.T.
ENDNOTE + ENDLINK
390 HT*

La référence en gestion de
bibliographies

PLUS DE
100 000
UTILISATEURS



VERSION WINDOWS

- Logiciel de gestion de bibliographies à intégrer à votre traitement de texte
- Jusqu'à 15 types prédéfinis de références et 21 champs d'entrée de données bibliographiques personnalisables
- 32 000 références par base
- Lien direct vers le M.O.N.T.
- Nombreux formats de présentation prédéfinis : APA, MLA, Chicago, Nature, Science...
- Grande souplesse et puissance de la fonction recherche

Avec EndLink, importez des bases de données en ligne ou sur CD-ROM dans EndNote Plus

- Plus de 100 formats d'importation prédéfinis : Medline, Agricola, Chem Abstracts, Biosis, Enci, Psycinfo...
- Possibilité de créer ses propres filtres

EndNote/EndLink 1 590 Fht

TARIFS M.E.N.R.T.

EndNote/EndLink 1 390 Fht*

EndNote/EL 5.....

► Disponible pour Win 3.1/95/NT et Mac

* Tarifs réservés aux établissements dépendant du Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et jusqu'à 5 000 000.



Distributeur officiel EndNote/EndLink

34 bd Haussmann - 75009 Paris

Tél. : 01 42 46 00 42 - Fax : 01 42 46 00 33

info@ritme.com - http://www.ritime.com



La dernière coupe Fost, en août 1997.

ceaux de musique. La difficulté vient de faire comprendre et de faire composer à un ordinateur cette musique visuelle».

Plus précisément, les bons joueurs de go évaluent une position en fonction de la forme et des positions respectives des groupes de pierres, et leurs raisonnements sont souvent plus intuitifs que rationalisés. Comment programmer ces capacités intellectuelles? Les meilleurs programmes de go actuels exécutent des milliers de règles identifiées empiriquement par des experts du jeu, mais les joueurs ne savent pas dire comment ils évaluent les positions et choisissent leur coup. D'où la difficulté de programmation.

Au Laboratoire d'informatique de Paris VI, l'équipe *Métaconnaissance* de Jacques Pitrat étudie des méthodes générales pour faire découvrir par l'ordinateur lui-même des connaissances d'experts. Ceci implique, pour les

au jeu de go : le programme nommé *Introspect* s'améliore par observation et analyse de son propre fonctionnement, puis il combine ses connaissances au programme qui joue véritablement, le programme *Segen*. Fondé sur l'auto-observation, l'apprentissage d'*Introspect* est effectué de la façon suivante : ayant en mémoire la configuration du damier, il cherche les conséquences de chaque coup joué et analyse les raisons tactiques de ce coup. Quand il trouve des idées tactiques qu'il n'aurait pas eues, il les incorpore à sa connaissance nouvelle.

Une fois apprises et traduites en langage d'exécution rapide, les règles sont données au programme *Segen*. Celui-ci envisage que quelques coups parmi quelque 250 coups envisageables à chaque branche de l'arbre de recherche, exécuté par un microprocesseur Pentium 133, il joue un coup

en dix secondes sur un damier 19x19. Il envisage à chaque coup des centaines d'arbres de recherche qui comprennent chacun entre 2 et 500 nœuds, et il prévoit des séquences jusqu'à 60 coups à l'avance. À chaque nœud de chaque arbre, le programme applique les règles qu'il a apprises et qui conseillent les coups à utiliser. Ces règles, écrites par le programme, sont au nombre de 10 000.

Ainsi, le métaprogramme *Segen* fait la plupart des autres programmes de go qui ont été écrits par des humains (il est classé dixième sur 40, lors de la dernière coupe Fost, qui a eu lieu en août 1997) et son potentiel de progression est supérieur à celui des autres programmes : une petite amélioration du métaprogramme peut conduire à de grandes améliorations des programmes finaux.

Tristan CAZENAVE
Université Paris VI

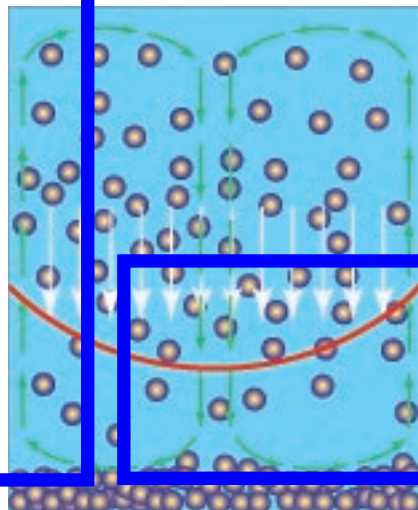
Convection intrinsèque

Lors de la sédimentation, un mouvement de convection s'ajoute à la chute des particules.

Les lois du phénomène de sédimentation permettent de retracer l'histoire des sédiments à partir de leur arrangement actuel. On utilise le phénomène pour séparer différentes espèces de particules ou pour clarifier les liquides. L'idée que l'on se fait de la sédimentation est en général assez simple : dans un liquide, les particules lourdes tombent au fond. La réalité est plus complexe : nous avons montré qu'au mouvement descendant des particules, s'ajoutait un mouvement de convection global de la suspension, c'est-à-dire des particules et du fluide.

Une sphère isolée tombant dans un liquide déplace ce liquide. En 1851, George Stokes a montré que la perturbation de la vitesse du liquide autour de la sphère décroît comme l'inverse de la distance à son centre. Cette perturbation modifie la vitesse d'une autre particule qui se déplace dans le liquide, laquelle modifie la vitesse de la première. Avec de nombreuses particules, chacune d'elles ressent les influences de toutes ses voisines. En modélisant cette interaction hydrodynamique à longue portée, on montre que, lorsque la concentration en particules augmente, la vitesse de sédimentation diminue. Cependant, ce résultat ne prend pas en compte l'effet des parois latérales du récipient.

Dans un récipient, les sphères ne peuvent s'approcher à moins d'un rayon des parois, en raison de leur volume. La densité de la suspension près des parois est ainsi inférieure à ce qu'elle est ailleurs dans la suspension. Étant moins dense, la suspension (les billes et le liquide) subit la poussée d'Archimède et remonte. Ce mouvement ascendant près des bords est équilibré par un mouvement descendant au centre. Ainsi se forment des rouleaux de convection.



Dans un récipient, une suspension de petites billes sédimente ; on filme la chute des billes et on détermine leur vitesse. Le profil de vitesse mesuré (courbe rouge) révèle une vitesse inférieure près des bords. Cette expérience confirme qu'au mouvement de chute des billes (flèches blanches) s'ajoute une remontée de la suspension près des bords et une descente au voisinage du centre (flèches vertes).

Prévue dans les années 1980, cette convection intrinsèque n'avait jamais été observée. Pour notre expérience, nous avons utilisé un récipient rempli d'un liquide d'indice de réfraction égal à celui de petites billes de verre. La suspension est ainsi transparente. Quelques billes de la suspension sont recouvertes d'une mince couche d'argent. À l'aide d'une caméra en sauto-cadre, le mouvement de ces billes. La mesure de la vitesse de sédimentation moyenne est enregistrée d'un bord à l'autre du récipient lors du passage des billes. Nous avons observé que les particules tombent plus rapidement au centre que sur les bords, démontrant l'existence d'un mouvement de convection intrinsèque.

Ces mesures remettent en cause certains aspects de la théorie : pour des suspensions diluées, celle-ci prédit que la vitesse de la convection croît linéairement avec la concentration en particules. Or, nos expériences montrent que la vitesse de la convection croît à faible concentration et atteint une limite lorsque le volume de billes est compris entre 20 et 30 pour cent du volume de la suspension ; au-delà, elle s'annule. Nous avons aussi observé la structure de la suspension près des parois. À fortes concentrations, des couches diluées et concentrées alternent jusqu'à quelques diamètres de billes des parois. Aux concentrations élevées, la densité des couches externes est égale à celle du centre, et la convection n'a pas lieu.

Yannick PEYSSON
et Elisabeth GUAZZELLI, ESPCI, Paris

L'architecture de la vie

DONALD INGBER

Un ensemble universel de règles de construction guide la conception des structures organiques, des simples composés carbonés jusqu'aux cellules et aux tissus les plus complexes.

La vie est la complexité même. De la bactérie à la baleine, les organismes se développent par le jeu des interactions compliquées d'un grand nombre de composants différents. Ces composants, ou sous-systèmes, sont eux-mêmes constitués d'éléments plus petits dont le comportement dynamique est autonome et spécifique, par exemple l'aptitude à catalyser des réactions chimiques. Pourtant, quand ces éléments sont combinés au sein d'unités fonctionnelles plus grandes – tels une cellule ou un tissu – des propriétés inattendues apparaissent, notamment la capacité de se déplacer, de changer de forme et de croître.

Bien que les chercheurs soient conscients de cette étrange particularité, ils n'en ont pas assez tenu compte dans leurs explications des principes fondamentaux de la vie. Au cours des dernières décennies, des biologistes ont exploré le fonctionnement du corps humain en caractérisant les propriétés des matériaux et des molécules essentielles de la vie, notamment l'ADN, matériau de base des gènes. Ils s'efforcent aujourd'hui d'identifier chaque élément de l'ensemble complet, le génome, spécifique de tout être humain. Les gènes spécifient la structure des protéines, les molécules clés de la vie ; aussi la connaissance prochaine du génome, Saint Graal de la biologie moléculaire, permettra-t-elle aux biologistes de constituer un catalogue presque complet des molécules d'un être humain. Toutefois, la structure des diverses parties d'une machine complexe, cellule ou moteur à explosion, n'explique pas le fonctionnement du tout. Aussi, identifier et décrire les pièces du puzzle moléculaire n'est que d'une aide minime pour la compréhension des lois régissant l'assemblage.

La nature fait appel à des règles d'assemblage simples illustrées par l'existence – à l'échelle moléculaire comme à l'échelle macroscopique – de motifs tels que spirales, pentagones et formes triangulaires. Ces motifs apparaissent dans les structures cristallines les plus régulières et dans les protéines les plus contournées, dans des organismes aussi différents que les virus, le plancton et l'être humain. Est-ce si étonnant ? Les matières organiques et minérales sont formées des mêmes éléments constitutifs : des atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote

et de phosphore ; la seule différence tient au mode d'assemblage des atomes dans l'espace.

Par auto-assemblage, les constituants se conjuguent pour donner naissance à des structures stables plus grandes dont les propriétés, nouvelles, ne pouvaient être prévues par les seules caractéristiques des éléments individuels. Dans la nature, l'auto-assemblage se manifeste à diverses échelles. À l'intérieur du corps humain, par exemple, de grosses molécules s'auto-assemblent en composants cellulaires, ou organites, qui s'auto-assemblent en cellules ; ces cellules s'auto-organisent en tissus, et les tissus en organes. Le résultat est le corps, organisé hiérarchiquement en différents systèmes, emboîtés comme des poupées russes. Ainsi, pour comprendre comment les créatures vivantes se forment et fonctionnent, il nous reste à découvrir les principes de cette organisation biologique.

Malgré des siècles d'étude, les chercheurs comprennent mal les forces qui poussent les atomes à s'auto-assem-

bler en molécules. Ils ignorent encore comment des groupes de molécules se conjuguent pour créer les cellules vivantes et les tissus. Ces 20 dernières années, j'ai découvert et étudié un aspect étonnant, mais apparemment fondamental, de l'auto-assemblage. Une large palette de systèmes naturels, atomes de carbone, molécules d'eau, protéines, virus, cellules, tissus, et même les êtres humains et les autres créatures vivantes, sont construits sur un même principe architectural, que nous désignerons par le néologisme de *tenségrité*. Ce terme caractérise la faculté d'un système à se stabiliser mécaniquement par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent.

Cette découverte fondamentale pourrait être appliquée dans de nombreux domaines. Au niveau cellulaire, la tenségrité explique comment la for-

me cellulaire et les forces mécaniques – telles que la pression dans les vaisseaux sanguins ou la compression dans les os – influent sur l'activité des gènes. Une meilleure intelligence des règles naturelles de l'auto-assemblage nous permet, dans des applications allant de la conception de médicaments à la fabrication de tissus, d'intégrer avec plus de pertinence les caractéristiques des molécules, des cellules et des autres constituants biologiques. L'omniprésence de la tenségrité dans la nature ouvre de nouvelles perspectives sur les forces qui régulent l'organisation biologique et, peut-être, sur l'évolution elle-même.

Qu'est-ce que la tenségrité?

Au milieu des années 1970, à l'Université Yale, j'étudiais parallèlement la biologie cellulaire et la sculpture, et j'ai eu alors le sentiment que la structuration des êtres vivants est plus dictée par l'architecture que par la composition chimique des éléments.

Les molécules et les cellules qui constituent nos tissus se renouvellent constamment, et c'est la pérennité des motifs et de leur architecture qui caractérise la vie.

Les structures établies par la tenségrité sont stabilisées, non par la résistance des constituants individuels, mais par la répartition et l'équilibre des contraintes mécaniques dans la totalité de la structure. Ces structures se répartissent en deux catégories. Dans la première, on classe les armatures constituées de tiges rigides, dont chacune peut travailler en traction et en compression, et qui sont assemblées en triangles, en pentagones ou en hexagones; l'orientation des tiges détermine la position de chaque articulation et garantit la stabilité de la structure. Les dômes géodésiques de Buckminster Fuller sont ainsi constitués.

La seconde catégorie englobe les structures stabilisées par précontrainte, une idée mise en œuvre par le sculpteur Kenneth Snelson. Dans ses élégantes sculptures, les éléments

1. LA TENSÉGRITÉ – principe d'organisation d'un système architectural où des structures se stabilisent en équilibrant les forces opposées de compression et de tension – définit la forme et la solidité d'un certain nombre d'objets naturels et artificiels. Le cytosquelette d'une cellule vivante (à l'arrière-plan) est une structure formée de filaments et de microtubules connectés. La relation dynamique qui existe entre ces éléments structuraux fait penser à cette sculpture de Kenneth Snelson (au premier plan), où de longues tiges sont reliées par des câbles.

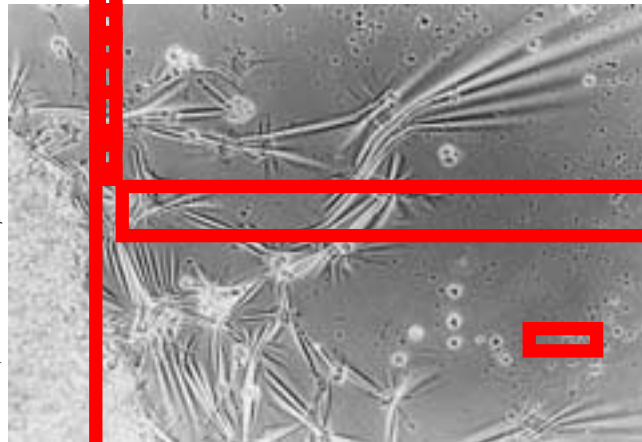
2. LE POIDS DU DÔME est supporté par un nombre minimum de tiges articulées.

© Allegra Fuller Snyder, Buckminster Fuller Institute, Santa Barbara

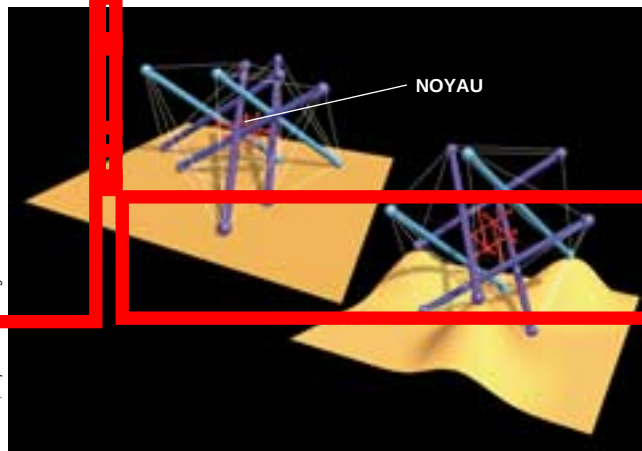


travaillant en traction sont distincts de ceux qui travaillent en compression. Avant qu'une telle structure ne soit soumise à une force extérieure, tous les éléments qui la constituent sont précontraints en traction ou en compression. Au sein de la structure, les tiges rigides en compression exercent une force de traction sur les éléments élastiques en traction, qui, eux-mêmes, compriment les tiges rigides. Ces forces s'équilibrent dans l'ensemble de la structure et la stabilisent.

Ces deux types de structures ont une caractéristique commune : les forces sont transmises à tous les éléments structuraux. En d'autres termes, un accroissement de la tension sur l'un des éléments est transmis à tous les autres éléments de la structure, y compris les plus éloignés. Cette augmentation globale de la tension est équilibrée par une augmentation de la compression de certains éléments de la structure. Cette structure se stabilise par un mécanisme associant tension globale et compression locale. À l'op-



3. QUAND ELLES COLLENT À UN SUBSTRAT, les cellules exercent des forces qui en plissent la surface.



4. CE MODÈLE DE TENSÉGRITÉ représentant une cellule est fait de tiges rigides et d'élastiques. Comme une cellule vivante, il s'aplatit, ainsi que son noyau, lorsqu'il est fixé à une surface rigide (à gauche), et se rétracte en une forme plus sphérique lorsqu'il est sur un substrat souple qu'il déforme (à droite).

posé, la plupart des bâtiments tirent leur stabilité de l'existence d'une compression globale due à la force de gravité.

Dans ces structures, qu'il s'agisse des dômes de Buckminster Fuller ou des sculptures de K. Snelson, les éléments sur lesquels s'exercent les efforts de traction se réarrangent en minimisant la longueur entre deux points de la structure : ces éléments constituent les arêtes d'une géodésique. Aussi les structures de tensegrité supportant un poids donné sont-elles aussi légères que possible.

Du squelette au cytosquelette

Quel rapport y a-t-il entre la tensegrité et le corps humain ? Les principes de la tensegrité s'appliquent à toutes les échelles. À l'échelle macroscopique, les 206 os qui composent notre squelette sont comprimés par la force de gravité et stabilisés dans la position verticale grâce à la traction exercée par les muscles, les tendons et les ligaments (qui jouent un rôle similaire à celui des

câbles dans les sculptures de K. Snelson). Dans l'organisme, les os sont les structures de compression, tandis que les muscles, les tendons et les ligaments travaillent en traction. À l'autre extrémité de l'échelle, les protéines et autres molécules essentielles sont aussi stabilisées par la tenségrité. Je me suis particulièrement intéressé au niveau intermédiaire entre ces deux extrêmes, l'échelle cellulaire.

À Yale, je travaillais avec James Jamieson et m'intéressais aux interactions mécaniques des constituants des systèmes biologiques, en particulier des cellules. À cette époque, vers la fin des années 1970, les biologistes se représentaient la cellule comme un gel ou un fluide visqueux délimité par une membrane, en gros un ballon rempli de mélasse. On savait que les cellules contiennent une armature interne, ou cytosquelette, composée de trois types de protéines : les microfilaments, les filaments intermédiaires et les microtubules. Toutefois, leur rôle dans le contrôle de la forme des cellules était mal compris.

À l'époque, on s'interrogeait également sur le comportement des cellules quand elles sont disposées sur différentes surfaces. On savait que les cellules s'étalent et s'aplatissent lorsqu'elles adhèrent à du verre ou au fond d'une boîte de Pétri en matière plastique. En 1980, Albert Harris, de l'Université de Caroline du Nord, montra que, lorsqu'elles sont fixées sur un substrat en caoutchouc flexible, les cellules se contractent et s'aplatissent moins. L'aplatissement est réduit par la déformation du caoutchouc.

Ce comportement s'explique si l'on considère la cellule comme une structure de tenségrité. Pour le démontrer, je bricolai une cellule composée de dix tiges en bois et d'un jeu d'élastiques. Je disposai les tiges – qui subissaient les contraintes de compression – en trois paires. Chaque paire était perpendiculaire aux deux autres, sans qu'aucune tige n'en touche une autre. Les élastiques, subissant les forces de tension, reliaient les extrémités de toutes les tiges, tirant sur celles-ci jusqu'à ce

qu'elles se disposent en une forme tridimensionnelle stable. Pour simuler le noyau, je placai un modèle de tenségrité sphérique plus petit dans la grande structure qui représentait le reste de la cellule. Enfin, pour imiter les connexions du cytosquelette entre le noyau et le reste de la cellule, je tendis des bords élastiques allant de la surface de la grande structure de tenségrité à la plus petite, située à l'intérieur (voir la figure 4).

Quand on appuie sur ce modèle de tenségrité, il s'aplatit. Dès que la pression exercée est supprimée, l'énergie emmagasinée dans les filaments tendus ramène le modèle, à la manière d'un ressort, vers sa forme d'origine, approximativement sphérique. Pour simuler le comportement des cellules lorsqu'elles sont placées sur une surface, j'imposai un substrat de culture, en verre ou en matière plastique, en prenant un morceau de tissu tendu que j'épinglai solidement à un support en bois. Je fixai le modèle de tenségrité à ce substrat en l'aplatissant et en couplant les extrémités de quelques-unes

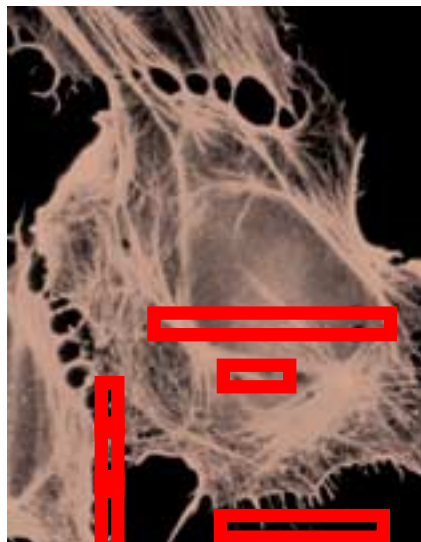
MICROFILAMENTS



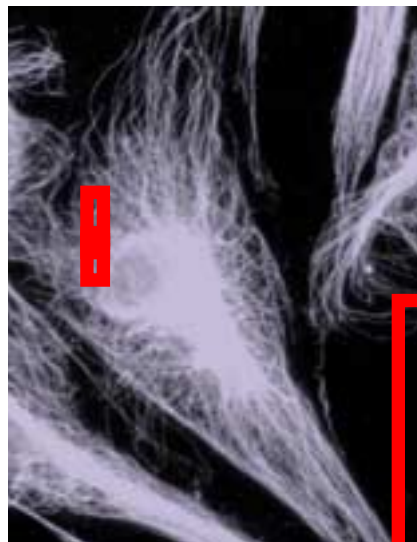
MICROTUBULES



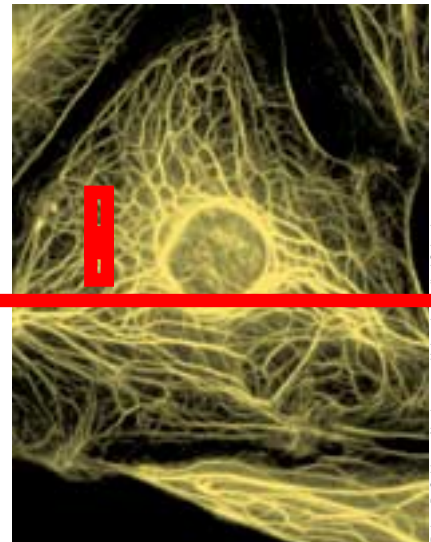
FILAMENTS INTERMÉDIAIRES



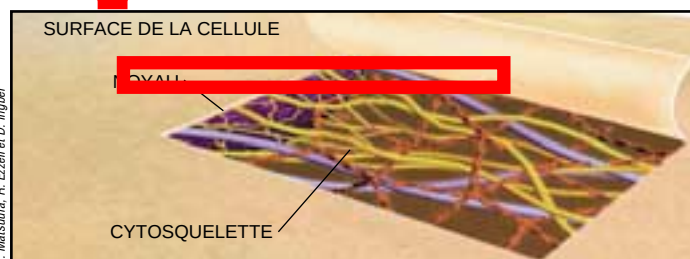
Donald E. Ingber



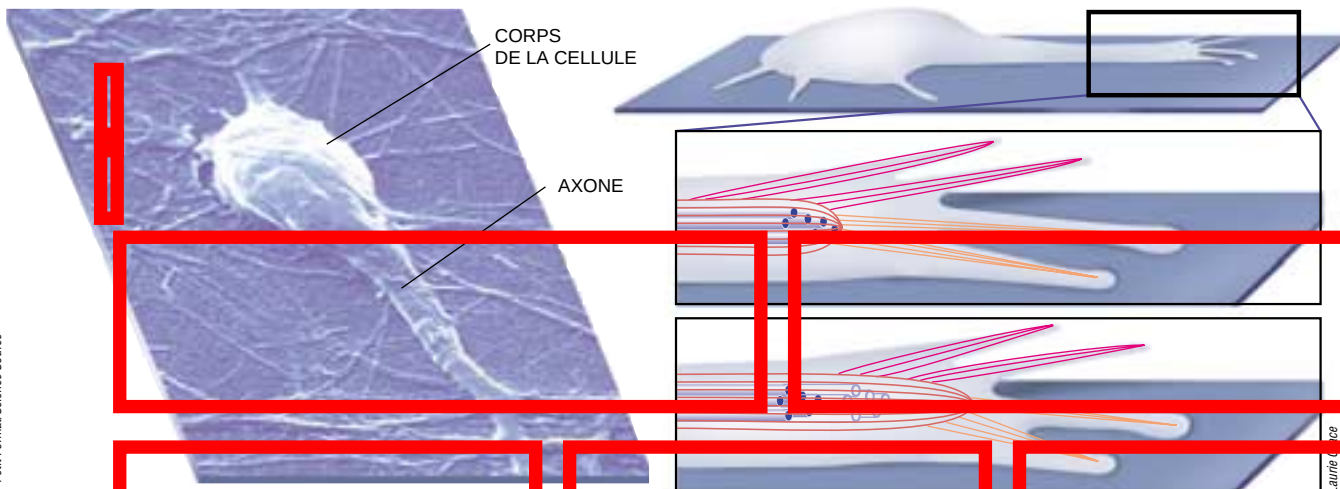
Donald E. Ingber



Robert D. Goldman, Northwestern University Medical School



5. LE CYTOSQUELETTE D'UNE CELLULE est composé de microfilaments (en haut à gauche), de microtubules (en haut au centre) et de filaments intermédiaires (en haut à droite), qui ont tous des dimensions de l'ordre de quelques nanomètres. La forme arrondie au voisinage du centre de chacune des photographies est le noyau de la cellule. Ces trois éléments constituent le maillage du cytosquelette, qui s'étend de la surface de la cellule au noyau (illustration ci-contre à gauche). La structure moléculaire de chacun de ces éléments est représentée au-dessus de la photographie correspondante, avec un codage des couleurs reproduit sur l'illustration à gauche.



6. UNE CELLULE NERVEUSE présente des prolongements tels que les axones, qui la relient électriquement aux cellules nerveuses voisines (ci-dessus). Ces prolongements se comportent comme des tiges élastiques (illustrations à droite), par exemple lors de la réparation d'une lésion : leurs microtubules (en violet) se prolongent. Des microfilaments contractiles (en rouge) entourent les microtubules, les comprimant et restreignant ainsi leur croissance. Ces mêmes microfilaments, cependant, sont reliés à d'autres microfilaments (en orange) qui se projettent en avant jusqu'aux points où la cellule se fixe au substrat sous-jacent (illustration du milieu à droite). Lorsque les microfilaments s'étirent vers l'avant à la rencontre de ces points d'adhérence, ils permettent aux microtubules de s'allonger, et à l'axone de progresser (illustration en bas à droite).

des tiges du tissu. Ces liaisons simulaient les intégrines, les molécules qui assurent l'adhérence des cellules entre elles ou à leur substrat.

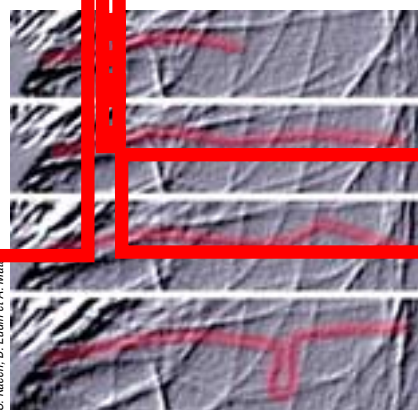
Lorsque les extrémités des tiges étaient cousues sur un tissu solidement épingle, le modèle restait aplati, exactement comme une véritable cellule sur un substrat rigide (en verre par exemple). Lorsque je retirais les épingles et libérais le tissu de son support, le modèle de tenségrité retrouvait sa forme sphérique, en plissant le tissu sous-jacent. De plus, quand j'aplatissais le modèle en le fixant au tissu formant le substrat, la cellule et son noyau interne se déformaient ensemble : le modèle du noyau se déplaçait vers le bas du modèle de la cellule. Ensuite j'ai montré que les « vraies » cellules et leurs noyaux s'étalent et s'orientent de la même façon lorsqu'ils adhèrent à un substrat : ainsi, les structures de tenségrité imitent le comportement des cellules des organismes vivants.

Maillage interne des cellules

Dans les années qui suivirent cette expérience, les connaissances sur la constitution mécanique des cellules renforcèrent la pertinence du modèle. En outre, conformément aux modèles de tenségrité, la structure de la plupart des cellules dépend non seulement des trois types principaux de filaments du cytosquelette, mais aussi de la

matrice extracellulaire à laquelle, dans l'organisme, les cellules sont liées.

À l'intérieur de la cellule, les tensions mécaniques se répartissent dans le réseau de microfilaments élastiques du cytosquelette. Ces microfilaments tirent la membrane de la cellule et tous ses constituants internes vers le noyau central. Deux types principaux d'éléments travaillent en compression s'opposent à ces tractions vers l'intérieur : l'un situé à l'extérieur de la cellule et l'autre à l'intérieur. Le composant externe est la matrice extracellulaire ; les tiges internes comprimées sont soit des microtubules, soit de grands faisceaux de microfilaments entrecroisés à l'intérieur du cytosquelette. Les filaments intermédiaires, le troisième composant du



7. UN MICROTUBULE EN CROISSANCE et comprimé se déforme. L'allongement du microtubule est bloqué par les constituants du squelette de la cellule.

cytosquelette, constituent les organes de liaison de l'ensemble, reliant les microtubules et les microfilaments contractiles entre eux, à la membrane cellulaire et au noyau. En outre, ils constituent des sortes de haubans qui maintiennent en place et immobilisent le noyau, au centre. Bien que le cytosquelette soit entouré de membranes et qu'il baigne dans un fluide visqueux, c'est ce réseau de tiges et de câbles qui stabilise la forme de la cellule.

La cellule et le noyau sont physiquement reliés par des filaments élastiques et pas seulement par un cytoplasme fluide : aussi, une traction sur des récepteurs de la surface de la cellule perturbe immédiatement des structures au plus profond de celle-ci. Andrew Maniotis, dans mon équipe, en a récemment fait la démonstration directe en fixant des micropipettes aux récepteurs d'adhérence à la surface de cellules et en exerçant une traction vers l'extérieur : il s'ensuit un réalignement immédiat des filaments du cytosquelette et des structures internes du noyau, dans la direction de la traction.

Comment la mécanique commande la biochimie

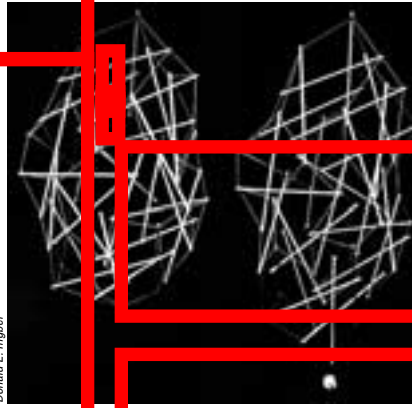
La tenségrité explique des phénomènes autres que la stabilisation de la forme des cellules et des noyaux. Au milieu des années 1980, Steven Heidemann, qui travaillait avec Harish

Joshi et Robert Buxbaum, à l'Université du Michigan, a montré que la tenségrité explique comment les cellules nerveuses déploient des prolongements minces et très allongés, nommés prolongements axonaux, qui sont remplis de microtubules et transmettent des signaux électriques dans le système nerveux. Cette croissance est nécessaire pour la réparation des lésions nerveuses.

L'équipe de S. Heidemann a découvert qu'à leurs extrémités les microtubules sont comprimés par la traction exercée à l'intérieur des axones par les microfilaments contractiles. Plus important encore, ces chercheurs ont observé que l'assemblage des microtubules – et donc l'allongement des axones – résulte de la libération des contraintes de compression des microtubules, contraintes qui sont transférées aux sites d'interaction de la cellule et de sa matrice extracellulaire. Au niveau moléculaire, l'équilibre des forces de tenségrité associe la mécanique et la biochimie.

Tout récemment, Andrew Matus, de l'Institut Friedrich Miescher de Bâle, a parachevé cette expérience : il a fabriqué des cellules où les microtubules sont fluorescents et a ainsi observé la déformation (le flambement) de ces microtubules quand ils sont comprimés.

Le modèle de la tenségrité montre que la structure du cytosquelette cellulaire est modifiée par les forces transmises à travers la surface de la cellule. Ce constat est important, car un grand nombre d'enzymes et d'autres substances qui commandent la



8. LE RENDUSSEMENT LINÉAIRE est commun dans une structure de tenségrité : les éléments de la structure tournent pour s'orienter en plus grand nombre dans la direction de la contrainte appliquée (sur l'illustration de droite la tension est dirigée vers le bas).

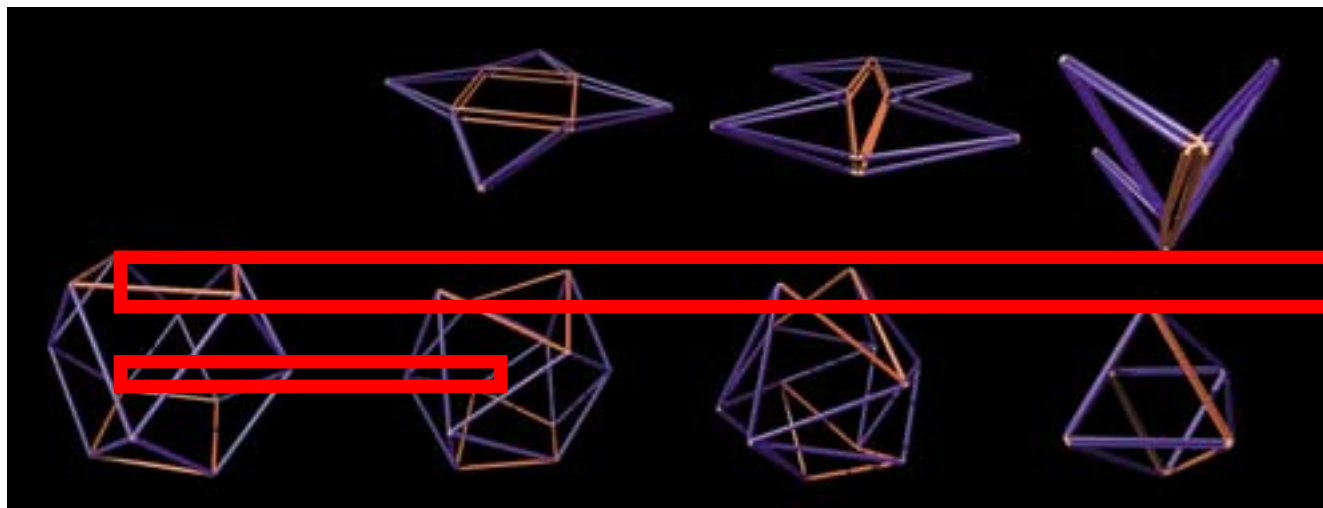
synthèse de ces protéines, la conversion de l'énergie et la croissance sont solidaires du cytosquelette ; une modification des caractéristiques géométriques et mécaniques du cytosquelette influe certainement sur les réactions biochimiques, modifie les gènes activés, et donc les protéines fabriquées.

Pour tester cette hypothèse, Rahul Singh et Christopher Chen, dans mon équipe, ont travaillé en collaboration avec George Whitesides, également à Harvard, et ont mis au point une méthode pour confectionner des formes cellulaires possédant certaines fonctions. Ils ont contraint des cellules vivantes à prendre différentes formes – sphérique ou aplatie, ronde ou carrée – en les plaçant sur de minuscules «îlots» adhésifs formés de matrice

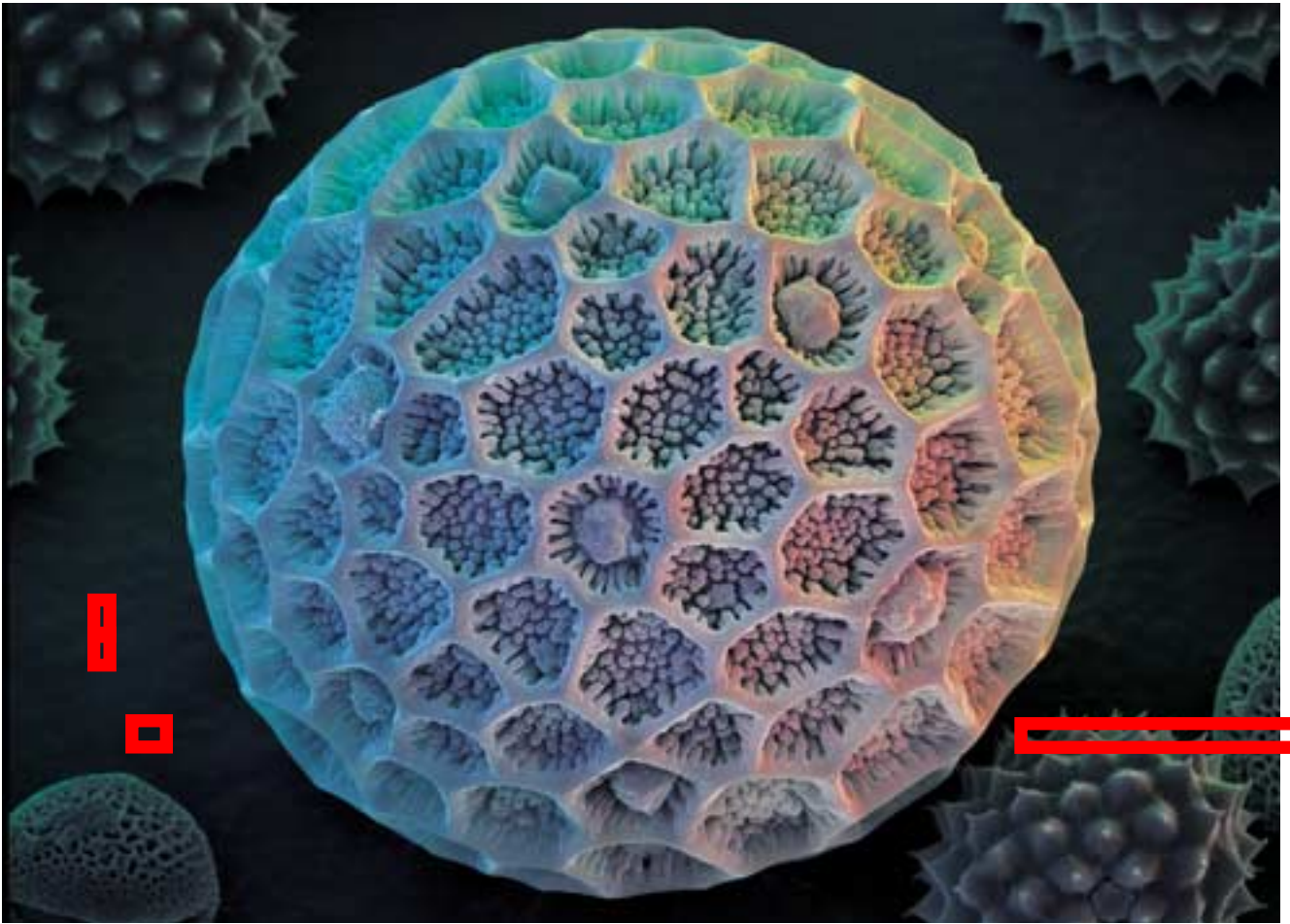
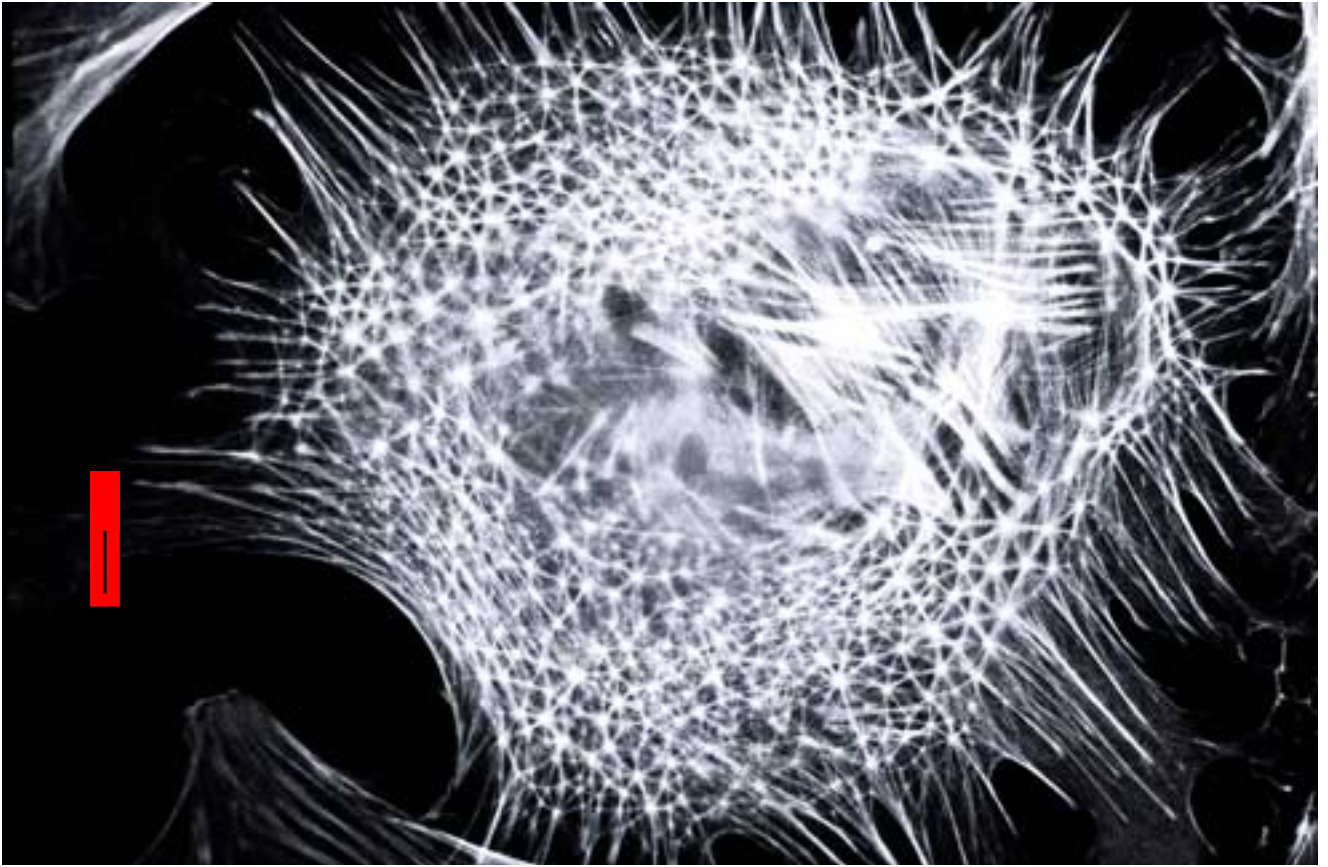
extracellulaire et entourés d'une surface en Teflon à laquelle les cellules ne peuvent adhérer.

En agissant sur la forme des cellules, ils commandaient certains programmes génétiques. Les cellules qui s'étaient étirées et s'aplatissaient se divisaient mieux, tandis que les cellules rondes qu'ils empêchaient de s'étaler activaient un programme de mort programmée ou apoptose. Quand les cellules n'étaient ni trop étalées ni trop contractées, elles ne se divisaient pas, elles ne mouraient pas, mais se différenciaient en tissus spécifiques : les cellules de capillaires formaient des tubes capillaires creux, les cellules hépatiques sécrétaient des protéines que le foie fournit habituellement au sang, et ainsi de suite.

Ainsi, la reconfiguration mécanique de la cellule et du cytosquelette commande le fonctionnement de la cellule. Les cellules très aplaties, dont le cytosquelette est étiré, «sentent» qu'un plus grand nombre de cellules est nécessaire pour couvrir le substrat – comme lors de la cicatrisation d'une blessure – et qu'une division cellulaire s'impose. La forme arrondie correspond à la situation où trop de cellules sont en concurrence sur la matrice ; certaines doivent mourir pour empêcher une prolifération incontrôlée et la formation d'une tumeur. Entre ces deux situations extrêmes, le tissu se comporte normalement. Cette commutation ouvre de nouvelles voies pour le traitement des cancers ou la réparation des tissus, et peut-être même pour la création de tissus artificiels.



9. CE MODÈLE à base de pailles et de joints flexibles illustre la façon dont des réseaux de microfilaments comprimés peuvent se réarranger en faisceaux linéaires (en haut à droite) ou en formes géodésiques triangulées telles qu'un octaèdre (en bas à droite).



Déformation volontaire des cellules

Dans la hiérarchie de l'auto-assemblage, le niveau suivant est celui de la formation des tissus créés par la jonction de cellules entre elles et avec leur matrice extracellulaire. Une propriété capitale des tissus est leur comportement mécanique. Un très grand nombre de tissus distincts, tels que les muscles, le cartilage, les vaisseaux sanguins et la peau, réagissent selon une loi de raidissement linéaire.

Quand vous tirez sur votre peau, par exemple, vous sentez la résistance s'accroître à mesure que vous tirez plus fort. À une force externe croissante s'oppose une résistance également croissante. Des travaux récents montrent que même des molécules isolées comme

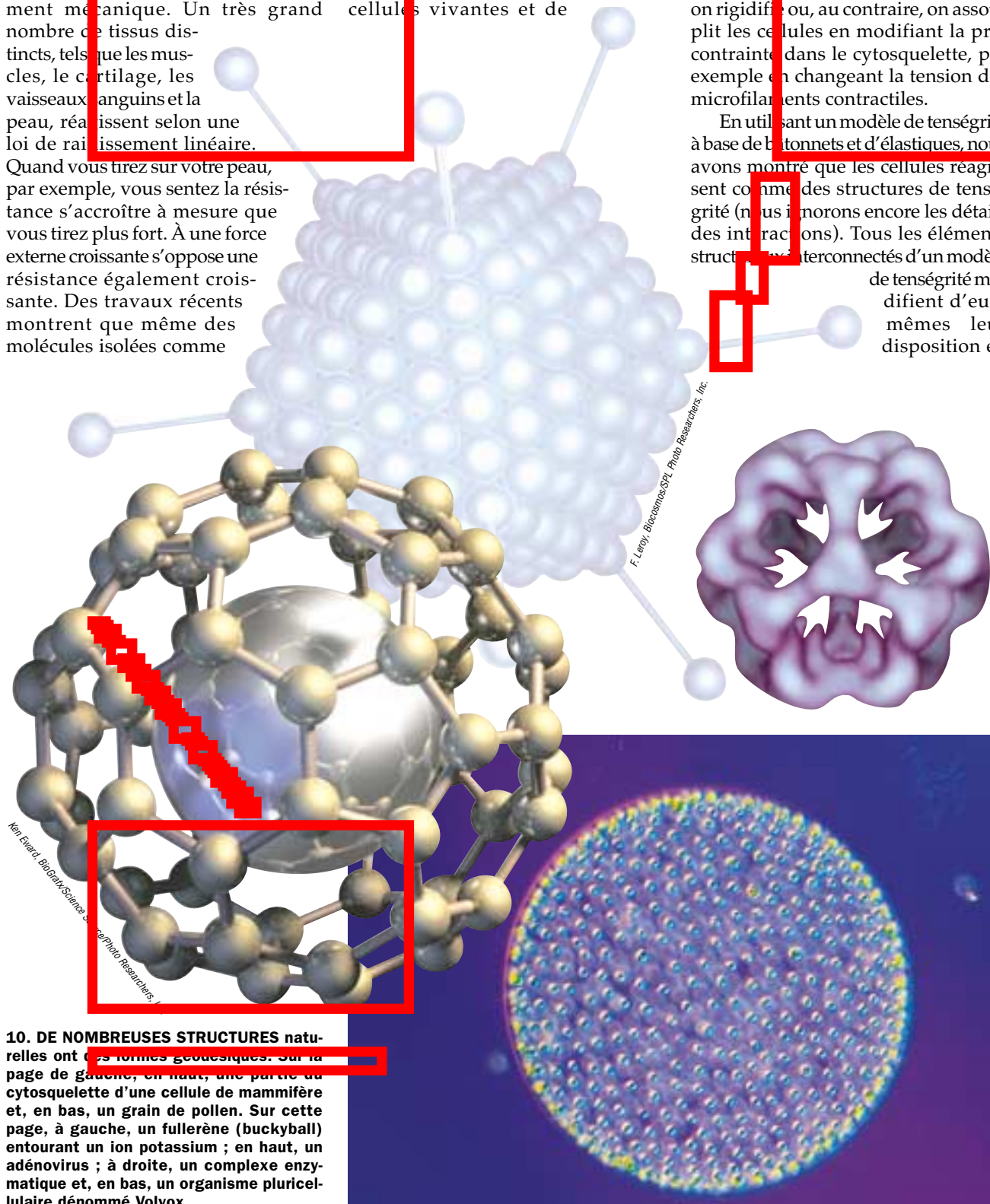
l'ADN manifestent ce raidissement linéaire ; avant le modèle de la tensegrité, il n'existait pas d'explication mécanique ou mathématique de ce comportement.

En 1993, Ning Wang et James Butler ont mis au point un dispositif permettant de déformer des molécules situées sur la membrane externe de cellules vivantes et de

mesurer simultanément les réactions cellulaires. Nous avons constaté qu'en augmentant la contrainte exercée sur les intégrines (les molécules qui traversent la membrane cellulaire et relient la matrice extracellulaire au cytosquelette interne), les cellules réagissent en augmentant leur résistance, tout comme les tissus. De plus, on rigidifie ou, au contraire, on assouplit les cellules en modifiant la pré-contrainte dans le cytosquelette, par exemple en changeant la tension des microfilaments contractiles.

En utilisant un modèle de tensegrité à base de bâtonnets et d'élastiques, nous avons montré que les cellules réagissent comme des structures de tensegrité (nous ignorons encore les détails des interactions). Tous les éléments structurels sont interconnectés d'un modèle

de tensegrité modifie d'eux-mêmes leur disposition en



10. DE NOMBREUSES STRUCTURES naturelles ont des formes géométriques. Sur la page de gauche, en haut, une partie du cytosquelette d'une cellule de mammifère et, en bas, un grain de pollen. Sur cette page, à gauche, un fullerène (buckyball) entourant un ion potassium ; en haut, un adénovirus ; à droite, un complexe enzymatique et, en bas, un organisme pluricellulaire dénommé Volvox.

réaction à une contrainte locale. Le raidissement linéaire s'explique alors : lorsque la force appliquée augmente, de plus en plus d'éléments se disposent dans la direction où s'exerce la contrainte.

Avec Dimitrije Stamenovic, à Boston, nous avons mis au point un modèle mathématique qui prédit le raidissement linéaire des tissus, des cellules et même des molécules. Nous utiliserons ce modèle pour faciliter la conception de matériaux nouveaux dotés de cette propriété et qui seraient utiles pour des applications telles que des revêtements protecteurs et des organes artificiels.

Les travaux de N. Wang sur la déformation magnétique et les expériences de traction de A. Maniotis ont montré que des contraintes appliquées à des récepteurs de la surface cellulaire qui sont associés au métabolisme – et non à l'adhérence – ne sont pas répercutées à l'intérieur de la cellule. Ces études confirment que les forces mécaniques sont transmises à l'intérieur des cellules, via des trajets moléculaires spécifiques ; désormais, nous comprenons mieux comment les cellules détectent les stimulations mécaniques qui régulent le développement des tissus. Ces perspectives éclairent tout un ensemble de phénomènes, de l'activation d'un muscle soumis à une ten-

sion jusqu'à la croissance des racines des plantes soumises à la gravité.

Les formes géodésiques moléculaires

Bien que les modèles de tenségrité aient été étudiés de nombreux comportements cellulaires, une énigme subsistait. Nombre de cellules s'étalent et s'aplatissent alors qu'elles sont démunies de microtubules, ces tiges travaillant à la compression et qui jouent un rôle clef dans le modèle. Si, en leur absence, les cellules vivantes peuvent passer d'une forme sphérique à une forme aplatie, comment la tenségrité se manifeste-t-elle ? En procédant par modélisation grossière, je découvris avec surprise que le réseau de microfilaments est lui-même une structure de tenségrité.

Dans le cytosquelette d'une cellule, les microfilaments contractiles forment un réseau qui se réorganise localement selon différentes formes, tels de grands faisceaux ou des treillis de triangles. Pour étudier le mécanisme qui règle cette réorganisation, j'ai modélisé le réseau de microfilaments par une armature polyédrique constituée de pailles et comprenant six triangles et quatre carrés (voir la figure 9). Un seul élastique, enfilé à travers toutes les pailles et noué aux

extrémités, solidarise les pailles. Je supposais que chaque paille du modèle représente un microfilament contractile capable d'exercer une tension mécanique en se raccourcissant. On sait que les microfilaments contractiles exercent une résistance d'autant plus grande qu'ils sont plus courts. Ainsi, dans le modèle, l'élastique interne « fédérateur » simulait la tension continue exercée dans la structure tout entière par le raccourcissement de tous ces filaments.

Ce modèle de pailles modélisait une unité cytosquelettique modulaire reliée dans toutes les directions à d'autres modules similaires pour former une cellule soignée approximativement sphérique. La question à laquelle je tentais de répondre était : qu'arrivait-il à cette armature quand la cellule se collait à une surface rigide ?

Les cellules se fixent en établissant des liaisons avec les molécules de surface de la matrice extracellulaire. À vrai dire, les cellules ne sont pas « collées » à la matrice, mais « soudées par points » en des sites spécifiques. Les microfilaments contractiles réagissent

11. PARMI LES STRUCTURES précontraintes en porte-à-faux régies par la tenségrité figurent le système de muscles et d'os du cou de la girafe et, à droite, la sculpture à baguettes et à câbles de Kenneth Snelson.



Jim et Julie Butten, Photo Researchers, Inc.

à cet ancrage en se raccourcissant et en accroissant la tension dans tout le treillis. Les modèles à pailles laissent présumer que l'accroissement de la tension résultant de l'ancrage conduirait les filaments contractiles individuels (les carrés du modèle) à s'auto-assembler en faisceaux linéaires tendus entre les sites d'adhérence, où des intégrines fixent la cellule à la matrice. En fait, lorsque des cellules s'étalent sur une surface, les microfilaments contractiles s'alignent pour former des faisceaux.

Au contraire, au sommet de la cellule, il n'y a pas de substrat adhésif susceptible de s'opposer à la traction des microfilaments qui se raccourcissent. Là, seules la traction et la résistance exercées par les filaments voisins s'opposent à la contraction de chaque microfilament. Il y a déjà plusieurs années, Buckminster Fuller a montré qu'une traction vers l'intérieur et une déformation conduisent ce type de structure polyédrique à subir ce qu'il avait appelé une transformation «désarticulée» : l'armature très souple à base de carrés et de triangles se transforme en une structure de tensegrité totalement triangulée.

En reliant plusieurs modèles réalisés en pailles, je constatai que chaque module se contracte progressivement pour constituer une armature géo-

désique compacte, formée alternativement d'octaèdres et de tétraèdres. Dans une cellule, la contraction des réseaux de microfilaments reliés à la base de la cellule devrait tirer cette armature vers le bas, au-dessus du noyau sphérique, la transformant ainsi en un dôme triangulé, plus précisément en un dôme géodésique.

Elias Lazarides, Mary Osborn et Klaus Weier, de l'Institut Max Planck de Göttingen, ont observé ces transformations dans la région du cytoplasme au-dessus du noyau de cellules étalées. Cette confirmation de l'existence d'un dôme géodésique à l'intérieur du cytosquelette est concluant : les cellules utilisent vraiment des architectures de tensegrité pour mettre en forme leur cytosquelette.

Un modèle universel?

La structure géodésique observée à l'intérieur du cytosquelette est un exemple classique d'un motif naturel existant à toutes les échelles. Des groupes sphériques d'atomes de carbone baptisés fullerènes, ainsi que des virus, des enzymes, des organites, des cellules et même de petits organismes, ont des formes géodésiques. Pourquoi? À mon avis, la répétition de ce motif constitue une preuve visuelle de l'existence de règles de base pour

l'auto-assemblage. En particulier, toutes les entités se stabilisent en trois dimensions de la même façon, à savoir en réarrangeant leurs éléments pour minimiser l'énergie et la masse, à l'aide de tensions exercées de façon continue et de compressions locales, c'est-à-dire au moyen de la tensegrité.

L'assemblage des virus, les plus petites formes de vie sur Terre, met en jeu des liaisons entre un grand nombre de protéines qui s'assemblent en une enveloppe virale géodésique renfermant le matériel génétique. Lors de la formation d'un virus, des extensions linéaires de protéines chevauchent les prolongements voisins d'autres protéines, pour constituer une armature géodésique triangulée à l'échelle nanométrique. Chaque joint de cette armature se stabilise, car les forces d'attraction intermoléculaires (les liaisons hydrogène) équilibrent les forces exercées par les prolongements protéiques qui résistent aux compressions et aux déformations.

Le même schéma de base se retrouve dans les fullerènes, si ce n'est que les blocs de construction sont des atomes et non des protéines. En effet, 60 atomes de carbone forment une sphère géodésique recouverte de 20 hexagones alternant avec 12 pentagones : c'est le motif des ballons de football. Les 90 liaisons carbone-



Kenneth Snelson

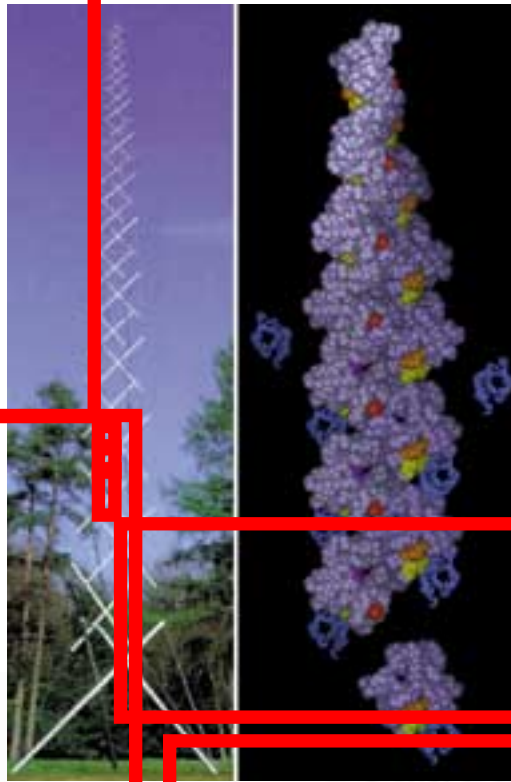
carbone d'un fullerène sont les tiges d'une sphère de tensegrité.

Il est cependant moins évident que ces mêmes règles de construction s'appliquent à des structures irrégulières, comme de nombreuses molécules biologiques dont la forme n'est pas une géodésique. Les protéines, qui imposent la structure des cellules et plusieurs de leurs fonctions, sont de longues chaînes d'acides aminés. De petites régions de ce squelette d'acides aminés se replient en hélices qui se stabilisent du fait de l'équilibre entre les forces d'attraction des liaisons hydrogène et les forces qui permettent aux protéines de résister à la compression : ces régions hélicoïdales se stabilisent grâce à la tensegrité, comme n'importe quelle molécule hélicoïdale telle que l'ADN.

L'organisation d'une protéine est aussi un assemblage hiérarchisé. Les petites régions qui sont résistantes en raison de leur disposition en hélice sont séparées par des séquences d'acides aminés qui se comportent comme des articulations flexibles. Ces régions se replient (en raison des liaisons hydrogène), afin de stabiliser la molécule entière. Les hélices raidies peuvent être localement comprimées, même si les forces sont équilibrées dans l'ensemble de la molécule précontrainte.

Comme une force, même localisée, peut modifier la forme globale d'une structure de tensegrité, la liaison d'une molécule à une protéine peut imposer un réarrangement complet des différentes régions hélicoïdales sur toute la longueur de la protéine. Par exemple, lorsqu'une molécule portant un signal se lie à un récepteur qui traverse la membrane cellulaire, cette liaison peut modifier la conformation à l'extrémité opposée du récepteur. Ces changements déforment à leur tour des protéines adjacentes et déclenchent une série de restructurations moléculaires à l'intérieur de cette cellule. C'est ainsi que les cellules détectent les informations qui leur parviennent et y agissent.

Ainsi, des molécules aux os, aux muscles ou aux tendons, la tensegrité est le système de construction privilégié de la nature. Seule la tensegrité peut expliquer, par exemple, comment, chaque fois que vous bougez



12. CETTE STRUCTURE de tensegrité verticale et ce modèle moléculaire de microfilament du cytosquelette tirent leur solidité du même principe : ils se stabilisent par équilibrage des compressions et des tensions. Dans le tissu d'un œil de mouche (en arrière-plan), les cellules ont une disposition géodésique pour la même raison : elle garantit une tension globale et d'une compression locale.

un bras, votre peau s'étire, votre matrice extracellulaire s'étend, vos cellules se déforment, et comment les molécules interconnectées qui forment l'architecture interne des cellules ressentent cette sollicitation, le tout sans discontinuité.

La tensegrité peut même expliquer comment tous ces phénomènes sont aussi parfaitement ordonnés dans une créature vivante. À l'Université Johns Hopkins, Donald Coffey et Kenneth Pienta ont découvert que les structures de tensegrité fonctionnent comme des oscillateurs harmoniques couplés. L'ADN, les chromosomes, les filaments du cytosquelette, les canaux ioniques membranaires, de même que les cellules entières et les tissus vibrent selon des fréquences de résonance caractéristiques. La répartition des forces au sein d'un réseau de tensegrité couple les éléments du système et les «accorde» mécaniquement, comme s'il n'y avait qu'un élément unique.

Si les variations dans l'ADN sont génératrices de diversité biologique, les gènes sont un produit de l'Évolution, et non la cause qui la dirige. En

fait, des formes géodésiques similaires à celles observées dans les virus, les enzymes et les cellules existent déjà dans le monde inorganique des cristaux et des minéraux, bien avant que l'ADN n'existe. Même les molécules d'eau ont une structure géodésique.

Conséquences pour l'Évolution

Comment des constituants inorganiques ont-ils évolué en molécules organiques et en cellules ? Question pertinente. Après tout, en ce qui concerne la façon dont des propriétés nouvelles se manifestent, l'auto-assemblage des molécules en organites ou des cellules et tissus n'est pas très différente de l'organisation des atomes en composés. Par exemple, le sodium, qui est un métal explosif, et le chlore, qui est un gaz toxique, se combinent pour former du chlorure de sodium, dont une propriété inattendue est son utilité comme sel de table. Le principe qui importe ici est la façon dont une structure se forme et assure la cohésion de ses constituants ; cette caractéristique régit le comportement de la structure.

Toute matière est soumise aux mêmes contraintes spatiales, indépendamment de l'échelle ou de la position. Tant donné ces contraintes, la tensegrité constitue alors le principe de construction le plus économique et le plus efficace à l'échelle moléculaire, à l'échelle macroscopique et à toutes les échelles intermédiaires. Peut-être les structures de tensegrité entièrement triangulées ont-elles été sélectionnées au cours de l'Évolution en raison de leur efficacité structurelle, associant haute résistance mécanique et économie de matériau. La flexibilité des structures de tensegrité précontraintes est sans doute l'avantageuse parce qu'elle leur permet de prendre diverses formes. Par exemple, si une molécule ou une cellule est apte à se transformer, à une température ou à une pression donnée, en une forme plus stable ou plus efficace sur le plan métabolique, sa durée de vie en est prolongée. Elle peut alors mieux interagir avec d'autres entités similaires pour donner de nouveaux auto-assemblages.

Les chercheurs sont maintenant convaincus que l'évolution biologique a commencé dans des couches d'argile plutôt que dans la mer primordiale. Il est intéressant de noter que l'argile consiste en un réseau poreux d'atomes disposés selon les règles géodésiques au sein de formes octaédriques et tétraédriques. Comme ces octaèdres et ces tétraèdres ne sont pas fortement compactés, ils peuvent bouger et glisser les uns par rapport aux autres. Cette souplesse, semble-t-il, permet à l'argile de catalyser un grand nombre de réactions chimiques, notamment celles qui ont pu produire les premiers éléments de construction de la vie organique.

Avec le temps, différents ensembles moléculaires se sont auto-assemblés pour former les premières structures ayant une fonction spécifique – les précurseurs des organites actuels –, qui se combinèrent pour créer les premières cellules. Ces cellules produisirent elles-mêmes des protéines qui s'auto-assemblèrent pour donner des supports d'ancrage des matrices extracellulaires, qui, à leur tour, se sont auto-assemblées en tissus pluricellulaires. Des organes se développèrent par auto-assemblage de tissus, et des organismes complexes firent leur apparition par combinaison et remodelage progressif d'organes différents. Le développement d'un embryon à partir d'un spermatozoïde et d'un ovule récapitule toutes ces étapes d'auto-organisation.

L'apparition de l'ADN et des gènes donna naissance à un nouveau mécanisme pour engendrer une diversité structurelle qui accéléra l'Évolution. Pendant tout ce temps, les règles défi-

nissant le processus d'auto-assemblage hiérarchique restèrent pratiquement inchangées. Il n'est donc pas surprenant que la disposition générale des os et des muscles soit extraordinairement voisine chez *Tyrannosaurus rex* et chez *Homo sapiens*, que les animaux, les insectes et les plantes doivent tous aux contraintes la stabilité mécanique de leurs organismes et que les formes géodésiques telles qu'hexagones, pentagones et spirales soient omniprésentes dans les systèmes naturels.

Ces principes de construction sont-ils universels? S'appliquent-ils à des structures qui sont façonnées par le jeu de forces de très grande ou de très petite convergence? Nous ne le savons pas. K. Snelson a cependant proposé un étonnant modèle d'atomes fondé sur la ténacité, et qui prolonge le modèle proposé en 1923 par le physicien français Louis de Broglie. Buckminster Fuller lui-même imagina que le Système solaire est une structure composée de multiples anneaux non déformables dont le mouvement planétaire est stabilisé par une attraction gravitationnelle continue. Le fait que notre univers en expansion contienne de gigantesques amas de galaxies liées par la gravitation et des trous noirs isolés qui sont le siège, localement, d'énormes forces de compression nous conduit à nous interroger. Après tout, il n'y a peut-être dans la nature qu'un seul thème directeur. Comme le suggérait, au début du XX^e siècle, le zoologiste écossais D'Arcy Thompson, en se référant à Galilée qui, lui-même, citait Platon : le Grand Livre de la Nature se lit-il écrit dans le langage de la géométrie?

Donald E. INGBER est professeur de pathologie à l'Université Harvard. Il est le fondateur de la Société *Molecular Geodesics Inc.* qui conçoit des matériaux nouveaux dont les propriétés sont inspirées des structures biologiques.

Donald L. D. CASPAR, *Movement and Self-Contractions in Protein Assemblies in Biophysical Journal*, vol. 32, n° 1, pp. 103-138, octobre 1980.

Clay Minerals and the Origin of Life, sous la direction de A. Graham Cairns-Smith et Hyman Hartman, Cambridge University Press, 1986.

Donald E. INGBER, *Cellular Tensegrity: Defining New Rules of Biological Design That Govern the Cytoskeleton*, in *Journal*

of Cell Science, vol. 104, n° 3, pp. 613-627, mars 1993.

Ning WANG, James P. BUTLER et Donald E. INGBER, *Mechanotransduction across the Cell Surface and through the Cytoskeleton*, in *Science*, vol. 260, pp. 1124-1127, 21 mai 1993.

D'Arcy W. THOMPSON, *Forme et croissance*, Seuil-CNRS Éditions, 1994.

Christopher S. CHEN, Milan MRKSICH, Sui HUANG, George M. WHITESIDES et Donald E. INGBER, *Geometric Control of Cell Life and Death*, in *Science*, vol. 276, pp. 1425-1428, 30 mai 1997.

Donald E. INGBER, *Tensegrity: The Architectural Basis of Cellular Mechanotransduction*, in *Annual Review of Physiology*, vol. 59, pp. 575-599, 1997.

L'enfouissement sous-marin des déchets radioactifs

CHARLES HOLLISTER • STEVEN NADIS

Peut-on stocker les déchets nucléaires dans les sédiments des fonds océaniques ? Les conditions sont favorables, mais des études restent à faire

Les plaines abyssales, au centre des grandes plaques océaniques, semblent être parmi les terrains les moins valorisables de la planète. Le socle rocheux y est couvert d'une boue noire et pâteuse sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Dénuées de végétation et très peu fréquentées par la faune océanique, ces régions sont en outre dépourvues de richesses minérales.

Toutefois, nos sociétés pourraient y trouver la solution de deux problèmes lancinants : on pourrait apparemment y enfouir les déchets radioactifs issus de l'industrie électronucléaire, ainsi que les matériaux provenant du démantèlement des bombes atomiques. Les problèmes posés par ces deux types de déchets sont différents, mais l'enfouissement sous-marin serait une solution commune et définitive.

Des déchets radioactifs, barreaux de combustible usagé des centrales nucléaires et boues toxiques entreposées sur les sites de production d'armes nucléaires, ont été accumulés depuis plus d'un demi-siècle dans l'attente d'une méthode de stockage permanent. Aux États-Unis, 30 000 tonnes de combustible usagé attendent dans les bassins des centrales nucléaires, et cette quantité s'accroît d'environ 2 000 tonnes par an. Le dépôt de déchets nucléaires qui se construisait à Yucca Mountain, dans le Nevada, est aujourd'hui bloqué : il ne devrait pas ouvrir avant 2015. En France, les centrales nucléaires produisent environ 1 200 tonnes de combustible usagé par an ; on évalue qu'en 2020, il y aura 57 000 mètres cubes de déchets de moyenne activité et 5 000 mètres cubes de déchets de haute activité.

Le problème du plutonium et de l'uranium issus du démantèlement des armes nucléaires est encore plus grave : qu'adviendrait-il si de tels matériaux tombaient entre les mains d'individus ou d'états mal intentionnés ? Alors qu'une seule tonne de plutonium suffit à la fabrication de centaines de têtes nucléaires, les États-Unis et la Russie ont accumulé chacun plus de 100 tonnes de plutonium de qualité militaire, 50 tonnes de plutonium moins pur et des centaines de tonnes d'uranium très enrichi.

Deux méthodes de traitement des déchets sont aujourd'hui mises en œuvre, mais aucune n'apporte de solution définitive. La première est la vitrification : un mélange de plutonium militaire et d'autres déchets radioactifs est coulé dans un verre ou dans une céramique qui empêchent la fuite des atomes radioactifs dans l'environnement et qui interdisent quasiment l'extraction du plutonium. Cette vitrification ne bloque toutefois pas les radiations : les déchets vitrifiés restent dangereux tant qu'ils ne sont pas entreposés dans un site approprié.

Aux États-Unis, une seule usine de vitrification a été construite, et même si elle fonctionnait à pleine capacité, elle ne produirait chaque jour qu'un seul cylindre de verre contenant à peine plus de 20 kilogrammes de plutonium, pour un coût unitaire de huit millions de francs. À ce coût, on devra ajouter celui du stockage.

La seconde méthode est la fabrication d'un combustible mixte pour les centrales nucléaires, par le mélange d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium : le combustible MOX. Cette méthode est utilisée en France. Aux

États-Unis, l'utilisation d'un tel combustible nécessiterait de profondes transformations des centrales nucléaires. De toutes façons, les réacteurs à oxyde mixte produisent d'autres déchets radioactifs.

Les déchets existent : il faut les traiter

Le gouvernement américain devra bientôt prendre une décision : depuis 15 ans, les sociétés qui exploitent des centrales nucléaires aux États-Unis paient en avance le ministère américain de l'Énergie pour le stockage ou le retraitement de leurs déchets, et les tribunaux viennent d'ordonner à ce ministère de s'acquitter de ses obligations contractuelles en acceptant, dès cette année, les barreaux de combustible usagé des centrales nucléaires. Que deviendront ces matériaux ? Le Sénat américain a voté des crédits pour la construction d'un site de stockage temporaire à Yucca Mountain, mais le président Clinton s'oppose à cette mesure provisoire.

Nous suggérons de ne rien décider dans l'urgence et, surtout, de ne prendre aucune décision irréversible. On devra se contenter pour l'instant de transférer, selon les besoins, le combustible usagé, actuellement entreposé dans des bassins, vers des sites de stockage à sec et de colmater les conteneurs de déchets radioactifs sur les sites militaires. On doit laisser le temps aux scientifiques et aux ingénieurs d'explorer en détail les méthodes possibles de stockage permanent.

Certains ont proposé d'envoyer les déchets nucléaires dans l'espace, voire dans le Soleil, mais la plupart des

spécialistes pensent qu'il serait plus sûr et moins coûteux de les stocker sous terre. Pourquoi, toutefois, la recherche de sites de dépôt convenables a-t-elle été quasi restreinte aux continents? Les fonds océaniques, soit 70 pour cent de la surface de la planète, offrent pourtant plus de possibilités.

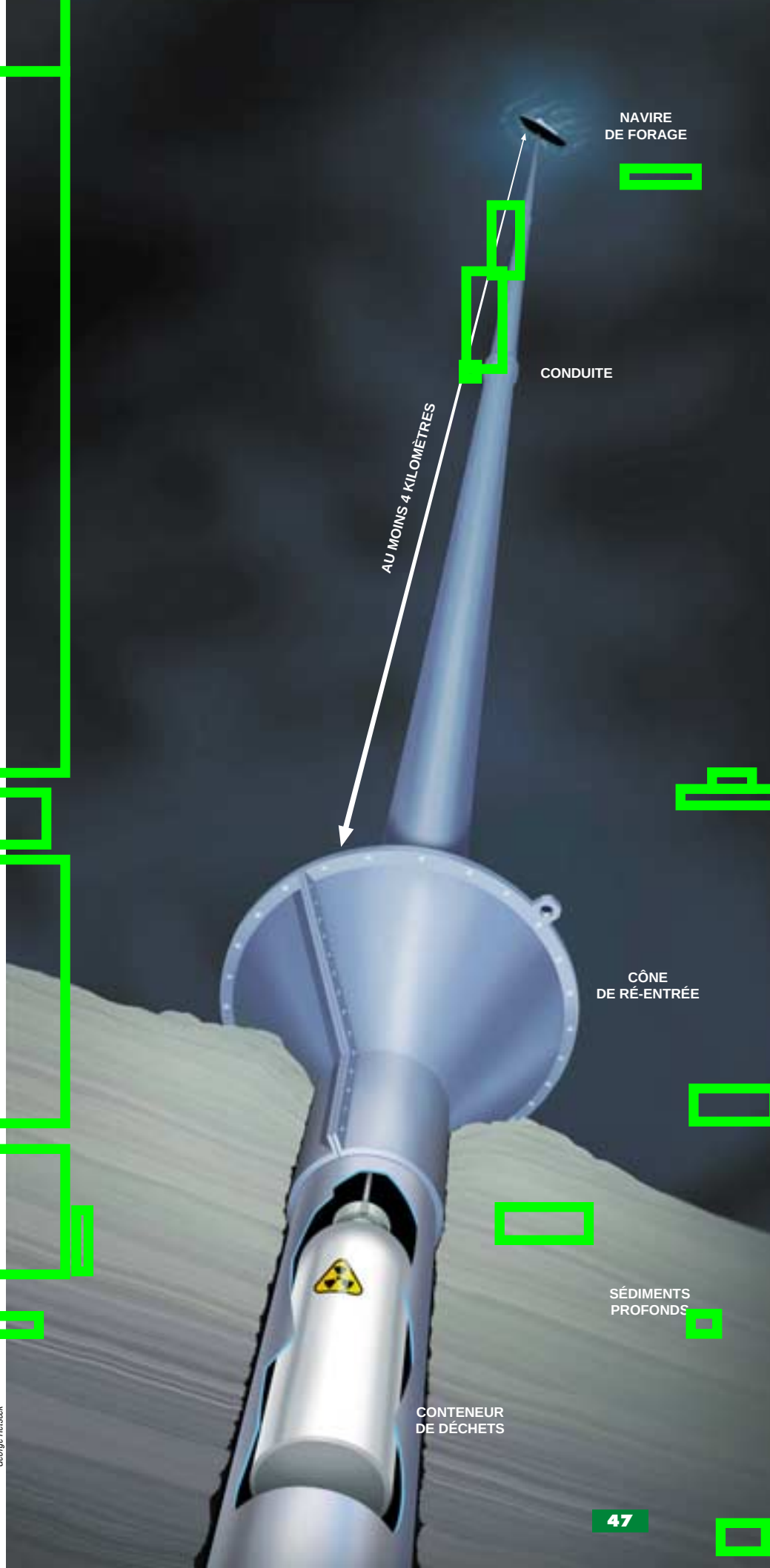
Nous ne proposons pas un stockage dans les fosses océaniques, à la jonction de deux plaques tectoniques : ce sont des régions très instables, et nous n'avons aucune idée de ce que deviendraient les conteneurs de déchets que l'on y déposerait. En revanche, au centre des plaques tectoniques océaniques, le terrain est l'un des plus stables de la Terre et l'un de ceux dont on connaît le mieux l'avenir. Les prélèvements de carottes sédimentaires ont montré que de vastes zones, dans les océans Atlantique et Pacifique, sont géologiquement inertes depuis 50 à 100 millions d'années. Les déchets qui y seraient enfouis seraient à l'abri des éruptions volcaniques, des séismes et de toutes les perturbations liées aux mouvements des plaques tectoniques. En outre, les boues argileuses qui constituent les sédiments ont des propriétés favorables : elles sont peu perméables à l'eau, elles adsorbent les éléments radioactifs des déchets, et elles combleraient toute fissure qui se développerait autour d'un conteneur de déchets. Ces boues pourraient accueillir des déchets vitrifiés ou non. Aucune formation géologique continentale connue n'offre tous ces avantages.

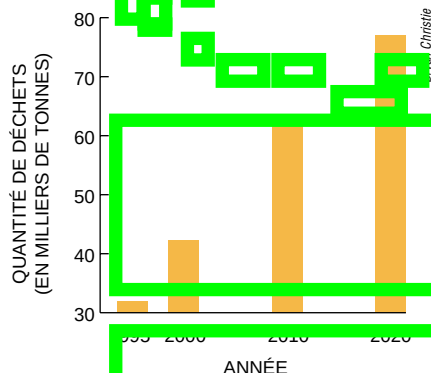
Les techniques pétrolières au service du nucléaire

Les déchets ne seraient pas déposés sur le fond océanique, mais enfouis à plusieurs centaines de mètres de profondeur dans les sédiments (le fond océanique étant lui-même à cinq kilomètres sous la surface de la mer). Les techniques de forage profond, utilisées depuis des décennies par l'industrie pétrolière pour la prospection des sédiments proches des côtes, permettraient de réaliser cette opération. Des puits cylindriques seraient creusés à plusieurs

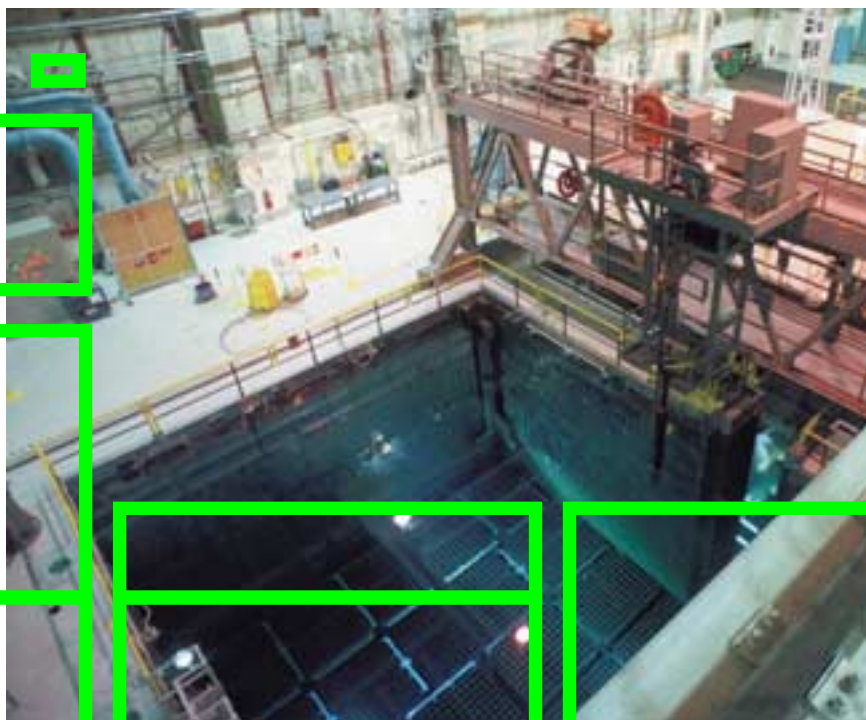
1. UN TUBE D'ACIER, descendu d'un bateau, serait utilisé pour le forage de puits dans les limons océaniques, puis pour la descente des conteneurs de déchets nucléaires. Les déchets seraient ensuite recouverts de boue sous-marine argileuse qui isolerait efficacement les matériaux radioactifs.

George Retzack





2. LA QUANTITÉ DE COMBUSTIBLE nucléaire usagé va plus que doubler aux États-Unis d'ici 2020, même si aucune nouvelle centrale nucléaire n'est construite (graphe). En l'absence d'une solution de stockage permanent, ce combustible usagé est entreposé dans des bassins de refroidissement (ci-dessus).



Mark Cowan, AP Photo

centaines de mètres les uns des autres, pour faciliter les manœuvres ; les conteneurs de plutonium ou d'autres déchets radioactifs y seraient ensuite descendus, accrochés à des câbles. Chaque conteneur serait enfin recouvert de boue, sur 20 mètres d'épaisseur au moins, et l'on empilerait ainsi plusieurs conteneurs dans le même puits.

Les conteneurs de déchets se désagrégeraient au bout de quelques milliers d'années, mais, dans les sédiments océaniques, les argiles boueuses, qui se lient fortement au plutonium et à de nombreux autres éléments radioactifs, éviteraient que ces derniers ne s'échappent dans l'océan. On a mesuré en laboratoire que le plutonium (et d'autres éléments radioactifs plus lourds que l'uranium) enfoui dans l'argile ne se déplacerait pas de plus de quelques mètres en 100 000 ans. Si l'on enfouit les déchets assez profondément, ils ne remonteront au niveau du fond océanique que lorsque leur radioactivité aura disparu ou sera devenue inférieure à la radioactivité naturelle de l'eau de mer.

Malgré ces résultats prometteurs, toute recherche a cessé dans ce domaine depuis 1986, quand les États-Unis, principaux bailleurs de fonds, se sont concentrés sur le stockage terrestre. En 1987, le gouvernement américain a décidé de consacrer tous les crédits au site de stockage de Yucca Mountain. Malheureusement, même si ce dépôt est un jour utilisé, il ne pourra pas accueillir tous les déchets radioactifs d'origine civile et militaire qui se seront accumulés d'ici là, sans compter ceux que les centrales nucléaires continueront de produire.

Les responsables politiques devront se rendre à l'évidence : l'étude d'autres modes de stockage est nécessaire.

À quelles questions des recherches sur le stockage sous-marin devraient-elles répondre ? D'abord, nous devons être certains que les produits radioactifs resteront assez longtemps dans les couches sédimentaires profondes où on les déposera. Les vitesses de diffusion du plutonium et des autres radioéléments sont-elles aussi faibles dans les boues sédimentaires qu'en laboratoire ? Quelles sont les vitesses de migration de l'uranium et de quelques autres éléments des déchets radioactifs, que nous ne connaissons pas ? La chaleur dégagée par la radioactivité des déchets modifie-t-elle la structure et les propriétés des boues argileuses ? Apparemment, des formes vivantes multicellulaires mobiles vivent seulement dans le premier mètre d'épaisseur des limons abyssaux ; en dessous, aucun organisme ne semble susceptible de transporter des substances radioactives vers la surface. Cette hypothèse doit être vérifiée.

Les déchets resteraient-ils au fond ?

Nous ne savons pas non plus très bien ce qui se passerait si des matériaux radioactifs remontaient sur le fond océanique. À quelle vitesse des composés radioactifs relativement solubles (tels

ceux du césium et du technétium) se dilueraient-ils jusqu'aux concentrations ambiantes ? Et que deviendraient les éléments peu solubles, tel le plutonium ? Aujourd'hui, nous ne connaissons pas de courant assez fort pour transporter des particules d'argile liées à du plutonium jusqu'à la surface de l'océan : ces matériaux resteraient sur le lit océanique, à moins que des créatures se nourrissant sur le fond des océans ne les ingèrent.

Le transport des déchets nucléaires en haute mer pose d'autres problèmes : nous devons prévoir des conteneurs de déchets facilement récupérables au fond de l'océan, au cas où un bateau coulerait ou, plus simplement, perdrait accidentellement sa cargaison. Cette possibilité de récupération devrait d'ailleurs être étendue aux conteneurs enfouis dans les sédiments : nous aurons peut-être un jour besoin de récupérer des matériaux nucléaires, tel le plutonium. On n'utiliserait alors les mêmes techniques de forage que pour l'enfouissement, en s'aidant de techniques de positionnement par satellite. Nous n'avons pas à craindre que cette possibilité de récupération soit exploitée pour le détournement de matériaux radioactifs : aujourd'hui, aucun État non nucléaire ne maîtrise les techniques nécessaires à cette récupération. En outre, la réalisation clandestine d'une telle opération serait quasi impossible.

Le coût des recherches nécessaires pour évaluer l'intérêt du stockage océanique atteindrait peut-être un milliard et demi de francs, mais il serait dérisoire par rapport aux 12 milliards de francs déjà dépensés pour l'évaluation du site de Yucca Mountain (une dizaine d'autres milliards seront sans doute nécessaires avant l'achèvement des études et la prise de décisions définitives, alors qu'aucune construction, excepté des tunnels exploratoires, n'a encore commencé). Pourtant, aucun État ne semble vouloir investir dans une quelconque recherche sur le stockage sous-marin.

Pourquoi cette attitude, alors que l'Académie des sciences américaine déclarait en 1994 que le stockage du plutonium militaire au fond des océans était la «principale solution concurrente des dépôts géologiques souterrains» et jugeait que sa mise en œuvre était «potentiellement rapide et d'un coût faible à modéré»? Une partie de l'opinion publique semble hostile à cette solution, mais les habitants et les élus du Nevada sont aussi hostiles au projet de Yucca Mountain : il serait

sans doute plus facile de faire accepter des dépôts sous-marins, loin de toute habitation humaine, que des dépôts terrestres.

Une opposition irrationnelle

En 1997, le stockage sous-marin de déchets radioactifs a été la cible d'une attaque législative aux États-Unis : un projet de loi proposé à la Chambre des représentants propose son inter-



3. UN NAVIRE DE FORAGE PROFOND (ici, celui du Programme de forage océanique) creuserait des puits dans le fond de l'océan, y insérerait des conteneurs de déchets nucléaires et les scellerait avec de la boue.

diction et celle du financement gouvernemental de toute activité qui y serait associée, y compris la recherche. L'interdiction du stockage sous-marin est compréhensible tant que nous ne sommes pas certains qu'il est inoffensif pour l'homme et pour l'environnement, mais l'interdiction de toute recherche sur une technique prometteuse d'élimination des déchets nucléaires est insensée.

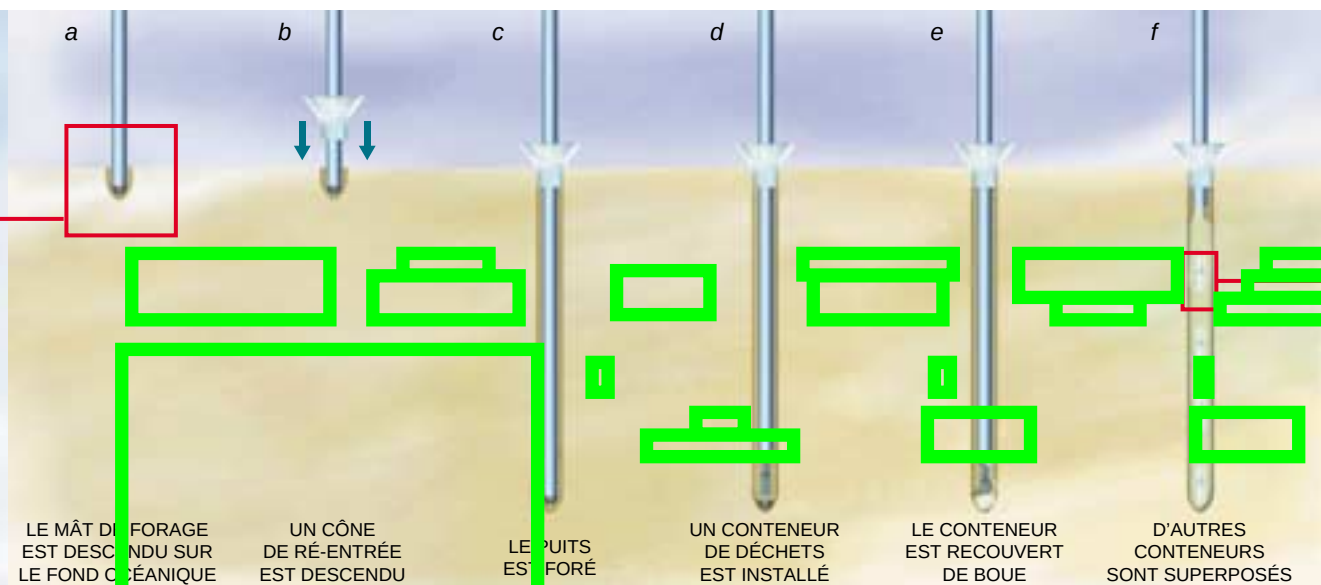
Le stockage sous-marin est également menacé par la législation internationale. En 1996, lors d'une rencontre organisée par l'Organisation maritime internationale, les signataires de la Convention de Londres sur les déchets ont interdit le stockage des matériaux nucléaires sous les fonds océaniques. Cette décision doit encore être ratifiée par les différents États, ce qui prendra sans doute plusieurs années, mais nous la contestons. Le stockage réglementé de déchets nucléaires ne peut être apparenté à une décharge sauvage.

Heureusement, même si l'interdiction devient effective, la Convention de Londres permet sa révision

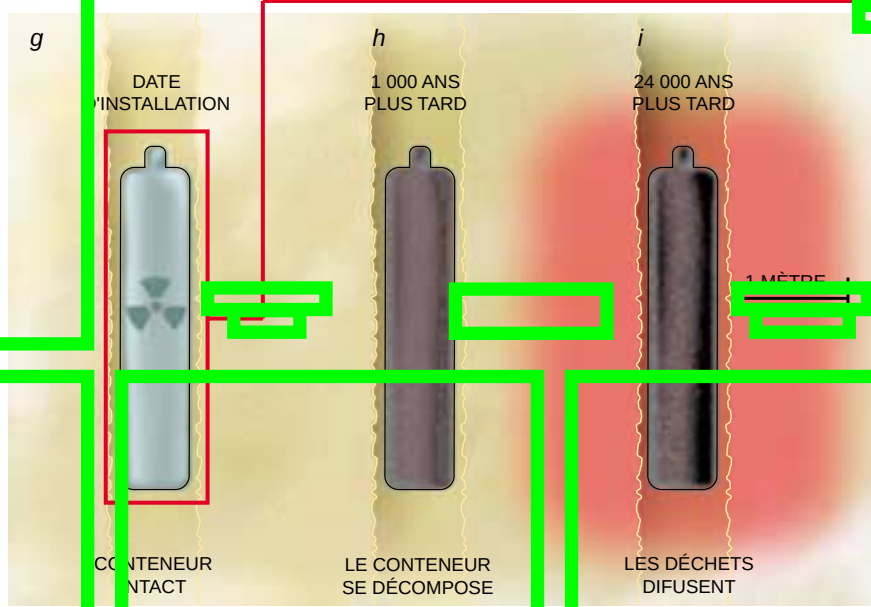


4. TOUS LES FONDS SOUS-MARINS ne conviennent pas au stockage des déchets nucléaires. Les zones où le lit de l'océan est à moins de quatre kilomètres de profondeur (en bleu clair) coïncident avec les dorsales où se créent les plaques tectoniques, et sont souvent couvertes de sédiments inappropriés. Dans d'autres régions, telles les frontières de plaques (en rouge), l'activité tectonique (ou le volcanisme) serait dangereuse. Les régions polaires (de latitude

supérieure à 60 degrés) sont à écarter, car leurs sédiments marins contiennent fréquemment des fragments rocheux emportés par les icebergs. Même après l'exclusion de ces régions et d'autres zones étendues, telles le pourtour des plateaux continentaux, où les sédiments sont assez épais pour abriter d'importantes quantités de pétrole ou de gaz, de vastes étendues de fonds marins (en bleu foncé) offrent encore d'amples possibilités pour enfouir des déchets nucléaires.



5. LE STOCKAGE SOUS-MARIN s'effectuerait en plusieurs opérations. Après la descente au fond d'une conduite de forage segmentée de plusieurs kilomètres de long (a), on adapterait un «cône de ré-entrée» autour de la conduite (b), qui guiderait jusqu'au puits une éventuelle autre conduite de forage. La rotation de la conduite, à laquelle serait fixé un trépan, creuserait un puits dans le fond de l'océan (c). Après le détachement du trépan, on descendrait dans la conduite un conteneur de déchets accroché à un câble (d). Après le comblement de cette partie du puits avec de la boue pompée à travers la conduite (e), on empilerait d'autres conteneurs (f), celui du dessus reposant à quelques dizaines de mètres au-dessous du fond sous-marin (g). Environ 1 000 ans après, le conteneur métallique serait corrodé, et les déchets radioactifs seraient au contact de la boue (h). Après 24 000 ans quand la moitié du plutonium 239 radioactif serait désintégrée, le plutonium et d'autres éléments lourds auraient migré vers l'extérieur sur moins d'un mètre (i).



Laurie Graze

dans 25 ans : on pourrait profiter de ce délai pour trouver les réponses aux questions scientifiques et techniques dont nous avons dressé la liste et pour évaluer plus précisément les coûts de ce mode de stockage. Si tout se passe bien, la Convention de Londres fournirait alors une base internationale pour un programme de stockage sous-marin.

Ce délai de 25 ans permettrait aussi de convaincre l'opinion publique. Aujourd'hui, des écologistes contestent toutes les mesures de traitement des déchets nucléaires, en particulier leur dépôt dans les océans. Cette position de principe n'est pas raisonnable. Les déchets nucléaires que nous avons produits, et que nous continuerons à produire, auront des conséquences sur l'environnement pendant quelques

centaines de milliers d'années, et il vaudrait mieux fonder les décisions que nous prendrons quant à leur devenir sur des données scientifiques solides.

À moins d'une avancée scientifique et technique miraculeuse, telle la découverte d'une méthode de transformation simple et rapide des éléments radioactifs en éléments stables ou celle d'un moyen sûr et peu coûteux de les envoyer dans le Soleil, nous

devrons trouver un endroit sur la planète où les entreposer. Les États ne devraient pas mettre tous leurs espoirs dans des projets de stockage souterrain. Ils doivent aux générations futures d'élargir leurs perspectives et d'explorer d'autres possibilités, y compris celles impliquant les épaisses couches de boue sous-marines.

Charles HOLLISTER est vice-président de l'Institut océanographique Woods Hole. Steven NADIS est écrivain.

C.D. HOLLISTER, D.R. ANDERSON et G.R. HEATH, *Subseabed Disposal of Nuclear Wastes*, in *Science*, vol. 213, pp. 1321-1326, 18 septembre 1981.

Management and Disposition of Excess

Weapons Plutonium, National Research Council, National Academy Press, 1994.

Steven NADIS, *The Sub-Seabed Solution*, in *Atlantic Monthly*, pp. 28-39, octobre 1996.

John F. AHEARNE, *Radioactive Waste : The Size of the Problem*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 6, pp. 24-29, juin 1997.

Climat de l'Europe et origine des Néandertaliens

JEAN-ACQUES HUBLIN

Il y a plus d'un million d'années, les premiers hommes sont arrivés en Europe. Isolés lors de plusieurs périodes glaciaires, ils sont les ancêtres d'un groupe humain différent des hommes modernes : les Néandertaliens.

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, le débat sur l'ancienneté de l'espèce humaine et sur ses origines animales fait rage. En Europe, centre intellectuel, économique et politique de la planète, il ne fait de doute ni pour les scientifiques ni pour les lecteurs de quotidiens que, si un homme a été diluvien a jamais existé, c'est d'abord sur le vieux continent qu'il faut en chercher les traces. Cet ancêtre mystérieux et inattendu, encore quasi inconnu, suscite l'engouement des artistes et des écrivains : dès l'origine, c'est un objet de fantaisie autant que d'étude. Dans une large mesure, un mythe scientifique se substitue au récit biblique de la Création. L'enthousiasme populaire est accompagné d'une «ruée vers l'os» : archéologues et paléontologues, mais aussi notaires, curés et instituteurs entreprennent la fouille des grottes de leur voisinage, découvrant, exploitant et, bien souvent, détruisant de nombreux sites.

C'est dans cette effervescence que les premiers hommes fossiles sont découverts. L'homme de Néandertal est identifié le premier, en 1856, dans le gisement de Feldhofer, près de Düsseldorf. Des fossiles comparables avaient déjà été exhumés en 1830 à Engis, en Belgique, et en 1848 à Gibraltar, mais leur véritable signification n'avait pas été reconnue. Au fil des découvertes, l'homme de Néandertal est décrit comme un être fruste, qui ne maîtrise que des techniques primitives. Assez vite, en 1868, un autre acteur des temps préhistoriques, qui ressemble beaucoup à l'homme actuel, est révélé : l'homme de Cro-Magnon

(du nom d'un petit abri sous roche éventré par les constructeurs du chemin de fer entre Agen et Les Eyzies).

Cette présence, sur un même territoire, de deux types humains différents soulève des questions qui n'ont cessé d'agiter la paléanthropologie pendant plus d'un siècle. Comment l'homme de Néandertal et l'homme de Cro-Magnon sont-ils apparentés? Le premier est-il l'ancêtre du second? Bien peu le pensent, et l'on recherche par conséquent les ancêtres des hommes modernes, d'abord en Europe, bien sûr, où les chercheurs européens sont si actifs et le matériel paléontologique si abondant.

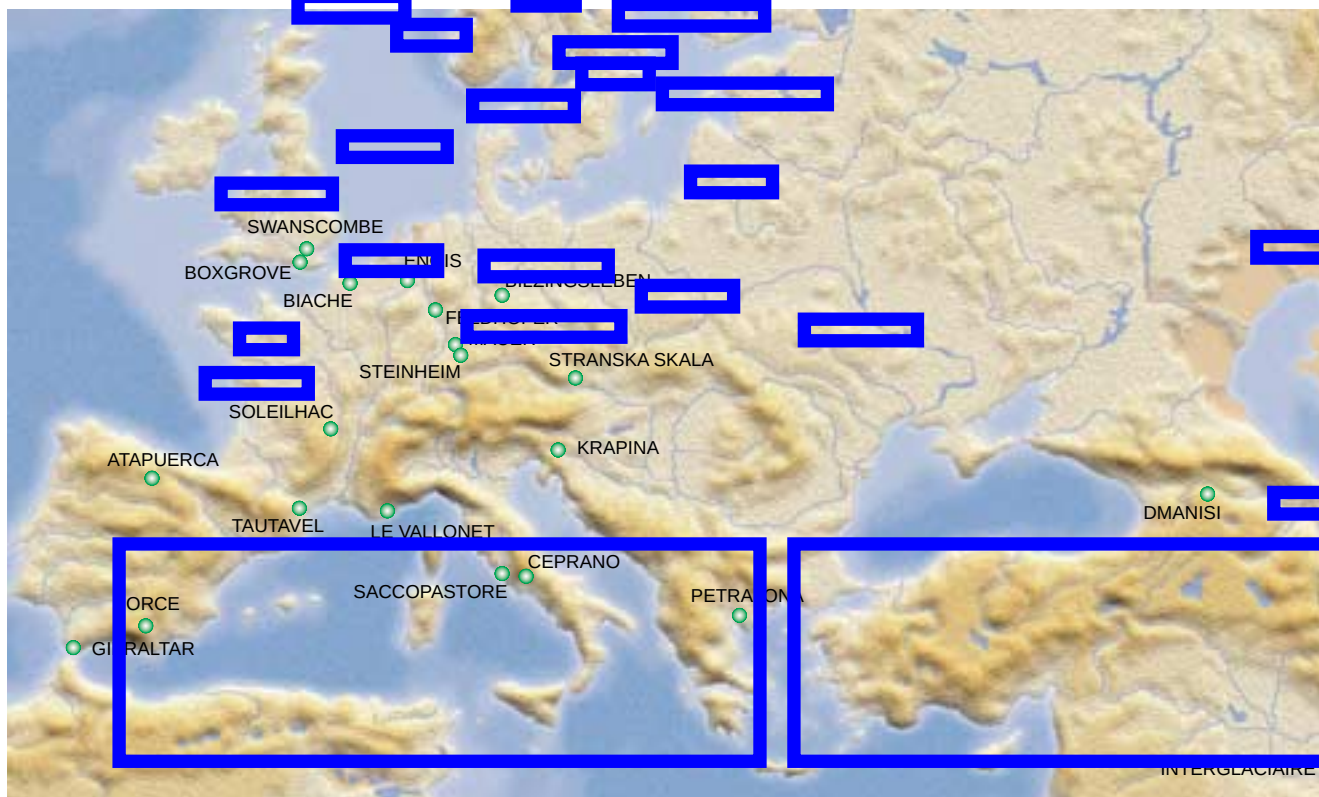
Nous ne savons aujourd'hui, les zones de climat tempéré et froid de l'Eurasie n'ont été peuplées que récemment, à l'échelle des temps géologiques, et elles sont restées à l'écart des principales étapes de l'évolution des Homini-dés qui se sont déroulées dans les régions tropicales de l'Afrique, puis de l'Asie. Comme la plupart des primates, les ancêtres de l'homme, apparus en Afrique, il y a plus de quatre millions d'années, puis les hommes archaïques qui se sont répandus jusqu'en Asie vivaient dans des milieux chauds : nos ancêtres ont longtemps été incapables d'étendre leur territoire aux latitudes moyennes et élevées.

Quand le peuplement de l'Europe a-t-il commencé et quel en fut le déroulement? Quelles relations existent entre les premiers habitants de l'Europe et les Néandertaliens? Enfin, quand et comment la spécificité de ces derniers est-elle apparue? Depuis quelques années, plusieurs découvertes spectaculaires de restes hu-

mans modernes ont montré que l'arrivée des premiers hommes sur notre continent a été plus précoce qu'on ne le pensait. Mais surtout, le rapprochement des données paléontologiques avec les fluctuations du climat depuis un million d'années permet l'établissement d'un scénario cohérent pour cette colonisation ainsi que pour l'apparition des Néandertaliens, les périodes de réchauffement climatique, qui ont favorisé la venue des hommes archaïques en Europe, ont été interrompues de plusieurs longues périodes de climat glaciaire ; ces dernières ont isolé et réduit les groupes humains, dont le génome s'est particulièrement adapté et qui sont progressivement devenus les Néandertaliens.

Cro-Magnon et Néandertal : deux morphologies

Les vestiges exhumés depuis 150 ans en Europe indiquent que, il y a 40 000 ans environ, l'Europe a été colonisée par des hommes semblables aux Européens d'aujourd'hui, quoique plus robustes : leur haute taille et leurs proportions corporelles semblables à celles d'Africains actuels témoignent de leur origine tropicale. Pour une part au moins, ils sont nos ancêtres directs (d'autres arrivants modernes leur ont succédé, en particulier au début du Néolithique, il y a environ 7 500 ans). L'arrivée de ces populations venues de l'Est, dont les hommes de Cro-Magnon sont les plus célèbres représentants, coïncide avec les plus anciennes traces d'art connues, sculptures sur os et peintures rupestres.



1. LES RÉGIONS D'EUROPE ACCESSIBLES À L'HOMME ont fortement varié au cours du dernier million d'années. Pendant les périodes glaciaires (*en haut*), les glaciers sur les montagnes et la calotte glaciaire du Nord-Ouest européen (*en blanc*) s'étendent ; sur une bonne partie du continent, le sol reste gelé en permanence ; le niveau des mers baisse, découvrant de nouveaux territoires le long des côtes ; la mer Caspienne s'étend vers le Nord et vers l'Ouest, bloquant les communications avec l'Asie. Les populations humaines, cantonnées dans quelques zones refuges, étaient

peu nombreuses et isolées. On a figuré ici les conditions lors du dernier maximum glaciaire, il y a 18 000 ans. La calotte glaciaire s'est parfois étendue plus au Sud, par exemple au cours de la glaciation longue et humide il y a 130 000 à 190 000 ans (*ligne blanche*). Pendant les périodes interglaciaires, l'Europe a l'aspect que nous lui connaissons aujourd'hui (*en bas*). On a indiqué la position des sites archéologiques mentionnés dans le texte (leur distribution ne reflète pas l'occupation de l'Europe par les populations humaines aux différentes périodes concernées).



2. LES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES du crâne des Néandertaliens (ici pour un homme adulte découvert à La Ferrassie, en Dordogne) les distinguent sans ambiguïté des hommes modernes.

Ces envahisseurs ne sont toutefois pas les premiers Européens. Il y a 30 000 ans à l'époque où ils peignaient félins, chevaux et rhinocéros dans la grotte Chauvet, en Ardèche, les derniers Néandertaliens survivaient encore dans des zones reculées, tel le Sud de l'Espagne. Morphologiquement différents des hommes modernes, ils étaient issus de populations qui avaient évolué en Europe depuis plusieurs centaines de milliers d'années.

Les hommes de Néandertal sont le groupe d'hommes fossiles le mieux connu, l'homme moderne excepté. Plus de 80 sites européens ont livré des restes de Néandertaliens et de leurs ancêtres, et même des individus presque complets, adultes et enfants. On peut donc en dresser un portrait précis. Comme n'importe quelle population vivante, les Néandertaliens présentent des variations morphologiques individuelles, voire régionales : la population la plus nombreuse a été exhumée en Europe occidentale, mais un autre groupe important a vécu au Proche-Orient ; les Néandertaliens étaient aussi présents en Europe centrale et orientale, et un individu a été découvert en Asie centrale, en Ouzbékistan. Mais ils partagent un ensemble de caractères originaux, en particulier du crâne et de la mandibule, qui ne sont rassemblés dans aucun autre groupe d'hommes fossiles.

La silhouette des Néandertaliens est ramassée : ils ne sont pas très grands, mais leur masse corporelle est supérieure à celle de la plupart des hommes actuels. À la robustesse du squelette s'ajoute un puissant système muscu-

laire. Les proportions relatives du tronc et des membres sont celles que l'on rencontre aujourd'hui chez des populations arctiques, tels les Esquimaux : les Néandertaliens étaient adaptés à des environnements froids (voir la figure 3).

Comme chez d'autres formes humaines archaïques, le front est fuyant et un fort bourrelet osseux avance au-dessus des orbites. De même, la mandibule ne possède pas de menton osseux. À côté de ces traits primitifs, les Néandertaliens possèdent de nombreux caractères spécifiques qui permettent parfois de les identifier à partir de restes fragmentaires. La face est très grande et longue, occupée par de vastes orbites et par une grande cavité nasale. De part et d'autre d'un nez proéminent, les côtés de la face sont fuyants. Dans la région de l'os temporal et de l'os occipital, des détails anatomiques sont spécifiques de cette lignée évolutive. De même, le profil presque circulaire de leur crâne en vue postérieure est caractéristique des Néandertaliens. La boîte crânienne allongée renferme un cerveau dont le volume, rapporté à la masse corporelle, est identique à celui d'un cerveau moderne.

Les premiers habitants de l'Europe

Les Néandertaliens ont été identifiés, par l'ensemble de ces caractéristiques morphologiques, dans des niveaux sédimentaires de l'avant dernière glaciation, il y a entre 80 000 et 40 000 ans. Les fossiles européens de la période plus chaude qui a précédé sont recon-

nus comme des Néandertaliens archaïques. Ils possèdent déjà presque tous les caractères spécifiques du groupe. Celui-ci est donc présent dans nos régions il y a 127 000 ans, et il descend des premiers habitants de l'Europe. Quand ces ancêtres y sont-ils arrivés ? Alors qu'en Afrique, des Hommes fossiles de quatre millions d'années et des outils de pierre taillés de 2,5 millions d'années ont été découverts, en Europe, très peu de sites sont datés d'avant la limite entre le Pléistocène inférieur et le Pléistocène moyen, il y a 780 000 ans.

Pour les partisans de la «chronologie longue», cette rareté des sites du Pléistocène inférieur provient surtout de la dégradation des fossiles au cours du temps et de la faiblesse numérique des populations de l'époque. Quelques auteurs n'ont d'ailleurs pas hésité à dater de plus de 1,7 million d'années, voire 2 millions, des objets de pierre qui semblent taillés, mais dont l'origine est vraisemblablement naturelle. Une série de sites d'environ un million d'années sont en revanche attestés, même si leur datation donne lieu à des polémiques. Dans la région d'Orléans, en Andalousie, les sites de Fuente Nueva 3 et de Barranco Leon 5 ont livré des outillages indubitablement taillés qui auraient entre 1 et 1,2 million d'années (voir la figure 5).

Il faut aussi mentionner les sites un peu plus tardifs du Vallonet, dans les Alpes-Maritimes, et de Soleihac, dans le Massif central. Ce dernier a livré à E. Bonifay un outillage de silex et des restes de grands mammifères sur les

rives d'un ancien lac. Karlich, en Allemagne, et Stranska Skala, en Moravie, sont deux autres exemples qui restent discutés.

La pénétration précoce de l'Europe est aussi attestée par la découverte, en 1994, de restes humains dans le gisement de la Gran Dolina d'Atapuerca, près de Burgos, en Espagne. Dans un niveau daté de plus de 780 000 ans, 80 fragments osseux ont été mis au jour. Leurs découvreurs, Juan Luis Arsuaga, de l'Université Complutense de Madrid, José Maria Bermudez de Castro, du Musée d'histoire naturelle de Madrid et Eudald Carbonell, de l'Université Rovira i Virgili, à Tarragone, les attribuent à une nouvelle espèce d'hominiés, *Homo antecessor*. Ils soutiennent ainsi, comme d'autres paléontologues, que *Homo erectus*, espèce à laquelle on rattache habituellement l'ensemble des hommes archaïques qui ont couvert une grande partie de l'Ancien Monde avant l'avènement des Néandertaliens et des hommes modernes, était cantonnée à l'Asie. La découverte récente à Ceprano, en Italie centrale, d'un fossile attribué à *Homo erectus* et vieux d'environ 700 000 ans témoignerait toutefois de la présence de ce groupe en Europe à cette époque.

Les tenants de la «chronologie courte» soutiennent au contraire que la colonisation de l'Europe est récente. W. Roebroek, de l'Université de Leyde, a ainsi affirmé qu'aucun site européen ne peut être daté avec certitude de plus de 500 000 ans : il a mis en doute la datation de sites reconnus, aussi bien que la nature humaine des outillages les plus anciens. Pourquoi, en effet, si des Hominiés étaient présents, n'en a-t-on retrouvé aucune trace dans de nombreux gisements paléontologiques, notamment du Massif central, qui ont livré de riches faunes du Pliocène (plus de 1,7 million d'années) et du Pléistocène inférieur (de 1,7 million d'années à 780 000 ans)? Les gisements contemporains d'Afrique du Sud ou d'Afrique de l'Est relèvent une proportion faible, mais significative, de vestiges humains.

La «chronologie longue» et la «chronologie courte» ne sont toutefois pas irréconciliables. D'abord, les tenants respectifs de ces modèles diffèrent par leur origine géographique et par les zones où ils mènent leurs recherches : l'Europe méditerranéenne d'une part, l'Europe du Nord-Ouest et des moyennes latitudes d'autre part. Chacun semble avoir raison dans sa

zone de travail : dans les régions méditerranéennes, on note des incursions sporadiques des hommes aux environs d'un million d'années, tandis qu'une colonisation humaine importante et continue ne se serait pas développée avant 600 000 ou 500 000 ans, en particulier dans les latitudes moyennes et élevées de l'Europe.

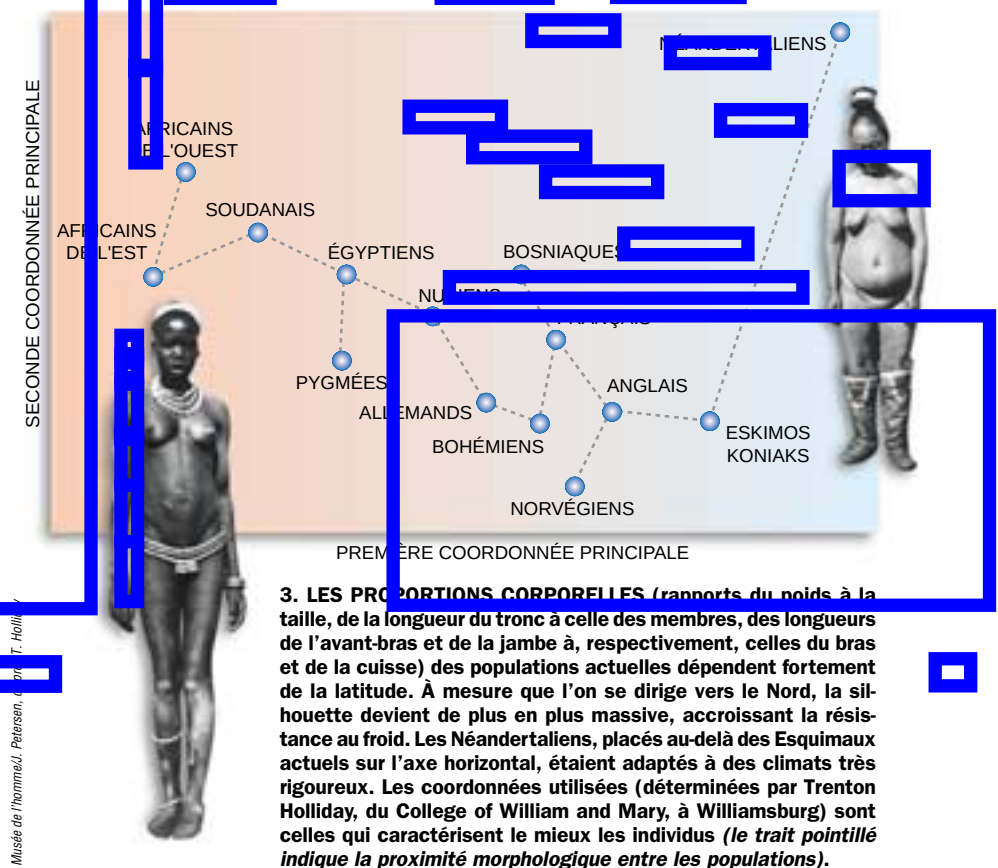
Des précurseurs aux portes de l'Europe

Un point est indubitable : la présence des hommes est démontrée aux portes de l'Europe avant un million d'années. Ainsi, en Algérie, les outillages d'Aïn Hanec seraient plus anciens. Dans le Levant, les sédiments du gisement d'Ubeidiyeh, en Israël, livrent de nombreux outils taillés et une faune de 1,4 million d'années.

Plus proche encore de l'Europe, à Dmanisi, en Georgie, sur le flanc Sud du Caucase, une équipe d'archéologues allemands et géorgiens a fait une découverte extraordinaire en 1991, en vidant un site creusé par les occupants d'une cité médiévale perchée sur un éperon rocheux. Ils ont vu apparaître, dans les parois, des ossements de grands mammifères, quelques ours

de pierre primitifs et, finalement, une mandibule indiscutablement humaine. Le basalte sous-jacent est daté de 1,8 million d'années. La composition de la faune présente, ainsi que la polarité magnétique des sédiments suggèrent un âge à peine plus récent pour la mandibule. Son analyse morphologique par G. Brauer, de l'Université de Hambourg, a mis cependant en évidence des caractères relativement évolués. Cette découverte rend très probable la colonisation du Sud de l'Europe il y a plus d'un million d'années, et elle confirme la datation de sites des régions méditerranéennes. Plusieurs vagues de peuplement se seraient ainsi succédées, parfois composées d'effectifs faibles, souvent éphémères et limitant leur avancée aux régions les plus méridionales.

Pourquoi les hommes ont-ils pénétré si difficilement en Europe? Divers facteurs environnementaux ont été évoqués, indépendamment du climat lui-même. Ainsi, selon C. Gamble, de l'Université de Southampton, jusqu'à il y a 500 000 ans, les hommes n'auraient prospéré que dans les milieux ouverts de savane et de prairie, et n'auraient pas pu s'adapter à la forêt tempérée ou froide. Selon A. Turner,



de l'Université de Liverpool, la concurrence avec les grands carnivores a joué un rôle déterminant : les hommes à la fois chasseurs et charognards, n'auraient pas pu cohabiter avec les hyènes et les félidés de grande taille, nombreux en Europe avant les renouvellements fauniques du milieu du Pléistocène moyen.

L'émergence des Néandertaliens

Quand le *Homo neanderthalensis* a-t-il commencé à se distinguer des formes contemporaines africaines et asiatiques ? Ni la mandibule de Dmanisi, ni les restes de la Gran Dolina d'Atapuerca, ni l'homme de Ceprano,

quelles qu'elles soient les espèces auxquelles ils appartiennent, ne présentent de caractères néandertaliens. Les données qu'ils représentent sont antérieures à la divergence de cette lignée. En revanche, on discerne déjà quelques traits « européens » sur une mandibule d'environ 500 000 ans, découverte à Mauer, en Allemagne, et qui présente surtout des caractères primitifs.

C'est sur des spécimens du milieu du Pléistocène moyen que l'on observe pour la première fois des caractères de la face qui indiquent clairement que le processus évolutif vers les Néandertaliens est déjà en marche. La région infraorbitaire et la mandibule des fossiles de la Caune de l'Arago, à Tautavel, dans les Pyrénées-Orientales, de 450 000 ans, évoquent celles des Néandertaliens, comme la région nasale et infraorbitaire du crâne de Petralona, en Grèce. À côté de ces quelques traits dérivés, ces spécimens, tout comme le tibia de Boxgrove, en Angleterre, vieux de 50 000 ans, présentent toutefois une morphologie surtout primitive, encore proche de celle que l'on observe sur des formes contemporaines africaines.

Une seconde étape est marquée par les fossiles appartenant à la période entre 400 000 et 250 000 ans. Avec les fossiles de Swanscombe, en Angleterre, et de Steinheim, en Allemagne, on voit apparaître des caractères néandertaliens sur l'arrière-crâne, en particulier la « fosse sus-occipitale », une zone déprimée et poreuse de l'occipital, qui est l'un des caractères anatomiques les plus distinctifs de ce groupe (voir la figure 2).

Depuis la fin des années 1980, l'équipe espagnole d'Atapuerca a mis au jour les restes, fragmentés mais parfaitement conservés, d'une trentaine d'individus, principalement de jeunes adultes, dans la Sima de los Huesos (située à 600 mètres environ de la Gran Dolina). Cet ensemble nous livre pour la première fois un instantané d'une population du Pléistocène moyen et nous en montre la diversité morphologique. La combinaison de caractères de la face et de l'occipital est clairement néandertalienne, même si ces caractères sont moins marqués que sur des spécimens plus récents. À ce même ensemble se rattachent sans doute les fossiles de Reinlingen et de Bilzingsleben, en Allemagne. À la vue de toutes ces pièces, on est frappé par le fait que plusieurs morphologies, plus

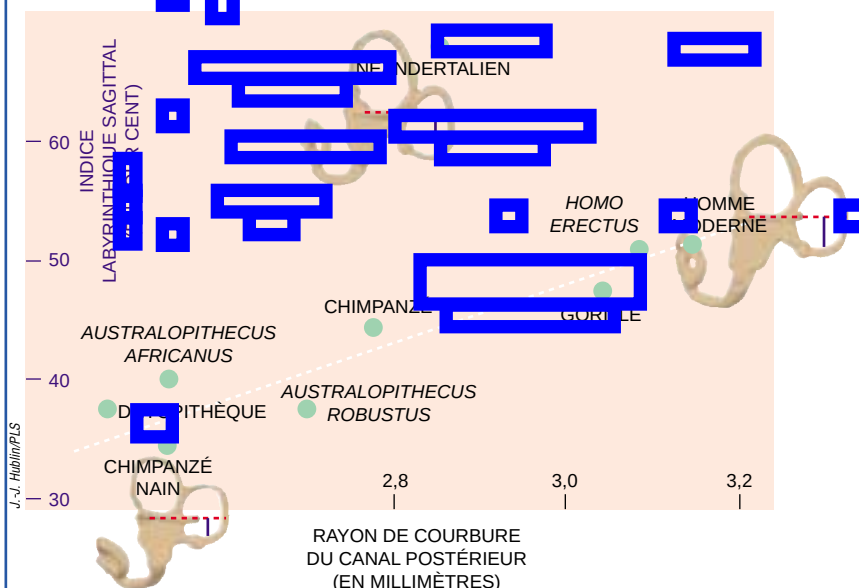
Espèce ou sous-espèce ?

Les Néandertaliens forment-ils une sous-espèce de *Homo sapiens*, que l'on nommerait *Homo sapiens neanderthalensis*, ou une espèce à part entière, *Homo neanderthalensis* ? Différents critères sont utilisés pour distinguer deux espèces : la capacité, pour deux populations, d'avoir une descendance commune féconde ; des différences morphologiques « suffisantes » ; la dissimilitude de leurs génomes.

Le premier critère est invérifiable pour des espèces disparues. En revanche, de nombreux arguments morphologiques plaident en faveur de la distinction de deux espèces. Ainsi, en 1996, nous avons montré, avec Fred Spoor, de l'University College, à Londres, que la disposition et la forme du canal semi-circulaire postérieur de l'oreille interne distinguent les Néandertaliens de toutes les autres espèces du genre *Homo* (voir la figure). L'indice labyrinthique sagittal, porté en ordonné, est le pourcentage du canal semi-circulaire postérieur situé sous le plan du canal latéral, matérialisé par le pointillé rouge.). D'un point de vue statistique, les différences morphologiques observées avec les hommes modernes sont du même ordre de grandeur que celles qui séparent les hommes actuels des chimpanzés.

La forme de l'oreille interne est fixée dès que l'embryon a atteint six mois : on distinguera donc morphologiquement un Néandertalien d'un homme moderne dès le stade fœtal. Chez des antilopes ou des rongeurs fossiles, une telle différence morphologique justifierait sans états d'âme la distinction de deux espèces paléontologiques, mais l'idée que des hommes d'une espèce différente de la nôtre, et en même temps si proche par la culture, ont coexisté avec nous n'est pas facilement admise.

La comparaison génétique des Néandertaliens et des hommes modernes a débuté spectaculairement en 1997 : deux équipes de biologistes, en Allemagne et aux États-Unis, ont, pour la première fois, extrait et analysé des fragments d'ADN d'un os de Néandertalien. Toutefois, la conclusion de ce travail quant à l'ancienneté des Néandertaliens et à leur parenté avec les hommes actuels a simplement confirmé ce que les paléontologues avaient déduit de l'étude des fossiles : les génomes des deux groupes présentent des différences, et ils se sont distingués depuis environ 500 000 ans. Il n'existe de toute façon pas d'étalon génétique qui permettrait de choisir entre deux possibilités, espèces proches ou non.



ou moins primitives, de l'occipital en particulier, coexistent à la même époque en Europe. Cette variété dans le degré de «néandertalisation» s'observe même au sein d'une même population, à la Sima de los Huesos et à Bilzingsleben.

Vers 200 000 ans, l'anatomie des fossiles, tel l'homme de Biache, dans le Pas-de-Calais, se rapproche encore un peu plus de celle des Néandertaliens européens, par la forme arrondie de leur voûte crânienne et par la morphologie de leur région temporale. Il y a 125 000 ans, enfin, les fossiles de Saccopastore, en Italie, et de Krapina, en Croatie, appartiennent déjà clairement à l'entité néandertalienne et ne s'en distinguent que par quelques détails. Comme l'a d'ailleurs démontré récemment Erik Trinkaus, de l'Université George Washington à Saint Louis, certains caractères considérés comme néandertaliens sont plus fréquents chez ces formes que chez les Néandertaliens postérieurs. À nouveau, on observe la persistance de traits relativement primitifs, de la mandibule en particulier, sur des individus assez tardifs.

Il est tentant de diviser cette évolution en stades successifs : aux pré-Néandertaliens anciens succéderaient des pré-Néandertaliens récents, puis des Néandertaliens anciens et enfin des Néandertaliens récents. Certains auteurs proposent même le nom spécifique de *Homo heidelbergensis* pour désigner les premières étapes de cette séquence. Ce découpage est toutefois difficile à mettre en œuvre et rend mal compte des mécanismes évolutifs : l'évolution des Néandertaliens résulte d'une accumulation de caractères dérivés. Elle procède d'un changement de fréquence des caractères au sein des populations, à des vitesses différentes selon les emplacements anatomiques considérés. Ainsi, pour l'occipital la transformation touche finalement la totalité des individus, tandis que les caractères néandertaliens de la mandibule ne sont pas tous présents chez tous les individus, même dans les populations néandertaliennes les plus récentes.

Les Néandertaliens sont connus uniquement en Europe et dans la proche Asie, où ils n'auraient cependant pénétré qu'à certaines périodes, peut-être même uniquement à la fin de leur histoire. Quelles sont donc les particularités de l'Europe qui ont permis

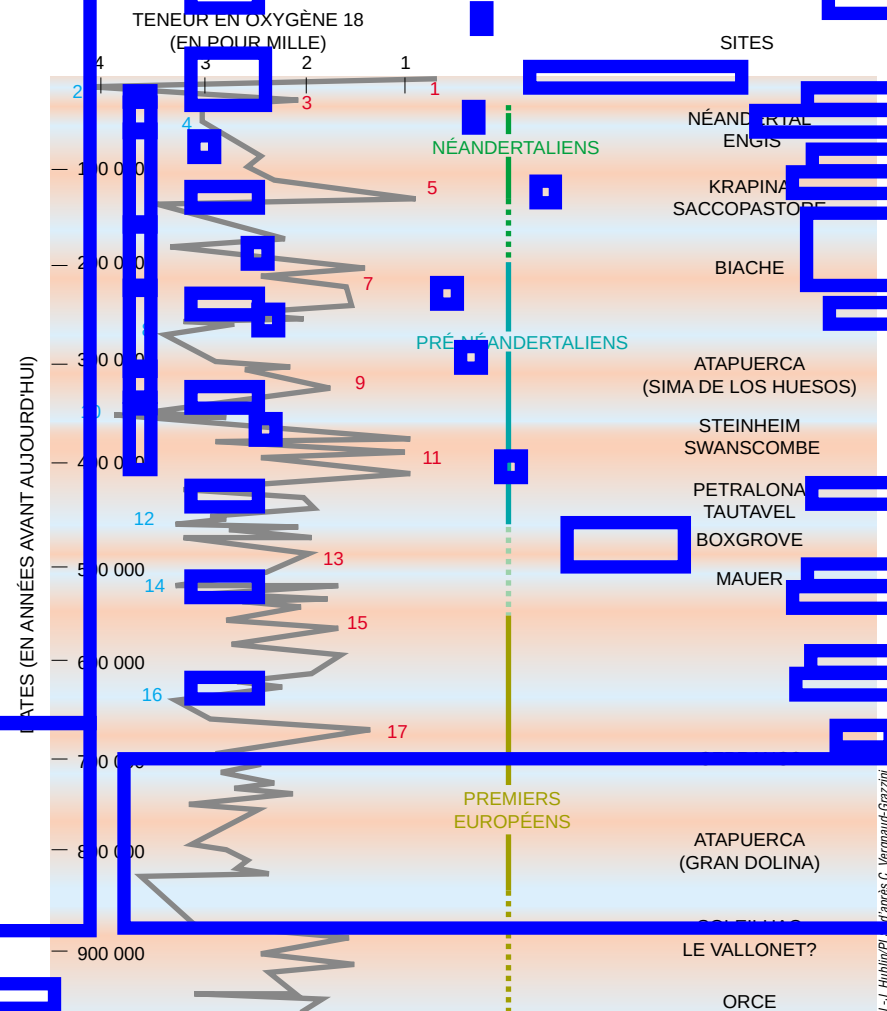
l'évolution des Néandertaliens? Nous savons que l'évolution des Hominidés en Afrique a été fortement influencée par les variations climatiques, locales ou planétaires, à l'origine de l'extension ou de la régression des zones de forêt, de savane et de désert. C'est aussi dans l'histoire de la géographie et du climat de l'Europe qu'il faut rechercher les causes de l'évolution particulière des Hominidés sur ce continent.

Les variations géographiques de l'Europe

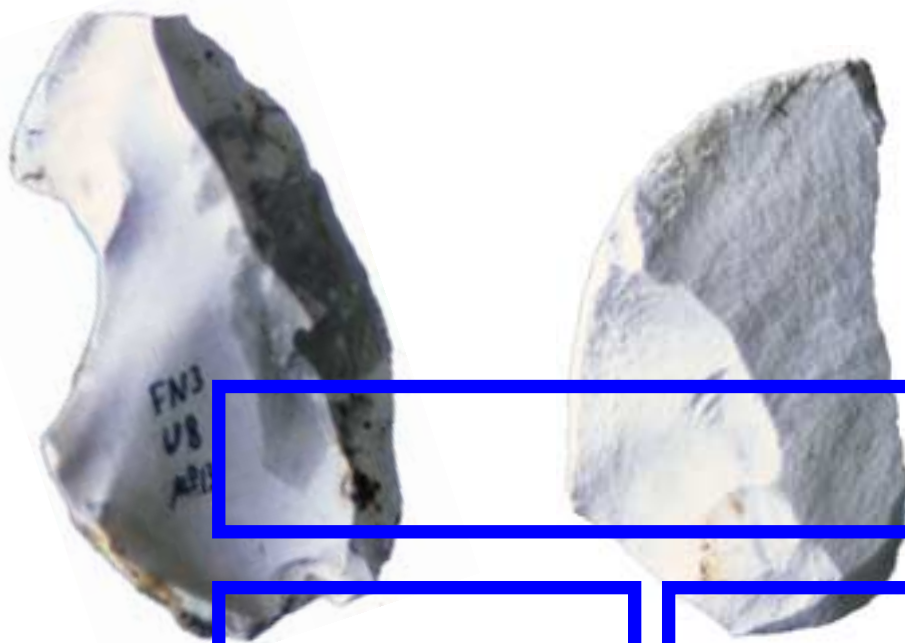
Tout au long du Plistocène, et encore aujourd'hui, l'Europe est une péninsule longue et étroite, relativement isolée à l'extrémité de l'Eurasie, sous des latitudes moyennes. Elle est limitée à l'Ouest par l'océan Atlantique

et au Sud par la Méditerranée. L'arc alpin sépare une grande plaine, au Nord, des régions méditerranéennes cloisonnées par de nombreux massifs montagneux, au Sud. Les contours du continent et les régions accessibles à l'homme ont toutefois fortement varié au cours de l'alternance de périodes froides, les glaciations, et de périodes de climat tempéré ou chaud, nommées interglaciaires.

Ces variations climatiques, que l'on retrouve sous différentes formes sur tout le globe, sont bien connues depuis que des courbes paléoclimatiques ont été établies par l'analyse des isotopes de l'oxygène dans les sédiments océaniques (les isotopes sont les différentes formes chimiques d'un même élément chimique qui contiennent plus ou moins de neutrons). La teneur en oxygène 18 des



4. L'ALTERNANCE CLIMATIQUE de périodes glaciaires et interglaciaires, numérotées en partant de l'interglaciaire actuel, est connue grâce à la teneur des sédiments marins en oxygène 18 : plus celle-ci est élevée, plus la température était basse au moment du dépôt (courbe à gauche). Les hommes archaïques, qui ont pénétré en Europe il y a plus d'un million d'années ont commencé à se différencier des populations africaines il y a 400 000 à 500 000 ans, à peu près à l'époque de la glaciation du stade 12. Cette évolution s'est poursuivie jusqu'il y a environ 100 000 ans, où les Néandertaliens sont réellement établis.



5. CES ÉCLATS DE SILEX, taillés par des hommes à Orce, en Andalousie, il y a 1 à 1,2 million d'années, seraient les plus anciens d'Europe selon les travaux d'Alain Turq et de B. Martínez-Navarro. Ils prouvent que des hommes se sont aventurés en Europe dès cette époque. Comme la plupart des plus anciens gisements pléistocènes européens, ceux du bassin sédimentaire d'Orce ont été fortement controversés. En particulier, la nature humaine de quelques fragments osseux livrés par ses dépôts est discutée.

A. Turq / Musée national de préhistoire des Pyrénées

coquilles de micro-organismes provenant de forages de fonds océaniques indique avec précision la température des eaux où ces animaux ont vécu. Les périodes successives de température moyenne différente sont nommées «stades isotopiques», et elles sont numérotées à partir du stade actuel, le stade 1, un interglaciaire.

Les conditions actuelles nous donnent une assez bonne idée du sous-continent durant les phases interglaciaires mais, depuis 500 000 ans, les glaciations ont dominé. Une calotte glaciaire s'étendait alors sur le Nord de l'Europe, tandis que des glaciers recouvraient les massifs montagneux les plus élevés. Sur plusieurs centaines de kilomètres de large, une zone de sol gelé en permanence bordait la calotte glaciaire vers le Sud. La mobilisation des eaux océaniques sous forme de glace provoquait une forte baisse des niveaux marins, et des zones aujourd'hui submergées, telles la Manche ou le Nord de la mer Adriatique étaient à sec. L'Europe était ainsi très réduite au Nord et légèrement étendue vers l'Ouest (voir la figure 1). Dans l'ensemble, un climat plus froid et plus continental qu'aujourd'hui a régné pendant le dernier demi-million d'années dans la plupart des régions. Au maximum d'intensité des phases froides, les milieux naturels répartis aujourd'hui entre les rives de la Méditerranée et le cercle polaire arctique étaient resserrés entre le Sud de l'Espagne et la Belgique.

A ces vastes fluctuations climatiques, éphémères, expliquées par les fluctuations de l'orbite terrestre autour du Soleil, se sont ajoutées de nombreuses crises, plus courtes mais parfois intenses, révélées par l'étude des glaces du Groenland (comme les sédiments marins, les neiges polaires fixent dans leur composition isotopique la température au moment de leur dépôt) et dont l'origine reste débattue. Notre interglaciaire actuel, depuis 70 000 ans, semble d'une stabilité climatique exceptionnelle par rapport aux périodes précédentes : ainsi, pendant le stade isotopique 5, il y a 123 000 à 73 000 ans, un peu plus chaud au maximum que le climat actuel, de profonds mais catastrophiques refroidissements se sont produits. Dans les régions Nord-atlantiques, certains de ces refroidissements correspondent à une baisse de la température moyenne de 10 à 14 degrés en quelques générations humaines.

Comment l'homme a-t-il affronté ces variations climatiques ? À la marge de leur niche écologique, les hommes archaïques du Pléistocène inférieur (avant 780 000 ans) n'ont probablement pénétré en Europe que par petits groupes isolés et séparés par de grands intervalles de temps. Cette immigration sporadique fournit une première explication du particularisme des Néandertaliens : «l'effet du fondateur». Seul un petit échantillon des gènes de la population d'hommes archaïques

d'origine est représenté dans la population des pionniers qui parvient en Europe, et leur effet est déterminant dans l'évolution de celle-ci. Par pur hasard, des caractères peu fréquents dans l'espèce sont ainsi fixés.

Pourtant, le climat a grandement conditionné les possibilités d'échanges entre le sous-continent européen et les territoires voisins. Tant que les hommes sont restés cantonnés sous les latitudes inférieures à 55 degrés Nord, ce qui fut le cas pendant tout le Pléistocène moyen, les échanges avec l'Asie se faisaient essentiellement à travers le Bosphore, en direction de l'Anatolie. Les périodes interglaciaires ont permis la conquête des latitudes plus élevées : ainsi, au début du Pléistocène supérieur, le stade 5 marque les premiers peuplements de la plaine russe. En revanche, les phases froides ont amplifié l'isolement naturel de l'Europe, notamment de l'Europe occidentale. Tout d'abord par le tassement des milieux naturels vers le Sud. D'autre part, au maximum des glaciations, la mer Caspienne s'étend vers le Nord au-delà de 50 degrés de latitude, alimentée par un système fluvial venu des glaciers du Nord : elle approche l'extrémité Sud de l'Oural. Elle développe aussi périodiquement un chenal dans la dépression de Manytsch, en direction de la mer d'Azov, doublant ainsi vers le Nord la barrière naturelle du Caucase, qui culmine à plus de 5 000 mètres et est alors recouvert de glaciers.

Moins d'hommes pendant les glaciations

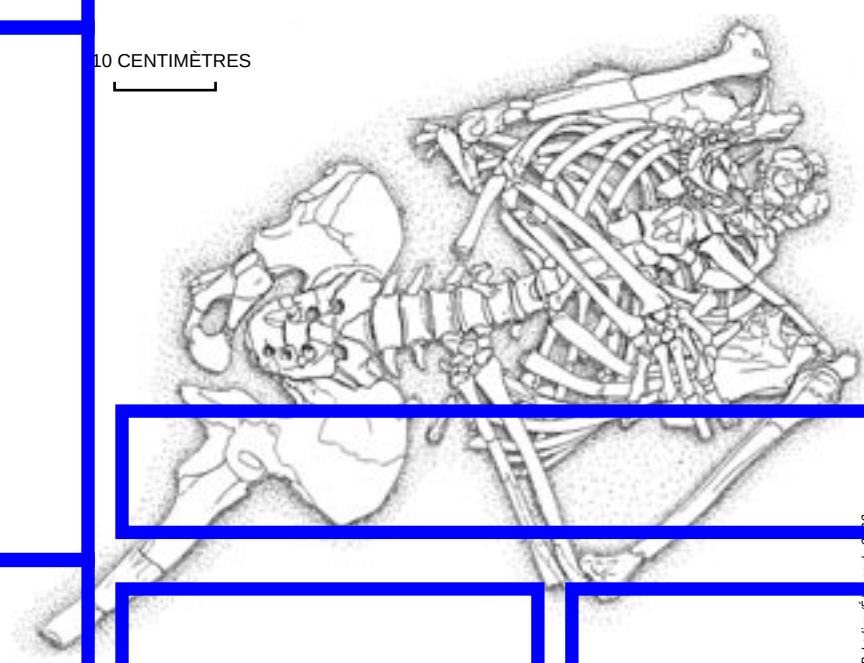
Ces périodes glaciaires n'ont pas seulement isolé les populations européennes, elles les ont aussi considérablement réduites en diminuant la superficie des territoires habitables. Nous avons la preuve pour les populations d'hommes modernes au cours de la dernière glaciation : au maximum glaciaire, et pendant plusieurs milliers d'années, les territoires situés au Nord des Alpes ont été désertés par les hommes, qui se sont repliés dans des zones refuges. Dans la partie occidentale de l'Europe, elles se réduisent au Sud-Ouest et au Sud-Est de la France, aux contreforts des Pyrénées, et, dans la péninsule ibérique, aux zones proches des côtes. De nouveaux territoires étaient découverts par les régressions marines, mais, même si l'on imagine une concentration de populations dans

les zones habitables, le peuplement européen est réduit et s'est divisé en petites unités peu ou pas reliées entre elles. C'est d'ailleurs à partir de ce maximum glaciaire, il y a 18 000 ans, que l'on distingue dans les parties Ouest et Est de l'Europe des différences techniques et culturelles (qui évolueront indépendamment ensuite), ainsi que des faunes différentes.

Si une glaciation a eu de telles conséquences démographiques sur des hommes modernes qui connaissaient l'aiguille, le coudre, construisaient des habitats perfectionnés et maîtrisaient bien le feu et ses utilisations, les glaciations précédentes ont *a fortiori* réduit fortement les populations d'hommes archaïques du Pléistocène moyen, qui n'avaient pas la même maîtrise technique. La distribution des gisements archéologiques le confirme : durant les phases froides du Pléistocène, le Sud était plus peuplé que le Nord, et l'Ouest plus que l'Est, l'Europe centrale et la grande plaine du Nord-Ouest européen ayant été en grande partie désertées.

Compte tenu de l'imprécision des datations et du faible nombre de fossiles dont nous disposons pour le Pléistocène moyen, de brèves crises démographiques semblables à celle qui a touché les hommes modernes lors du dernier maximum glaciaire passent totalement inaperçues aux yeux des archéologues. Pourtant, les conséquences évolutives d'un tel événement sont importantes : dans une petite population, le génome des individus fluctue rapidement au hasard, puis une partie seulement des gènes initiaux est préservée et fixée chez tous. Françoise Delpech, de l'Université de Bordeaux 1, a ainsi montré que les populations animales des stades 2 et 6 ont été profondément modifiées : les rennes et les antilopes Saiga du Sud-Ouest de la France ont été séparés des populations d'origine, plus à l'Est, et ont développé des caractères morphologiques particuliers.

Vers le milieu du Pléistocène moyen, à l'époque où apparaissent les caractères spécifiques des Néandertaliens, on observe justement une amplification brutale des fluctuations climatiques. Une glaciation exceptionnelle (le stade 12) isole les populations européennes du reste du monde et, comme nous l'avons vu, les réduit sans doute fortement. L'interglaciaire suivant (le stade 11), exceptionnellement chaud,



6. L'HOMME DE KÉBARA, en Israël, est l'un des Néandertaliens qui ont vécu au Levant il y a entre 50 000 et 100 000 ans. Cette avancée vers le Sud est sans doute liée à des phases de climat très froid en Europe. À l'inverse, lors du fort réchauffement d'il y a 125 000 ans, les Néandertaliens ont étendu leur territoire vers l'Asie Centrale : le plus oriental que nous connaissons a été découvert en Ouzbékistan.

permet probablement une nouvelle expansion géographique. Par la suite, ces populations se sont adaptées à des environnements plus froids qu'aujourd'hui, comme en témoignent leurs proportions corporelles, en particulier au cours des stades 8 et 6, une double glaciation de 150 000 ans, entrecoupée d'un interglaciaire relativement froid, le stade 7.

Tout au long du dernier demi-million d'années, des crises climatiques courtes mais intenses, ont ainsi favorisé des phénomènes de dérive génique, accentuant le particularisme européen. Une succession de réductions fortes de la population explique la baisse de la diversité morphologique des hommes et la généralisation des caractères néandertaliens originaux.

Le même mécanisme démographique explique peut-être en partie la disparition des Néandertaliens. Il y a environ 40 000 ans, pendant l'interglaciaire du stade 3, un nouveau groupe humain, les Cro-Magnons, fait son entrée en Europe. Les deux populations coexistent environ 10 000 ans mais, à la veille de la glaciation du stade 2, et alors que le climat devient plus rude, la compétition pour l'exploitation des territoires est exacerbée : les hommes modernes, porteurs d'innovations techniques, et sans doute aussi sociaux, occupent finalement la quasi-totalité des zones habitables. La crise qui touche alors les Néandertaliens est fatale à cette population, qui disparaît de ses derniers refuges il y a environ 30 000 ans.

Jean-Jacques HUBLIN est codirecteur de l'équipe d'anthropologie biologique du CNRS au Musée de l'Homme.

Les origines de l'homme, Pour la Science, n° 149.

Jean-Jacques HUBLIN, *Les peuplements paléolithiques de l'Europe : un point de vue paléobiogéographique*, in *Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*, 3, 1990.

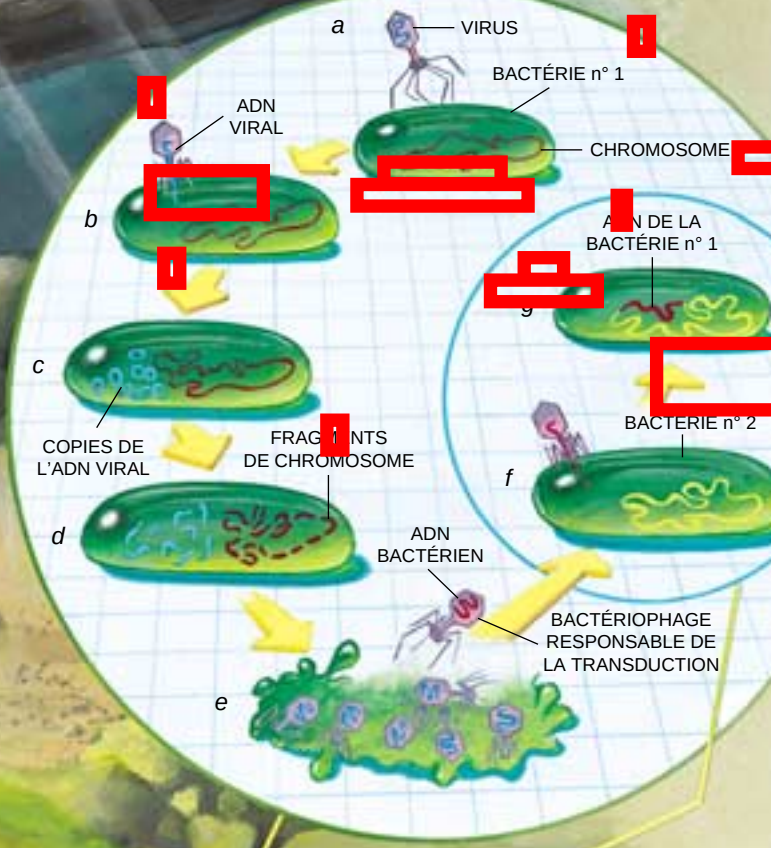
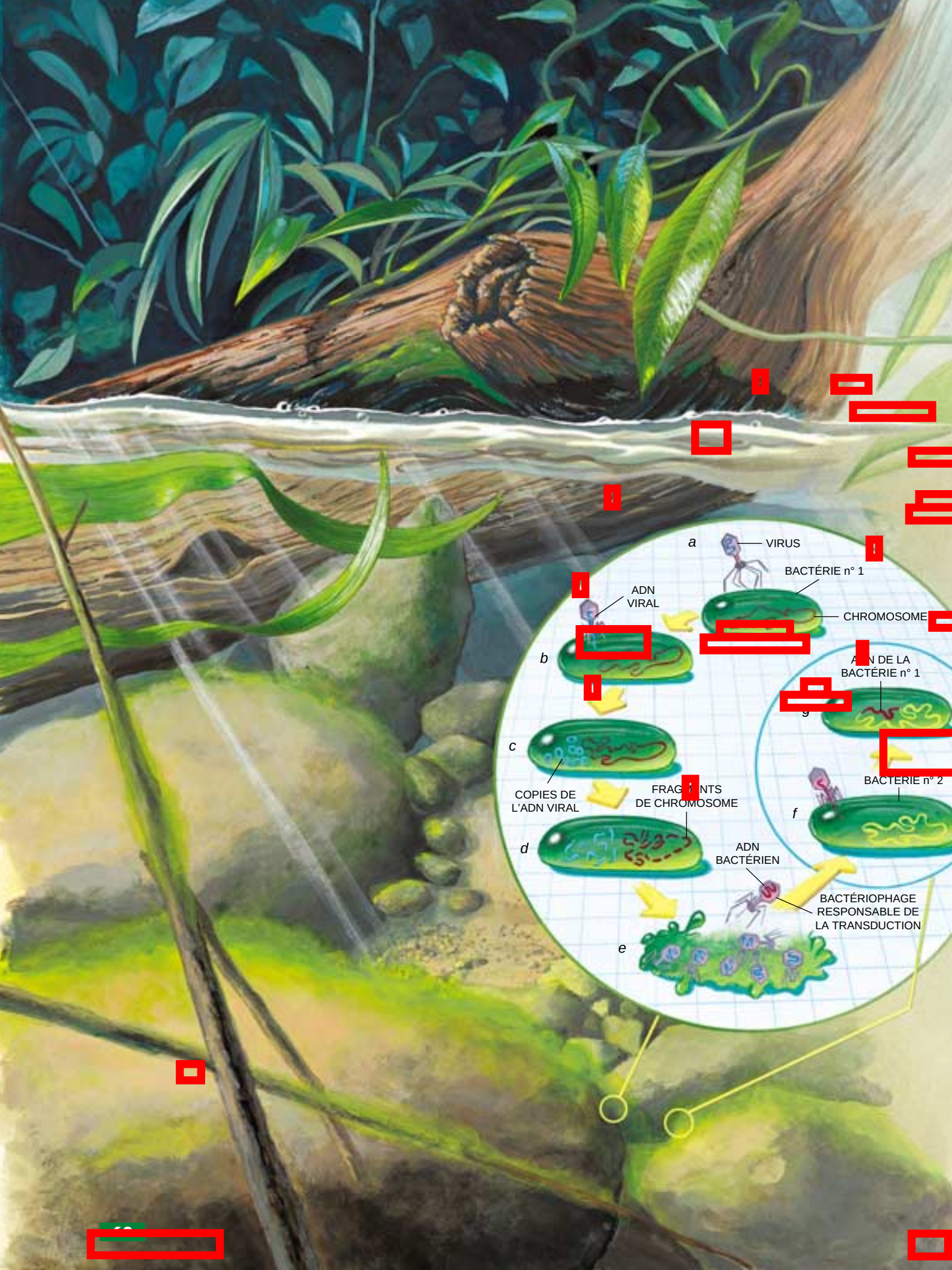
Jean-Jacques HUBLIN, *The First Europeans*,

in *Archaeology*, pp. 36-44, février 1996.

Jean-Jacques HUBLIN, Fred SPÖRR, Marc BRAUN, Frans ZONNEVELD et Silvana CONDEMI, *A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts*, in *Nature*, vol. 381, pp. 224-226, 16 mai 1996.

Gerhard BOSINSKI, *Les origines de l'homme en Europe et en Asie*, Éditions Errance, Paris, 1996.

Ian TATTERSALL, *Les premiers exodes*, in *Pour la Science*, juin 1997.



Échanges de gènes entre bactéries

ROBERT MILLER

Le transfert de gènes entre bactéries d'espèces différentes est plus fréquent qu'on ne le croyait. Les généticiens devront explorer ce phénomène pour maîtriser les risques de contamination de l'environnement par des organismes génétiquement modifiés.

Au début des années 1980, alors que les biologistes amélioraient les techniques de transfert de gènes dans des bactéries, certains proposèrent de modifier des micro-organismes au bénéfice de l'environnement : ces bactéries génétiquement modifiées nettoieraient-elles l'océan des nappes de pétrole déversées par accident ? Protégeraient-elles les cultures contre les prédateurs et contre les maladies ? Ces propositions furent vivement critiquées : on craignait (et l'on craint encore) que des bactéries modifiées n'échappent à tout contrôle ou que des gènes ne « sautent » d'un organisme à un autre. De tels transferts « horizontaux » de gènes (le transfert « vertical » de gènes se fait entre un « parent » et ses descendants) perturberaient irrémédiablement l'environnement, les animaux et l'homme, et contamineraient toute la biosphère.

À l'époque, les biologistes avaient peu d'informations pour apaiser les craintes : ils ignoraient comment les organismes génétiquement modifiés évoluent dans la nature, ou si les gènes bactériens d'origine ou introduits arti-

ficiellement migrent d'une bactérie à l'autre. Aujourd'hui, on connaît mieux ces phénomènes, grâce à une coopération entre généticiens et spécialistes de l'écologie microbienne qui étudient les micro-organismes dans leurs habitats naturels.

Deux souches de bactéries génétiquement modifiées sont déjà utilisées par les agriculteurs américains, et une dizaine d'essais en champ sont en cours. Les études sur le transfert de gènes entre bactéries dans leurs habitats naturels ont montré que les bactéries génétiquement modifiées risquent très peu de proliférer : elles sont fragiles et meurent assez rapidement, de sorte que leurs gènes risquent peu d'être disséminés.

Toutefois, dans certaines circonstances, les gènes risquent d'atteindre d'autres bactéries, voire d'autres types d'organismes. Pour que l'utilisation de micro-organismes modifiés soit

dénuée de risques, les biologistes identifient les conditions de transfert des gènes bactériens. Ils prévoient d'utiliser ces informations pour sélectionner les bactéries qui ne risquent pas d'échanger leurs gènes sur les sites « traités » : dans un lac, par exemple,

on ne doit libérer que des bactéries qui n'échangent pas de gènes en milieu aquatique.

Les biologistes ne disposent pas encore de la liste des bactéries les plus appropriées pour une application donnée, mais ils ont élucidé les trois mécanismes de transfert horizontal de gènes qui se produisent dans la nature : la transduction, la conjugaison et la transformation.

Avant d'examiner ces trois mécanismes, rappelons que le transfert horizontal de gènes entre bactéries est au cœur d'un problème de santé publique qui préoccupe de plus en plus les autorités sanitaires, celui de la résistance croissante aux antibiotiques des bactéries pathogènes pour l'homme : les bactéries, qui sont des organismes unicellulaires, transmettent souvent des gènes de résistance aux antibiotiques à d'autres espèces de bactéries, à l'instar même de l'organisme humain.

La compréhension des mécanismes de transfert devrait aider les biologistes à combattre ces bactéries résistantes.

Le transfert horizontal de gènes étant assez fréquent dans la nature, il a vraisemblablement contribué à la diversité génétique que les bactéries

ont acquise au cours de l'évolution. Des gènes ont même sans doute été échangés entre les trois principales formes de vie : les bactéries, les eucaryotes (animaux, plantes, champignons et protozoaires) et les archéobactéries (des micro-organismes combinant des propriétés des bactéries et des propriétés des eucaryotes). Des gènes

1. LE TRANSFERT DE GÈNES par transduction a lieu entre les bactéries présentes dans la couche de vase qui entoure les roches, au fond des rivières (à gauche). Un bactériophage, un virus infectant les bactéries, se fixe sur une bactérie et y injecte son ADN (a et b). À l'intérieur de la bactérie, l'ADN injecté est répliqué (c), et le chromosome bactérien se fragmente (d). Normalement, l'ADN viral est emporté par les nouvelles particules virales fabriquées par la bactérie infectée (e). Toutefois, au cours de la transduction, certains bactériophages emportent de l'ADN bactérien (c'est-à-dire des gènes bactériens) et l'injectent dans une autre bactérie (f) qui intègre l'ADN étranger dans son propre chromosome (g).

auraient été transférées des bactéries aux eucaryotes, des bactéries aux archées, et, surtout, des eucaryotes aux bactéries. Ainsi, l'échange horizontal de gènes aurait participé à l'évolution de nombreuses espèces.

Une partie de pêche décisive

J'ai commencé à m'intéresser au transfert horizontal de gènes au printemps 1976, alors que j'étais assistant à l'Université de Knoxville. Généticien, je m'intéressais au fonctionnement des

cellules vivantes. Je savais que certaines souches de bactéries transmettent naturellement des gènes à d'autres bactéries, et le transfert horizontal de gènes me semblait un moyen pratique d'introduire de nouveaux gènes, et par conséquent de nouvelles caractéristiques, dans les cellules étudiées au laboratoire. Une partie de pêche en compagnie de Gary Sayler, un collègue spécialiste de l'écologie microbienne, élargit mon champ de recherches : «Les bactéries présentes dans ce lac échangent-elles des gènes?», me demandait-il. Je répondis, sans conviction, que les bactéries étaient trop dis-

persées dans l'eau pour avoir des contacts et échanger des gènes. De retour au laboratoire, je consultai les articles scientifiques sur ce sujet, et constatai que l'on ignorait à peu près tout du transfert horizontal de gènes.

G. Sayler avait construit un dispositif pour étudier les organismes vivants en

eau douce : un tube de plastique transparent fermé aux deux extrémités par des filtres qui permet le passage de l'eau et des nutriments, mais empêche que les bactéries ne s'échappent. Après avoir testé ce dispositif, nous avons fait des expériences et mesuré la fréquence de transfert de gènes se produisant dans notre coin de pêche. C'est ainsi que nous avons montré que ce transfert se produit en eau douce.

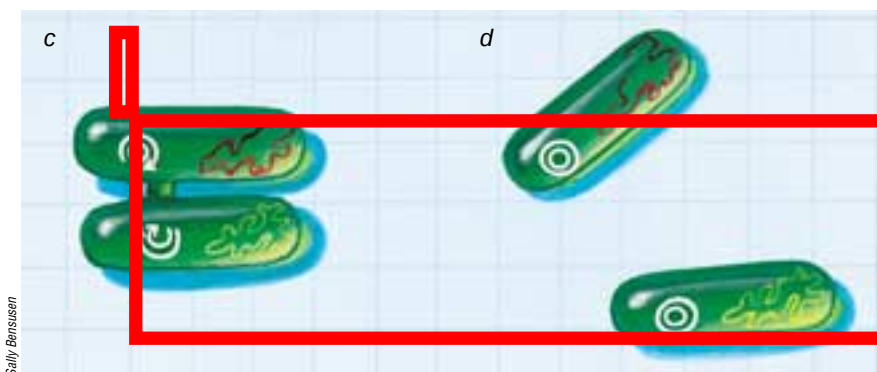
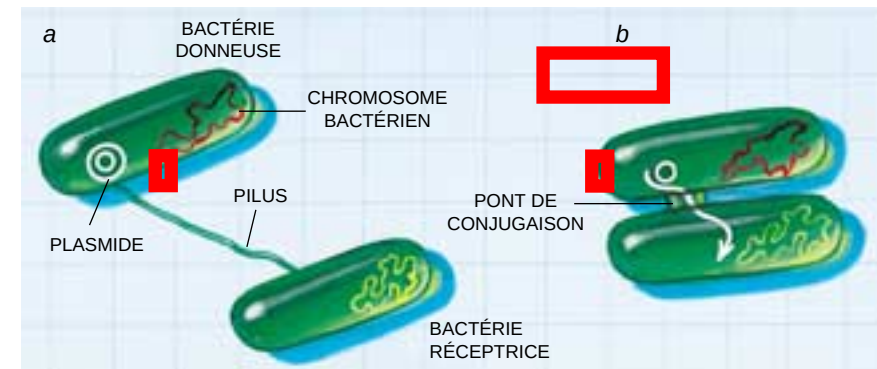
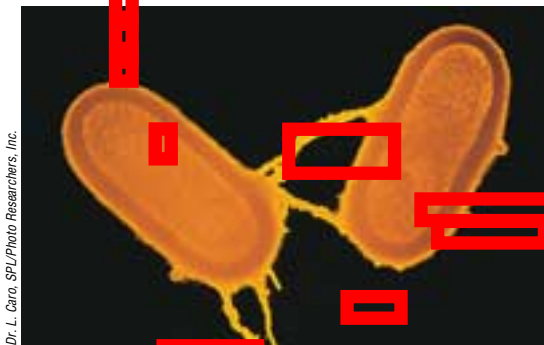
Nous avons publié nos résultats en 1977, persuadés qu'ils intéresseraient d'autres biologistes, au point qu'ils étudieraient le sujet. Nous avions tort : aucun article ne vint enrichir notre connaissance rudimentaire des échanges de gènes, aucune institution ne voulut même financer nos projets de recherche. L'attitude des autorités et des scientifiques ne changea qu'en 1985, quand on s'inquiéta de la libération dans l'environnement de bactéries génétiquement modifiées. Quelques équipes commencèrent à étudier le transfert horizontal de gènes dans diverses conditions.

La conjugaison

Des gènes se dissémineraient-ils par le mécanisme de conjugaison? En 1946, à l'Université Yale, Joshua Lederberg et Edward Tatum avaient découvert que la bactérie *Escherichia coli*, qui colonise l'intestin humain, échange des boucles d'ADN que l'on nomme des plasmides par un mécanisme qui ressemble à la reproduction sexuée (les chromosomes eux-mêmes sont parfois échangés par conjugaison, mais dans des circonstances exceptionnelles).

Les plasmides contiennent des gènes, mais sont séparés du chromosome bactérien, qui est plus long et contient les gènes nécessaires à la reproduction de la bactérie. Souvent les gènes des plasmides augmentent les chances de survie dans des conditions défavorables. Ainsi, en plus des gènes nécessaires à leur propre répllication et à leur transfert, ils portent souvent des gènes «salvateurs» : les protéines qu'ils codent permettent aux bactéries d'inactiver les antibiotiques, de dégrader des composés toxiques, tels les dinphényles polychlorés (les PCP) ou de former des complexes avec le mercure ou d'autres métaux lourds, ce qui les rend toxiques.

Les microbiologistes séparent les bactéries en deux types – à Gram négatif et à Gram positif –, selon qu'elles se colorent ou non en présence d'un colo-



2. DES PLASMIDES, ou boucles d'ADN, sont transférés entre bactéries par un mécanisme de conjugaison. Une bactérie à Gram négatif donneuse émet des projections, des pili, qui s'attachent à une bactérie réceptrice et qui rapprochent les deux bactéries (photographie et a). Ensuite un pont (presque réduit à un pore) relie les deux bactéries ; un brin de l'ADN plasmidique passe dans la bactérie réceptrice (b), et chaque brin simple est dupliqué pour redonner un plasmide à double brin (c). Le transfert achevé, les bactéries se séparent (d). La conjugaison chez les bactéries à Gram positif (non représentée) se déroule de la même façon, mais l'attraction des partenaires est assurée par un signal chimique et non plus par des pili.

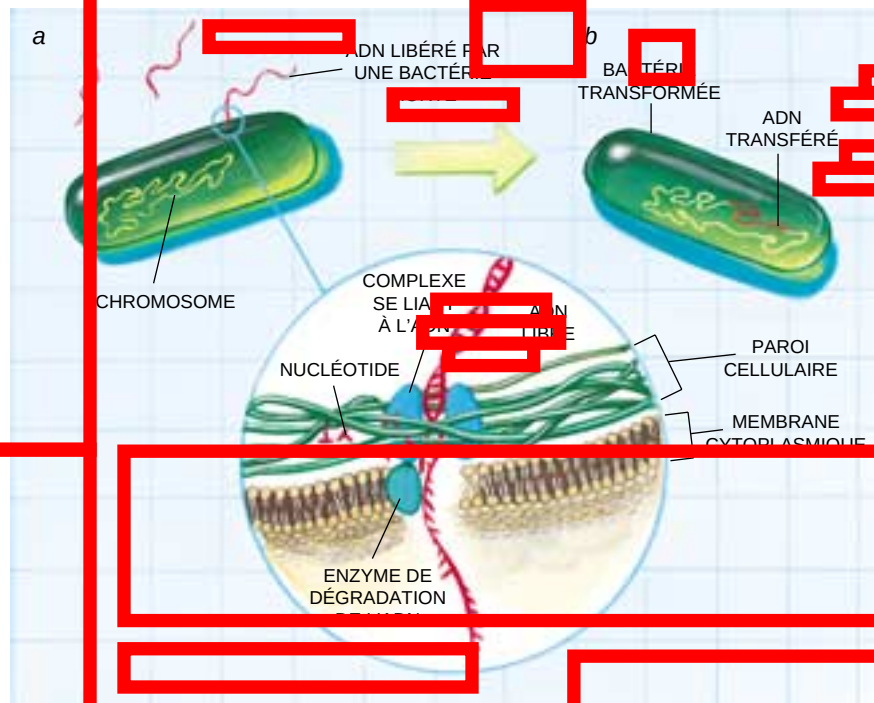
rant de référence. Chez les bactéries à Gram négatif, la conjugaison commence quand le micro-organisme donneur s'arrime à un micro-organisme receveur par l'intermédiaire d'un appendice, nommé pilus ; puis le pilus se rétracte, mettant le donneur et le receveur en contact. Souvent, plusieurs donneurs émettent des pili simultanément et convergent vers la même cellule réceptrice : les bactéries s'agglutinent. Dans ces aggrégats, des ponts ou des pores se forment entre donneurs et receveurs, et des plasmides s'échangent.

Certains pili stimulent l'agrégation des bactéries en milieu liquide ou sur des surfaces solides ; d'autres ne sont efficaces que sur des solides. Par conséquent, si l'on veut introduire des bactéries à Gram négatif génétiquement modifiées dans un environnement aquatique, on doit sélectionner des espèces dont les pili déclenchent l'agrégation uniquement sur des solides.

Chez les bactéries à Gram positif, la conjugaison s'effectue sans pili. Ces bactéries, prêtes à recevoir du matériel génétique, sécrètent des substances qui stimulent des congénères donneurs : ces derniers sont alors incités à produire des protéines, souvent nommées facteurs d'agrégation, qui assurent l'agglutination ; ensuite, les pores nécessaires au transfert d'ADN se forment à la jonction. Ainsi, si l'on introduisait une bactérie recombinée à Gram positif dans une zone où sont présentes d'autres bactéries à Gram positif, on devrait d'abord la rendre incapable de fabriquer des facteurs d'agrégation, afin de minimiser les risques de transfert de gènes.

En général, les bactéries à Gram négatif et à Gram positif n'échangent des plasmides qu'avec des bactéries de leur propre espèce. Toutefois, certains plasmides transfèrent l'ADN entre espèces non apparentées : entre bactéries à Gram négatif et à Gram positif, voire même entre bactéries et levures, ou entre bactéries et plantes. Les bactéries qui portent de tels plasmides ne doivent pas quitter le laboratoire.

La conjugaison est-elle suffisamment fréquente dans la nature pour que des précautions s'imposent ? Depuis l'avènement du génie génétique, dans les années 1980, les biologistes ont montré qu'elle se produit effectivement dans de nombreux environnements naturels, notamment dans l'eau, sur terre et chez diverses espèces végétales et animales.



3. AU COURS D'UN MECANISME DE TRANSFORMATION (a) une bactérie récupère de l'ADN libéré dans son environnement par une bactérie morte. Des complexes présents à la surface de la bactérie fixent l'ADN (cartouche inférieure), et des enzymes découpent un des deux brins en nucléotides ; simultanément, l'autre brin est intégré au chromosome de la bactérie et le brin complémentaire est synthétisé *in situ* (b). Bien que la transformation (illustrée ici pour une bactérie à Gram positif) se produise aussi dans les bactéries à Gram négatif, ce mécanisme reste rare.

Transfert en eau douce

Ainsi, une équipe de l'Université du Pays de Galles a montré que le transfert de gènes par conjugaison se produit entre bactéries dans l'eau douce : une souche de laboratoire de *Pseudomonas aeruginosa* capte par conjugaison un plasmide qui confère une résistance au mercure aux bactéries de la Taft, une rivière polluée près de Cardiff. *Pseudomonas aeruginosa* est une bactérie commune des sols et des eaux douces susceptible de provoquer des infections respiratoires et urinaires chez les personnes dont les défenses immunitaires sont affaiblies. Les biologistes britanniques ont d'abord muté un gène de la bactérie afin qu'il produise une version anormale de la protéine codée par le gène sain : la protéine modifiée servirait de marqueur pour repérer les bactéries introduites dans la rivière. Puis, l'équipe a introduit les bactéries marquées dans la vase, riche en nutriments, qui recouvre les pierres, au fond de la rivière ; un filtre très fin empêchait les bactéries de s'échapper.

Le lendemain, les pierres ont été récupérées et la vase analysée, à la recherche de bactéries *Pseudomonas aeruginosa* ayant à la fois le gène modi-

fié et le plasmide de résistance au mercure. La proportion des bactéries ayant reçu le plasmide était faible (entre une sur 10 000 et une sur un milliard), mais le transfert avait bien eu lieu. Ces expériences montrèrent également que divers facteurs, tels que la température, l'acidité du milieu et sa concentration en nutriments, modifient la fréquence de la conjugaison.

D'autres études ont exploré l'importance variable de tels facteurs, selon que la conjugaison a lieu dans la nature ou en laboratoire. Ainsi, la conjugaison se produit dans la nature entre 6 et 18 °C, tandis qu'en laboratoire la température doit être supérieure. Aussi les biologistes s'identifient-ils des moyens fiables de minimiser le mécanisme que s'ils l'évitent en milieu naturel.

C'est ainsi que l'on a établi que les bactéries transfèrent de l'information génétique par conjugaison dans divers environnements, mais que les plasmides génétiquement modifiés ne semblent pas dangereux pour autant : ils ralentissent la croissance des bactéries et sont généralement éliminés quand ils ne confèrent aucun avantage. Si un plasmide génétiquement modifié de résistance au mercure était transmis à un micro-organisme en

Quelques environnements où l'on a observé un transfert horizontal de gènes bactériens

	TRANSDUCTION	CONJUGAISON	TRANSFORMATION
ENVIRONNEMENTS TERRESTRES	Sol, surface des plantes	Sol, surface des plantes	Sol
ENVIRONNEMENTS AQUEUX	Lacs, océans, rivières, eaux usées dans les stations d'épuration	Lacs, océans, sédiments des rivières, eaux usées dans les stations d'épuration	Sédiments, vase au fond des rivières
DANS LES ORGANISMES	Crustacés, souris	Plantes, insectes, poulet, souris, homme	Plantes, insectes, souris

Jennifer C. Christiansen

dehors d'une zone polluée par le mercure, le nouvel hôte s'en débarrasserait rapidement.

De surcroît, les plasmides sont rarement intégrés dans les chromosomes bactériens, de sorte que, même s'ils se propagaient, ils ne s'intégreraient pas dans le génome de nouvelles bactéries ; les chromosomes sont invariablement recopiés et transmis aux nouvelles générations de bactéries quand une cellule mère se reproduit, tandis que la transmission des plasmides n'est pas systématique. Pourtant, afin que les plasmides ne propagent pas dans la nature de gènes modifiés, les biologistes insèrent ces gènes dans les chromosomes et non dans des plasmides.

La conjugaison, qui fut le premier mécanisme de transfert de gènes bactériens étudié dans la nature, n'a pas été le premier identifié. En 1928, le bactériologiste anglais Frederick Griffith observa que des pneumocoques non virulents devenaient pathogènes lorsqu'on les injectait à des souris en même temps que des pneumocoques virulents morts. Il en conclut que les bactéries initialement non virulentes prélevaient un «agent de transformation» aux bactéries virulentes mortes, qui les rendait capables de tuer des souris. On sait aujourd'hui que l'agent de transformation est de l'ADN libéré quand les bactéries mortes se décompo-

sent. Un gène est échangé par transformation quand le plasmide qui le porte est tout entier incorporé dans la bactérie, ou quand un fragment d'ADN est intégré dans le chromosome de la bactérie réceptrice.

Des risques infimes de transformation

Pour qu'une transformation ait lieu dans des bactéries à Gram négatif ou dans des bactéries à Gram positif, l'ADN libéré par les bactéries en décomposition doit être stable, et les bactéries réceptrices doivent le récupérer : les bactéries réceptrices doivent porter des protéines de surface qui se lient à l'ADN et le font pénétrer dans les cellules.

Les biologistes ont longtemps pensé que les mécanismes de transformation ne se produisaient pas partout, car l'ADN n'est stable ni dans le sol ni dans l'eau. Toutefois, Michael Lorenz et Wilfried Wackernagel, de l'Université d'Oldenburg, en Allemagne et Guenther Stotzky, de l'Université de New York, ont montré que l'ADN libre est stabilisé par liaison à divers composés du sol, de sorte qu'il est ensuite récupéré par des bactéries adaptées. Des plasmides, également, sont parfois transférés par transformation dans l'eau douce et dans la vase du fond des rivières. En revanche, le transfert de gènes de chromosomes par le mécanisme de trans-

formation ne semble se produire ni dans la terre ni dans l'eau.

Au total, la libération de bactéries génétiquement modifiées dans l'environnement semble faire courir un faible risque d'échange de gènes par transformation. Seules des bactéries de la même espèce semblent s'échanger naturellement des gènes par les mécanismes de transformation, et peu d'espèces de bactéries semblent susceptibles de se transformer par ces mécanismes. Les biologistes éviteront d'employer les micro-organismes qui le pourraient.

En outre, même si les bactéries mortes libèrent de grandes quantités d'ADN que d'autres bactéries ingèrent, les gènes absorbés sont rarement fonctionnels. John Paul et ses collègues de l'Université de Floride du Sud ont montré que de grandes quantités d'ADN bactérien sont libérées dans les eaux des estuaires après le lever du jour, lorsque de nombreuses bactéries meurent. Toutefois, ils ont aussi montré en laboratoire que la plus grande part de l'ADN libéré et absorbé par les bactéries vivantes est rapidement dégradée en ses constituants élémentaires, lesquelles servent à la synthèse de nouveaux brins d'ADN ; les gènes contenus dans l'ADN libre sont rarement intacts.

Contrairement à la transformation, la troisième forme de transfert horizontal de gènes, la transduction, a

lieu entre de nombreuses bactéries : des bactériophages (des virus qui infectent les bactéries) prélèvent du matériel génétique dans une bactérie et le déposent dans une autre.

Pour se reproduire, les bactériophages s'attachent aux bactéries et leur injectent leur ADN. Ce dernier sert à la fabrication de copies du bactériophage, qui s'échappent de la bactérie contaminée et vont infecter d'autres bactéries. Parfois, quelques nouveaux bactériophages emportent de l'ADN bactérien au lieu de l'ADN viral : ils peuvent alors transférer des plasmides entiers ou des fragments de chromosome dans une autre bactérie (les chromosomes sont trop gros pour tenir entier dans un bactériophage). Certains bactériophages semblent capables d'infecter diverses espèces, voire des genres différents de bactéries : les gènes bactériens diffuseraient largement.

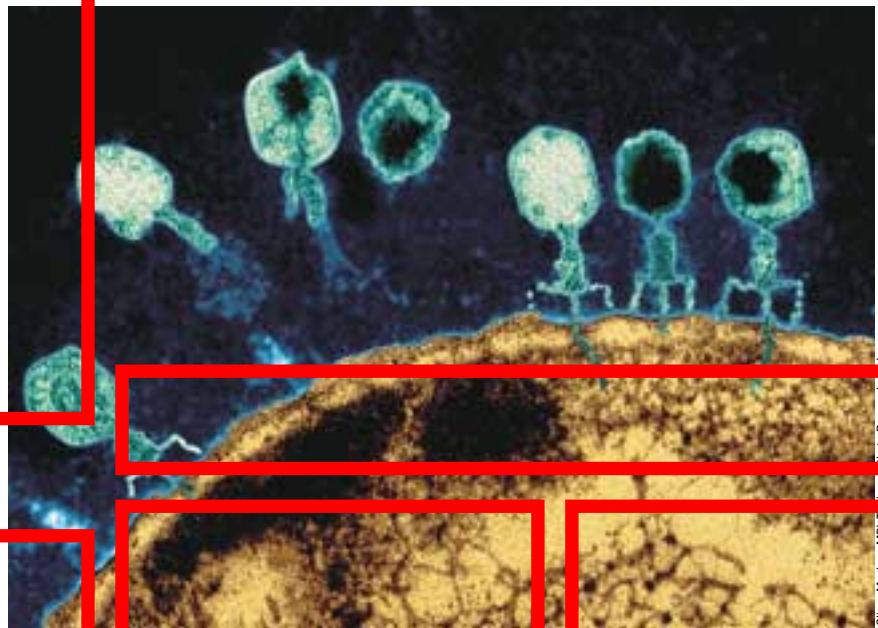
Transfert de gènes par virus

La transduction étant ainsi le phénomène de dispersion génétique le plus risqué, c'est celui que nous avons surtout étudié. Initialement, nous utilisons le dispositif de G. Saylor pour récupérer des bactéries ; aujourd'hui, nous utilisons des sacs en plastique perméables aux gaz.

Nous avons établi que la transduction de matériel génétique entre bactéries, en milieu naturel, s'effectue de la façon suivante : lorsqu'une bactérie portant un nouveau gène pénètre dans son nouvel environnement, elle est infectée par des bactériophages et libère de nouveaux bactériophages. Si quelques particules virales transportent le nouveau gène, ce dernier est transmis à la population bactérienne d'origine. La transduction assure le transfert de l'ADN plasmidique comme celui de l'ADN chromosomique.

Nous avons récemment confirmé cette description en eaux douces : nous avons isolé des bactéries et des bactériophages de divers lacs et avons montré que les bactéries échangent de l'information génétique par transduction dans ces environnements.

Il y a quelques années, de nombreux microbiologistes pensaient que la transduction n'était pas un moyen efficace d'échange de gènes dans la nature, car elle impose des interactions entre les virus et les bactéries, qui semblaient être en faible concentration. Or, contrai-



4. DES BACTÉRIOPHAGES, des virus qui infectent les bactéries, se sont accrochés à la cellule et y injectent leur ADN. Cet ADN servira à la fabrication de nouveaux bactériophages qui, en quittant la cellule infectée, risquent d'emporter de l'ADN bactérien qu'ils transféreront à d'autres bactéries par un mécanisme de transduction.

rement à ce que l'on croyait, les bactériophages sont très concentrés (souvent 100 milliards de particules par millilitre) dans les eaux douces et marines. À ces concentrations, les interactions des bactériophages et des bactéries sont nombreuses, et la transduction pourrait être fréquente.

Toutefois, la transduction de gènes de bactéries génétiquement modifiées utilisés dans la nature semble limitée pour diverses raisons : d'abord, la plupart des bactériophages n'infectent qu'une seule espèce de bactéries ; ensuite, dans la nature, les bactériophages n'infectent que des bactéries présentes dans l'habitat du bactériophage (et non les souches de laboratoire utilisées en génie génétique). Enfin, les biologistes moléculaires devraient bientôt être capables

d'éviter que de l'ADN de bactéries génétiquement modifiées ne soit transféré vers d'autres espèces et n'y survive.

Aujourd'hui, les biologistes savent manipuler le génome de n'importe quel organisme. Le génie génétique sert à la fabrication de bactéries recombinées, mais aussi de céréales génétiquement modifiées qui résistent à diverses maladies. D'après les diverses expériences réalisées sur les bactéries dans leur habitat naturel, les micro-organismes génétiquement modifiés seraient inoffensifs si on les utilisait dans la nature. La seule

question qui se pose est : vont-ils accomplir les tâches que l'on attend d'eux ? La prudence reste évidemment de mise ; l'étude de transfert horizontal de gènes entre bactéries devrait permettre aux spécialistes des biotechnologies utilisées dans la nature de minimiser les risques.

Robert MILLER dirige le département de microbiologie et de génétique moléculaire de l'Université de l'Oklahoma. *Gene Transfer in the Environment*, sous la direction de Stuart B. Levy et Robert V. Miller, McGraw-Hill, 1989.

Genetic Interactions among Microorganisms in the Natural Environment, sous la direction de E.M.H. Wellington et J.S. van Elsas, Pergamon Press, 1992.

J.C. FRY et M.J. DAY, *Release of Genetically Engineered and Other Micro-Organisms*, Cambridge University Press, 1992.

Robert V. MILLER et Jeanne S. POINDEXTRE, *Strategies and Mechanisms for Field Research in Environmental Bioremediation*, American Academy of Microbiology, Washington, D.C., 1994.

Antoine ANDREMONT, Denis CORPET et Patrice COURVALIN, *La résistance des bactéries aux antibiotiques*, in *Pour la Science*, février 1997.

Horizontal Gene Transfer, sous la direction de M. Syvanen et C. Kado, Chapman and Hall, à paraître.

Le traitement des gemmes

EMMANUEL FRITSCH • JIM SHIGLEY • BERNARD LACROIX

Les gemmes subissent des traitements, parfois élaborés, pour en améliorer l'aspect. Grâce aux outils d'analyse, on décelé certaines modifications frauduleuses. C'est la lutte entre l'épée et le bouclier.

Place Vendôme, devant une joaillerie, vous tombez en admiration devant un diamant jaune. Alors que le prix normal d'un tel diamant naturel est proche de 120 000 francs par carat (0,2 gramme), le prix affiché est un quart de cette valeur. Hélas, le diamant jaune qui vous tente n'est qu'un diamant presque incolore qu'un traitement a jauni. Si le vendeur ne vous prévient pas du traitement subi, vous vous sentirez trompé. Pendant longtemps, les vendeurs omettaient de prévenir l'acheteur du traitement, ou bien ils ignoraient même que la pierre avait été traitée, participant ainsi à une véritable tromperie.

Aujourd'hui, les mentalités changent : en 1997, pour les fêtes de fin d'année, la chaîne de supermarchés Carrefour a publié un catalogue de bijoux dans lequel figurait la mention «traitée» pour certaines pierres. Ces prises de position redonnent confiance en un secteur économique en déclin. Cependant, l'aide du gemmologue, seul apte à déceler les traitements élaborés, demeure indispensable.

Depuis l'Antiquité, les joailliers améliorent les produits naturels. Le papyrus égyptien *Graecus Holmiensis*, qui date du IV^e siècle de notre ère, donne déjà des recettes pour colorer certaines pierres. Sur les comptoirs des joailleries modernes, bien des surprises vous attendent : diamants et émeraudes aux fractures remplies, saphirs bleus chauffés, rubis bouchés, jades et turquoises imprégnés de polymères (voir la figure 1).

Qu'est-ce qui différencie une gemme traitée d'une gemme naturelle ? Une gemme est naturelle si la taille est la seule intervention humaine qu'elle ait subie après extraction. Cette modification est purement géométrique : les propriétés physiques et chi-

miques de la gemme, ainsi que son contenu (ses inclusions, par exemple), sont inchangées. À l'inverse, le traitement modifie l'apparence des gemmes (c'est le but), et par conséquent certaines de ses propriétés.

L'ingéniosité humaine compense, par des manipulations, le déséquilibre entre la forte demande pour des gemmes si parfaites et leur rareté. Depuis le début des années 1980, ces manipulations se multiplient. Des techniques anciennes, mais peu répandues sont aujourd'hui appliquées aux gemmes les plus importantes du marché. De surcroît, les technologies de pointe (accélérateurs de particules, fours utilisés pour la conception des circuits intégrés) sont utilisées en joaillerie.

Dans tous les domaines de la contrefaçon, le secret des méthodes est jalousement gardé. Les traitements des gemmes n'échappent pas à cette règle. Aussi, pour percer leur nature, les gemmologues se livrent à un travail de détective. Ils ont mis au point de petits instruments adaptés à l'authentification des gemmes naturelles. Microscope binoculaire, réfractomètre ou lampe émettant des rayonnements ultraviolets de longueur d'onde spécifiques sont autant d'instruments utilisés quotidiennement par les gemmologues. À l'aide de ces instruments, ils détectent efficacement la majorité des pierres traitées.

Certains traitements, tels la teinture ou le verrillage, sont décelés par un examen attentif de la pierre. D'autres sont plus élaborés, mais ne demandent pas une technique trop lourde. C'est

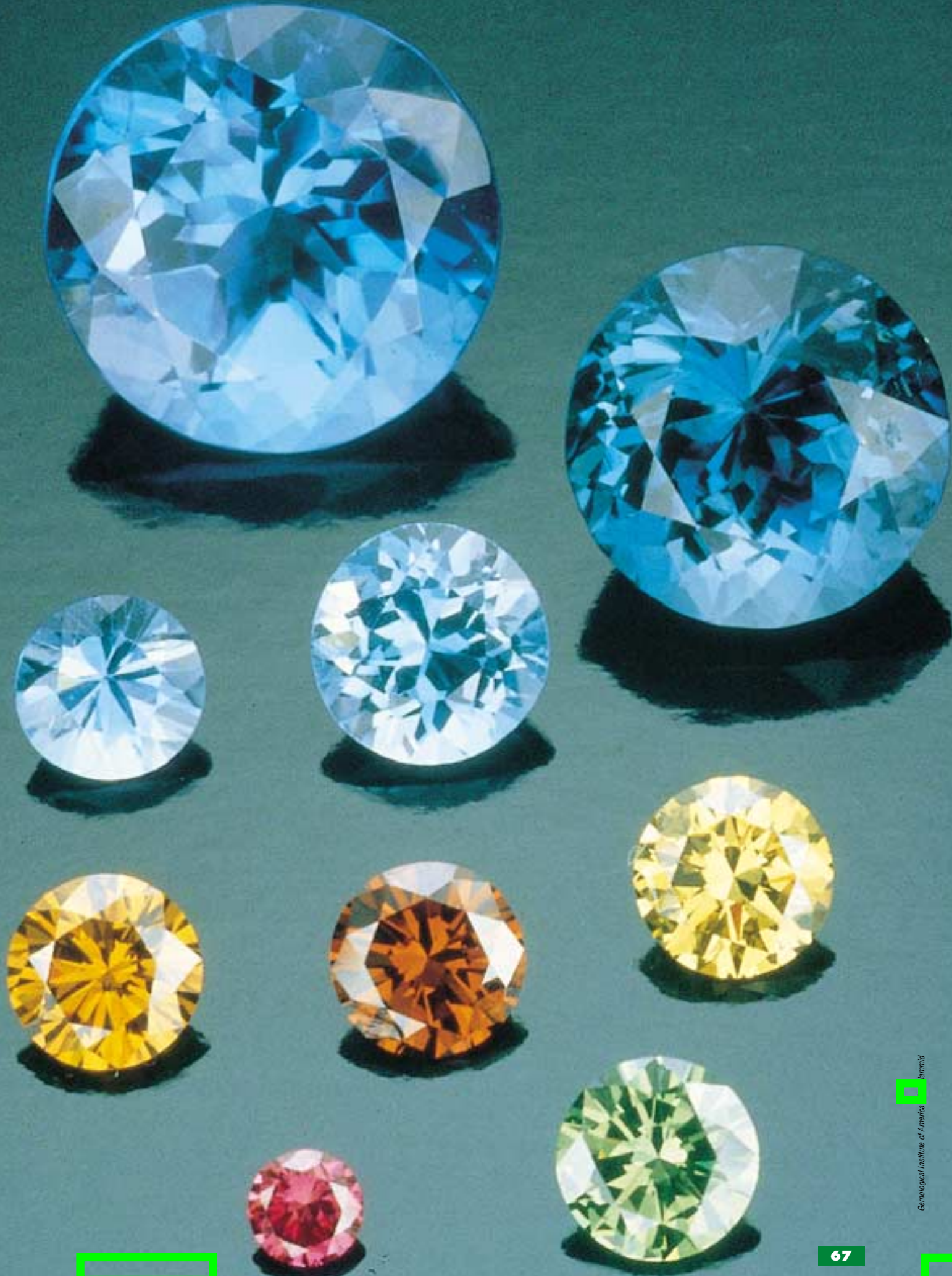
le cas du chauffage qui, dans sa version classique, nécessite uniquement un four. En Thaïlande, les boutiques des grossistes contiennent presque toutes un tel four. La modification de l'atmosphère du four, en revanche, demande plus de moyens techniques. Enfin, l'irradiation des gemmes nécessite l'accès à un accélérateur de particules ou à un réacteur nucléaire, des appareils onéreux, et reste l'apanage des traitements industriels et des contrefacteurs organisés.

Certaines gemmes ont des propriétés extrêmement proches de celles des pierres naturelles. Les méthodes de détection efficaces sont alors chères et nécessitent une compétence technique qui dépasse celles d'un joaillier. Lorsque la spectrométrie par absorption, la fluorescence X ou la diffusion Raman sont indispensables, les expertises sont du ressort de laboratoires d'analyse. Après avoir détaillé les traitements, des plus courants aux plus élaborés, nous examinerons de quels outils disposent les gemmologues pour déceler les pierres traitées. Enfin, nous verrons comment le consommateur peut se prémunir contre la fraude.

Des pierres bien traitées ?

Les premiers contrefacteurs se sont enrichis parce que leurs contemporains ne se rendaient pas compte de la supercherie. Pour les maintenir dans l'ignorance, les textes anciens relatant ces pratiques sont rares. Les textes modernes ne sont guère plus largement p...

1. LES GEMMES BLEUES au sommet de la photographie sont des topazes traitées par une irradiation suivie d'un chauffage. Les cinq pierres du bas sont des diamants colorés traités par irradiation (pierre verte) ou par irradiation suivie de chauffage (diamants jaune, orange et rose). Certaines de ces pierres sont encore radioactives. Le diamant jaune (à droite) mesure cinq millimètres de diamètre.



Les plus vieux traitements connus sont la teinture des pierres (voir la figure 2). Très utilisés entre le XVII^e et le XIX^e siècle, la peinture, le vernissage ou la teinture le sont moins aujourd'hui. Toutes les pierres peuvent recevoir ces traitements, mais ils restent superficiels. En 1983, un diamant rose défraîchi la chronique, à New York. Présenté dans une vente aux enchères par Sotheby's, son apparence inhabituelle attira l'attention d'un gemmologue expérimenté. Au diamant rose originel avait été substitué un diamant de mêmes dimensions, mais bien moins cher : un diamant presque incolore, recouvert de vernis à ongles rose !

La porosité du matériau retient la teinture. Cette porosité est soit naturelle, soit « améliorée » par chauffage suivi d'une trempe modérée. Parmi les matériaux naturellement poreux teintés, on note le jade, les perles, la turquoise, le lapis-lazuli, mais aussi les variétés opaques du rubis et de l'émeraude.

Pour les opales, on utilise un procédé de teinture plus élaboré, nommé caramélisation. Les opales de la région d'Andamooka, en Australie, présentent des jeux de couleur typiques de l'opale noble, mais ces couleurs se remarquent à peine, car l'opale elle-même est très blanche. Ces plages colorées se voient plus aisément sur un fond noir ou foncé, d'où le coût élevé des opales noires naturelles. Pour foncer les opales, les Australiens les imprègnent d'une solution sucrée,

puis les plongent dans l'acide. Celui-ci brûle le sucre et le transforme en noir de carbone qui reste piégé dans la porosité, donnant une opale noire « caramélisée » stable. Les contrefacteurs utilisent d'autres réactions chimiques pour piéger le colorant dans certaines agates ou certaines perles. La porosité des pierres résulte de microscopiques fractures à leur surface. Lorsque ces fractures sont trop importantes, elles sont apparentes. C'est un défaut répandu dont sont exemptes les rares belles gemmes.

Le remplissage des fractures

Comment estomper ces fractures ? En les remplissant d'un matériau dont l'indice de réfraction est proche de celui de la gemme. Après ce remplissage, la lumière n'est plus renvoyée vers l'observateur et le défaut se remarque à peine. L'ancêtre de ce type de traitement est l'huilage des émeraudes. L'émeraude, matériau fragile, possède souvent des « givres secs » – ou fractures ouvertes – parfois très visibles. En trempant une telle émeraude dans des huiles incolores sélectionnées (l'huile de cèdre a la réputation d'être la mieux adaptée), le liquide reste piégé par capillarité, et on élimine les réflexions blanches ou les interférences qui rendent la pierre peu attrayante. Cependant, le traitement est réversible, et l'on peut facilement enlever l'huile.

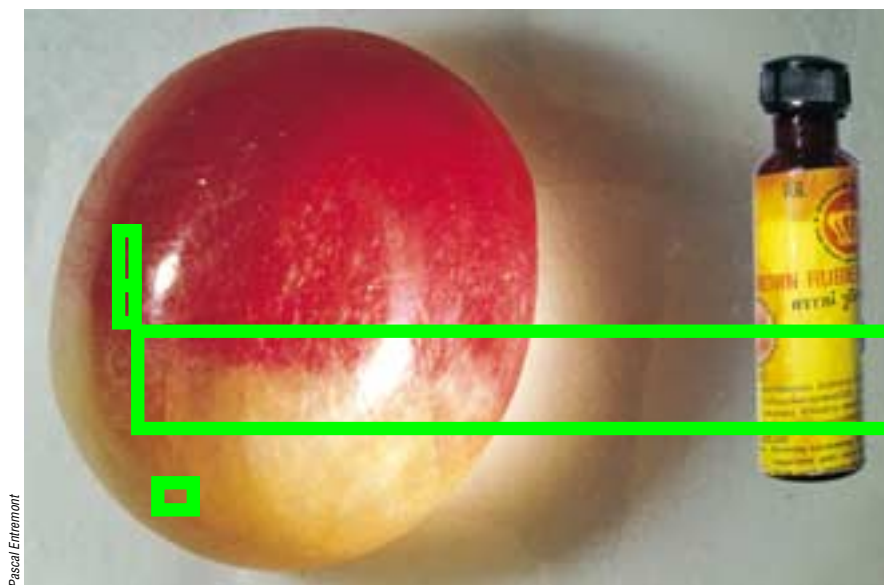
En 1987, la découverte sur le marché américain de diamants aux fractures remplies avait fait scandale. Le matériau utilisé pour le remplissage des diamants est un verre d'indice de réfraction élevé conçu pour des fibres optiques ou, en signalisation routière, pour les microlentilles de verre des bandes blanches réfléchissantes. Le résultat est spectaculaire : des diamants inattendables prennent, après traitement, l'apparence de marchandises de qualité commerciale (voir la figure 3).

Un autre procédé de remplissage des émeraudes est d'actualité depuis 1995. Contrairement à l'huilage simple des émeraudes, ce traitement introduit des matériaux qui durcissent. Ils remplissent les givres et consolident la gemme. Ce traitement pose un problème d'identification délicat : il s'agit de détecter, dans une fissure très fine, la présence d'un matériau et sa nature.

En 1955, le laboratoire de la Fondation suisse pour la recherche en gemmologie, à Bâle, a identifié dans des émeraudes un certain nombre de produits, essentiellement des résines époxy comme l'« Opticon » ou le « LV15 » initialement mises au point pour masquer et consolider les fêlures des pare-brise de voitures. Bien que délicate, cette expertise des émeraudes est très demandée, car les termes du rapport final font ou défont une vente.

Les traitements évoqués jusqu'ici, même s'ils utilisent des matériaux parfois rares tels des verres à indice de réfraction élevés, ne nécessitent pas l'emploi d'un appareillage important. D'autres procédés relèvent de techniques plus lourdes. Depuis des siècles, on modifie la couleur des pierres en les chauffant, parfois avec du matériel rudimentaire. Au Brésil, par exemple, on transforme l'améthyste claire en citrine (variété jaune du quartz) dans une brouette posée sur le feu. À Ceylan, certains rubis, chauffés dans des braises attisées avec la « pîne » du lapidaire, perdent leur nuance violacée indésirable. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques de la coloration a amélioré les traitements par chauffage.

Sous l'effet de la chaleur, les atomes diffusent, c'est-à-dire qu'ils se déplacent dans la pierre. C'est cette transformation qu'utilisaient sans le savoir les pionniers du chauffage des saphirs



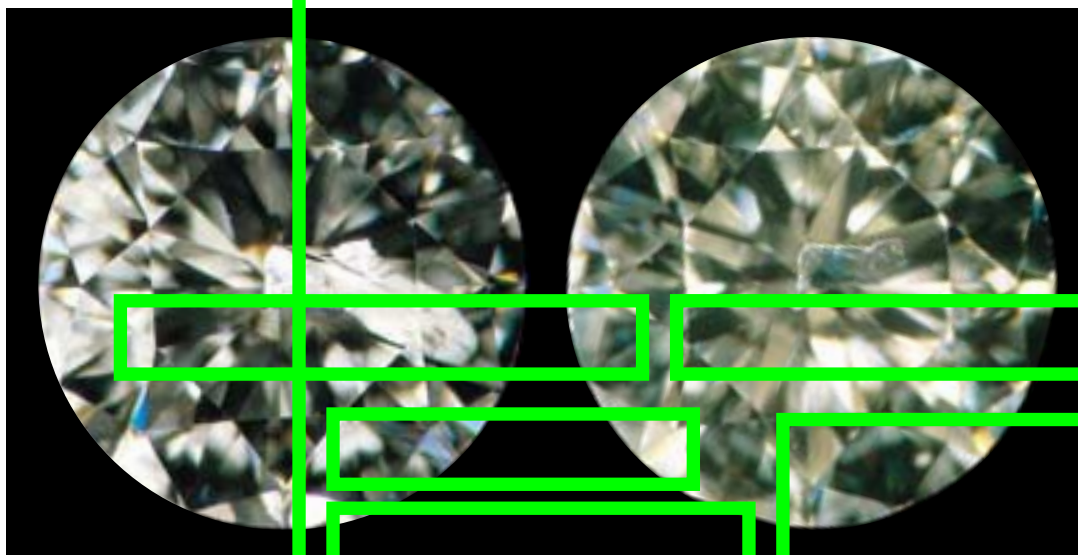
Pascal Entremont

2. CE CABOCHON DE CORINDON de un centimètre de diamètre n'est pas suffisamment rouge pour être facilement commercialisable. À l'aide de la teinture appropriée, l'« huile à rubis » (à droite), très courante sur les gisements de rubis, en particulier en Thaïlande, la pierre aura le rouge idéal pour convaincre le consommateur (la partie supérieure a été teintée).

«geuda» de Ceylan (voir la figure 4). Ces pierres blanches sans valeur contiennent de minuscules inclusions de rutile, un oxyde de titane. Au-delà d'un seuil de température, ces inclusions se dissolvent, et le titane diffuse à l'intérieur du cristal. Lorsque le titane rencontre des atomes de fer, omniprésents dans les saphirs naturels, il peut être piégé, ce qui forme un agrégat stable fer-titane, qui absorbe la lumière entre 0,5 et 0,7 micromètre. Le

saphir est alors d'une belle couleur bleue, tout à fait commercialisable (la longueur d'onde du bleu est comprise entre 0,45 et 0,5 micromètre). Toutefois, le chauffage n'est pas toujours bénéfique : ainsi, si l'on chauffe à haute température un saphir trop riche en fer, des cristallites de spinelle noir (un aluminate de magnésium) vont précipiter donnant une couleur grise translucide sans intérêt.

Enfin, en contrôlant l'atmosphère à l'intérieur du four, on modifie la charge, ou valence, de certains ions, et donc leur absorption. Le contrôle simultané de la température et de la composition de l'atmosphère permet de jouer sur la valence, sur la diffusion et sur la précipitation. On modifie ainsi la couleur de nombreuses pierres (voir l'encadré page 70) non commercialisables pour les transformer en pierres ressemblant à des saphirs bleus, jaunes ou incolores. Cela nécessite des fours qui chauffent à près de 1 800 °C, légèrement sous la température de fusion du saphir. Ces équipements, qui contiennent des dispositifs de circulation gazeuse (hydrogène, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone) indispensables pour le contrôle de l'atmosphère, sont difficiles et dangereux à utiliser : à ces températures, l'hydrogène gazeux risque d'exploser au contact de l'oxygène de l'air. Une fuite serait fatale. Cependant des équipements plus lourds encore sont parfois utiles, tels les accélérateurs de particules, pour l'irradiation des gemmes.



3. DANS UN DIAMANT de pureté médiocre en raison d'une fracture inesthétique (à gauche), on remplit cette dernière d'un verre dont l'indice de réfraction est proche de

celui du diamant. Ainsi, sur le diamant traité (à droite), la fracture est moins visible et la pureté apparente est augmentée. Ce diamant a un diamètre de 4,5 millimètres.

Les gemmes irradiées sont-elles radioactives ?

Le principe de l'irradiation est bien connu : le rayonnement déplace des électrons ou, plus rarement, des atomes de la pierre. Ce déplacement physique des particules, et leur piégeage ailleurs dans la structure atomique, change la valence de certains ions. Si les ions modifiés absorbent la lumière visible, la couleur varie de façon spectaculaire.

Ainsi, dans les tourmalines, deux sortes d'ions de manganèse coexistent : un atome de manganèse auquel il manque deux électrons (le cation Mn^{2+}) et un atome de manganèse auquel il manque trois électrons (le cation Mn^{3+}). À concentrations égales, l'ion Mn^{2+} colore très faiblement comparé à l'ion Mn^{3+} , qui donne un rose vif ou un rouge. Une irradiation modérée suffit à arracher un électron supplémentaire à l'ion Mn^{2+} , le transformant en ion Mn^{3+} . Une tourmaline rose pâle qui contient beaucoup de manganèse sous la forme d'ion Mn^{2+} devient, après exposition à une radiation ionisante, d'un rose prononcé.

Les rayonnements par irradiation obéissent à trois impératifs, parfois contradictoires : l'énergie des particules irradiantes doit être suffisante pour ne pas créer d'isotopes radioactifs ; l'irradiation doit être la moins chère possible, donc relativement courte dans le temps (entre quelques minutes et quelques jours). Pour répondre à ces impératifs, on utilise les dispositifs com-

merciaux disponibles, tels les accélérateurs ou les centres d'irradiation gamma de l'industrie agroalimentaire. Si, aujourd'hui, l'irradiation utilise ces appareils lourds, dès la découverte de la radioactivité naturelle, on irradiait déjà en enterrant les gemmes dans des sels radioactifs. Les gemmes produites étaient cependant radioactives, en raison de la diffusion des radio-isotopes sur quelques couches atomiques.

Les nouveaux traitements combinent différentes méthodes. Par exemple, pour rendre des diamants jaune pâle plus foncés, il faut non seulement les irradier, mais aussi les chauffer dans des conditions adéquates (voir la figure 1). L'irradiation crée des défauts, et le chauffage les déplace dans des sites où l'azote, l'impureté la plus abondante du diamant, les piège.

La topaze bleu intense (*Super blue*) est l'objet type de ces traitements combinés. Les pierres, déjà facettées, sont d'abord irradiées dans un réacteur nucléaire avec des neutrons, puis dans un accélérateur linéaire avec des électrons, avant d'être chauffées. On obtient alors des topazes d'un bleu intense, une couleur très recherchée (voir la figure 1).

D'autres combinaisons existent. Le traitement par diffusion, mis au point dans les années 1970, mais alors peu utilisé, a fait un retour en force sur le marché depuis 1990. Non seulement on trouve des saphirs diffusés bleus, mais également des saphirs orange et rouges (« rubis diffusés »). Pour ce traitement, on combine l'apport d'un

ou de plusieurs éléments chimiques participant à la coloration, et le chauffage. Des saphirs taillés peu colorés, donc non commercialisables, sont plongés dans un mélange d'oxydes contenant les éléments à introduire : de l'oxyde d'aluminium (qui correspond à la composition chimique du saphir), de l'oxyde de titane et un peu d'oxyde de fer. Le tout est porté dans un creuset à environ 1 800 °C. Le titane et le fer diffusent très lentement vers l'intérieur de la pierre taillée et forment des agrégats fer-titane, responsables de la couleur bleue. Le procédé prend jusqu'à 200 heures pour une pénétration de l'ordre de un dixième de millimètre. La pierre devenue bleue en surface, est repolée et prend l'apparence d'un saphir naturel de belle qualité. La couleur n'en reste pas moins superficielle et disparaît si l'on repolit trop la pierre, ou si on la retaille.

Le résultat d'un traitement combiné récent pose de gros problèmes actuellement en Extrême-Orient, où la gemme reparaît sous forme de jadéite. Souvent, des impuretés diverses (des oxyhydroxydes de fer ou des matériaux argileux) sont piégées aux joints de grains entre cristaux et donnent une composante brune ou

grise à la marche. Pour extraire ces minéraux parasites, des contrefacteurs les dissolvent avec de l'acide chlorhydrique puis avec des produits plus doux. Le jade est ainsi débarrassé de ces impuretés jusqu'à une profondeur de dix à trois centimètres, mais il reste alors fragilisé : puisque toutes les plus fines craquelures sont vidées, elles deviennent apparentes et le jade ressemble alors à un morceau de sucre.

Pour y remédier, les instigateurs de la méthode imprègnent les jades blanchis avec des produits d'indice de réfraction proche de celui de la jadéite (1,66), tel le polystyrène. D'une part, puisque ces défauts ne diffusent plus la lumière, les pièces deviennent souvent transparentes, alors qu'elles étaient opaques avant traitement. D'autre part, le matériau regagne sa cohérence mécanique et ne se casse plus aussi facilement. Le résultat final est un jade de belle couleur, éminemment commercialisable (voir la figure 6).

Nous avons vu que les traitements de coloration peuvent être réalisés de manière spectaculaire, mais la question est de savoir s'ils changent-ils pour longtemps ? Certains saphirs incolores irradiés pour les rendre jaunes perdent une partie de leur couleur en quelques heures

d'exposition à la lumière du jour. Parfois, l'effet est moins spectaculaire, mais plus pérenne. Par exemple, le verre remplissant les «glaces» de certains diamants traités fond si la pierre est soumise à une température qui n'endommagerait pas le diamant. En confiant une pierre à un bijoutier pour refaire une griffe de la bague, on peut avoir des surprises : la flamme du chalumeau, utilisée pour travailler l'or, fait «suer» le verre hors du diamant et les fractures apparaissent. Cela peut inciter le propriétaire de la bague, ignorant le traitement, à croire que le bijoutier a changé la pierre de la bague, ce qui crée une situation inconfortable pour le bijoutier et pour le client. Comment identifier facilement un traitement ?

Sherlock Holmes chez Ali Baba

Les diamants aux fractures remplies, qui relèvent d'une technique relativement récente, sont aisément détectables par l'observation au microscope binoculaire. L'indice de réfraction du matériau de remplissage, ainsi que celui du diamant dépendent de la longueur d'onde. Ces indices ne sont

Les multiples facteurs des couleurs

Au début du XIX^e siècle, Goethe est l'un des premiers à relier la coloration améthyste du quartz à la présence d'impuretés de fer. Si la simple correspondance entre une couleur et un élément donné se vérifie assez bien, une même couleur peut être obtenue à partir de procédés très différents. De surcroît, la couleur n'est pas une propriété intrinsèque de l'objet, mais dépend de la source lumineuse. L'alexandrite, par exemple, est verte à la lumière du jour, et rouge à la lumière d'une bougie.

Dans les gemmes, plusieurs mécanismes responsables de la couleur ont été identifiés, dont l'absorption par des impuretés d'ions, le transfert de charge, la formation des centres de couleurs et les effets optiques. Lorsque, dans une pierre donnée, la couleur est due à la présence d'ions, on reconnaît facilement l'origine de la couleur. En revanche, lorsque la couleur met en jeu un transfert de charge, ou plusieurs atomes, la détermination est plus délicate.

Les impuretés sont des ions de métaux de transitions (titane, vanadium, chrome, manganèse, fer, cobalt, nickel et cuivre) suffisamment éloignés pour qu'il n'y ait aucune interaction. Certains de ces ions absorbent de la lumière, ce qui altère la lumière transmise, et donne la couleur de la gemme. La couleur diffère selon le type d'ion, mais aussi selon sa charge, la nature des atomes voisins et d'autres facteurs, comme la coordination de l'ion (l'arrangement des atomes et des ions). On recense une quinzaine d'ions, qui créent une grande variété de couleurs. La coexistence de plusieurs sortes d'ions modifie l'absorption et la couleur. Ainsi, la même

couleur, comme le vert, se rencontre dans une gemme donnée, comme le jade, pour différentes raisons : l'absorption par des ions de chrome (Cr^{3+}) produit le «vert émeraude», tandis que celle par les ions de fer (Fe^{3+}) donne un vert plus jaune.

D'autres causes de la coloration font intervenir, non des ions isolés, mais des groupements. Par exemple, dans les agrégats fer-titane responsables de la coloration bleue des saphirs, l'absorption est due au transfert d'une charge d'un ion de fer (Fe^{2+}) à un ion de titane (Ti^{4+}). Enfin, les centres colorés sont des défauts de structure du cristal : un atome manquant (lacune) ou un atome additionnel (interstitiel). Lorsque des électrons extraits par irradiation ailleurs dans le cristal s'insèrent dans ces défauts, l'absorption est modifiée.

Une cause plus inhabituelle de la couleur des gemmes met en jeu la structure du cristal entier, ou du moins une région macroscopique du cristal, par sa structure électronique ou par des phénomènes internes tels que les interférences, la diffraction ou la diffusion. Ainsi, l'apparence multicolore de l'opale noble est due à la diffraction de la lumière par un empilement régulier de minuscules billes de silice, incluses dans la gemme.

Des hypothèses contradictoires quant à l'origine de certaines couleurs, ainsi que le faible nombre de publications, montrent que ce domaine de la gemmologie nécessite encore un travail approfondi. Là aussi, grâce aux techniques modernes, les gemmologues progressent.

égaux que pour une longueur d'onde particulière. Quand on éclaire une pierre traitée avec de la lumière blanche, la dispersion de la lumière crée un « flash » caractéristique. Tout aussi révélatrice, l'observation à l'œil nu ou au microscope révèlent de fines lignes blanches formées à l'affleurement des fractures remplies, inexistantes pour des pierres non traitées. Ces lignes blanches seraient dues à la réflexion de la lumière sur le ménisque formé par le matériau de remplissage, à l'affleurement de la fracture (le matériau est introduit à l'état liquide).

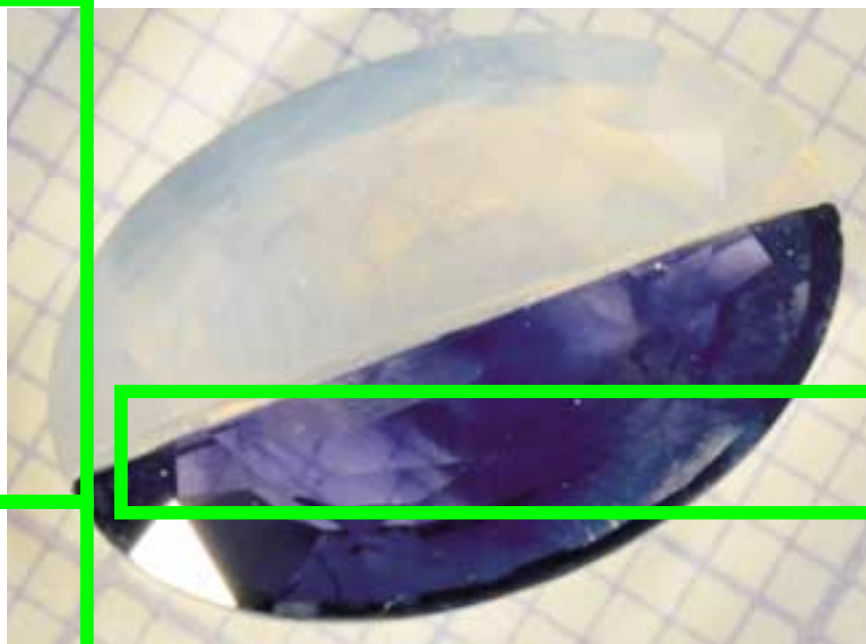
L'observation microscopique suffit aussi pour reconnaître des saphirs « diffusés ». Dans ces pierres, la couleur introduite ne pénètre que d'un dixième de millimètre, de sorte que, lorsque l'on repolait la pierre, on enlève souvent toute la couleur au centre d'une facette, alors que, sur les bords, il en reste un peu. Un saphir soupçonné de ce traitement est immergé dans un liquide d'indice de réfraction proche de celui de la pierre. La plupart des réflexions internes sont supprimées. Lorsque la pierre est traitée, on note alors, sous microscope, une répartition de la couleur qui diffère de celle d'une pierre non traitée.

Parfois, ce n'est pas l'observation, mais une mesure qui permet la distinction. Ainsi, certains diamants jaunes irradiés sont aisément reconnaissables à la présence d'une absorption à une longueur d'onde précise – 0,595 micromètre – visible au spectroscope à main. Cette absorption est due à une lacune créée lors de l'irradiation et qui contient de l'azote.

Bien que la plupart des pierres exposées à une irradiation en ressortent non radioactives, certaines contiennent parfois des radio-isotopes. C'est par exemple le cas de quelques topazes bleues traitées et d'un petit nombre de diamants verts ou noirs irradiés. Ce sont des impuretés dispersées dans le réseau cristallin ou concentrées dans des fractures qui se transforment en atomes radioactifs, sous l'effet d'une irradiation trop puissante. Dans la mesure où les équivalents naturels des pierres traitées citées plus haut sont non radioactifs, l'émission de rayonnement bêta (émission d'électrons) ou gamma (émission de photons) identifie les coupables. Nous avons ainsi mesuré une forte radio-

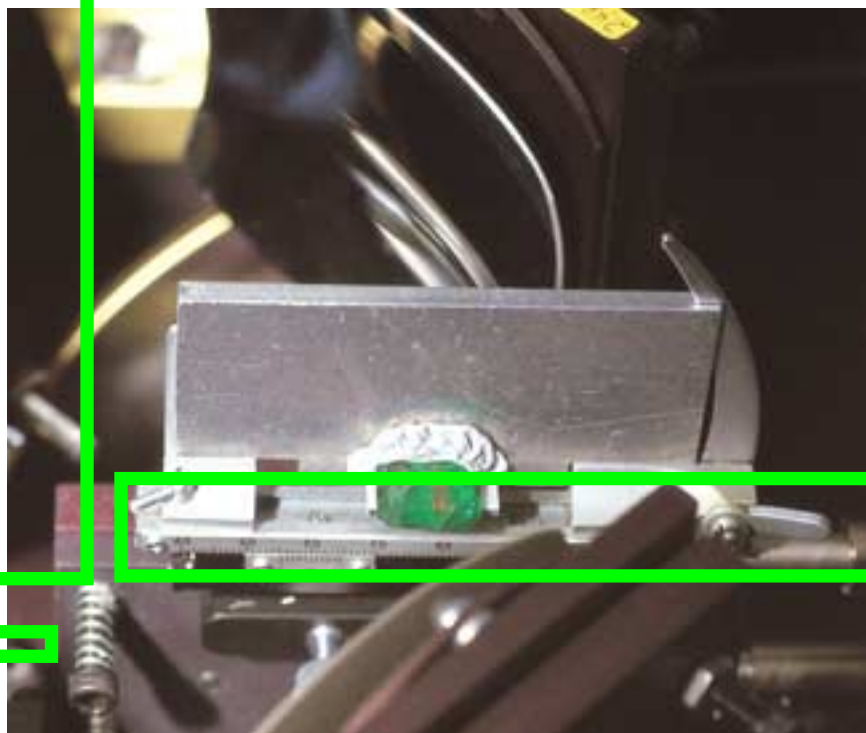
activité alpha (émission de protons) et gamma d'américium dans un diamant vert traité de 12 carats, et une radioactivité de quatre à cinq fois le bruit de fond pour quelques topazes bleues traitées proposées à la vente.

Pour les cas difficiles, la gemmologie dite de laboratoire prend le relais : elle utilise des instruments plus lourds et plus chers que ceux utilisés de manière routinière en gemmologie, par exemple les spectromètres d'absorp-



Pascal Entremont

4. CE SAPHIR GEUDA (12 millimètres de long, 8 millimètres de large) a été coupé en deux. Avant traitement, la pierre est laiteuse et inutilisable en joaillerie. La partie bleue montre la pierre après chauffage : le saphir est transparent et de belle couleur. Les minuscules inclusions de rutile (un oxyde de titane) qui donnaient l'aspect laiteux se sont dissoutes dans la pierre, et le titane libéré a formé avec le fer des agrégats fer-titane, responsables de la couleur bleue.



Alain Cossard, Université de Jénes

5. DANS UN SPECTROMÈTRE INFRAROUGE, on analyse une émeraude. Un rayonnement laser infrarouge est émis en direction de la pierre (il suit le laser rouge dont on aperçoit l'impact sur l'émeraude). Si des polymères ou des résines époxy remplissent les fractures de la pierre, l'absorption du rayonnement infrarouge par ces atomes révélera leur présence.

tion dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge. Peut-être plus important encore, ce type d'analyse requiert une interprétation des données, donc une formation scientifique supérieure à celle des diplômés de gemmologie classique.

La technique la plus utilisée, et celle qui permet de distinguer le jade B du jade naturel, est la spectroscopie par absorption dans l'infrarouge moyen (entre 3 et 30 micromètres). La spectroscopie par absorption est fondée sur la quantité de rayonnement infrarouge absorbée par la pierre. À l'aide de cette absorption, caractéristique des atomes présents, on analyse et on identifie les matériaux intrus, notamment les polymères (voir la figure 5).

Les matériaux organiques et, en particulier le groupement CH_3 , absorbent beaucoup le rayonnement infrarouge dans un domaine où les gemmes naturelles absorbent peu. La présence de ces groupes est ainsi facilement détectable et constitue une preuve de l'ajout de matériaux étrangers, presque toujours par imprégnation (voir la figure 6). Ces techniques sont tellement utiles que certains marchands ont acquis leur propre spectromètre infrarouge, pour vérifier systématiquement si les pièces de jade qui leur sont soumises sont traitées. Le même type de mesure s'applique aux turquoises et aux opales imprégnées de polymères.

La spectrométrie permet aussi d'identifier deux caractéristiques importantes : d'abord, le « type » de diamant, selon que l'on trouve ou non certaines raies d'absorption de l'azote, l'impureté la plus commune du diamant. D'après

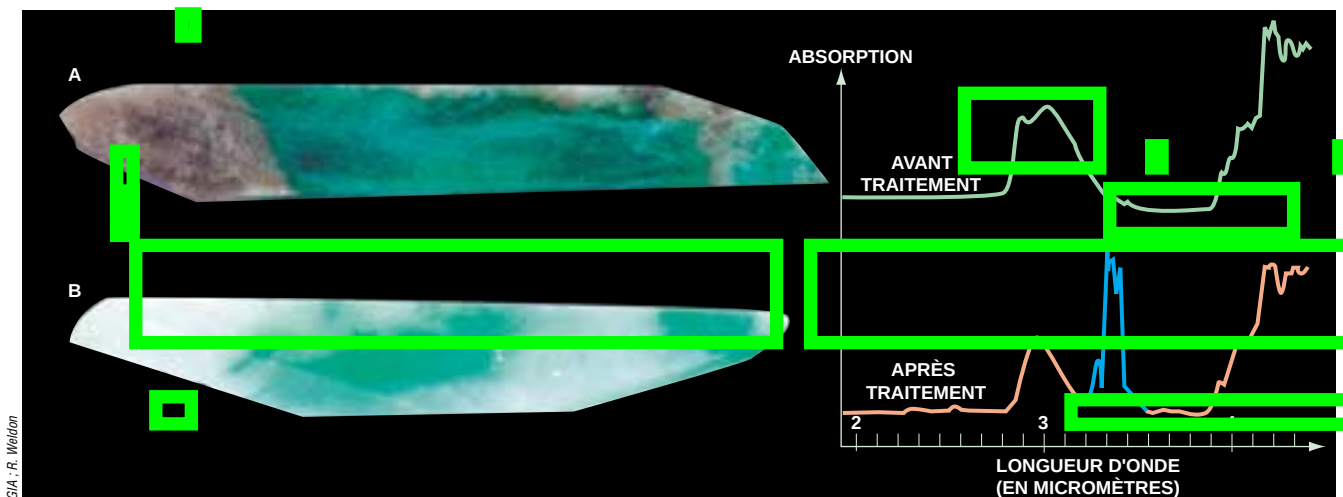
ce type, on sait sous quelle forme se trouve l'azote, ce qui constitue un premier indice dans la détection d'un traitement. La seconde caractéristique est la présence de raies de transition dans l'infrarouge, diagnostic des diamants irradiés, puis chauffés.

La spectrométrie par absorption dans le domaine ultraviolet (entre 0,01 et 0,4 micromètre), dans le visible (entre 0,4 et 0,8 micromètre) et dans le proche infrarouge (entre 0,8 et 3 micromètres) a aussi montré son utilité pour débusquer les gemmes traitées, en particulier certains diamants colorés, très chers, notamment les diamants verts. Quelques critères encore partiels ont été établis pour distinguer les diamants verts naturels des diamants traités par irradiation. Ces critères se fondent sur la présence ou l'absence de quelques bandes d'absorption (notamment à 0,595 micromètre), mais aussi sur la largeur d'une raie à 0,741 micromètre, due à une lacune de carbone créée par irradiation qui participe à l'absorption d'où résulte la couleur verte. Ces mesures d'absorption sont particulièrement difficiles, car on doit placer la gemme dans de l'azote liquide à $-195,8^\circ\text{C}$: à cette température, les raies sont plus fines et on les distingue mieux (la largeur d'une raie dépend de la température). De surcroît, les diamants sont facettés de telle sorte que la lumière visible est renvoyée vers sa source, et non à travers la gemme. L'obtention d'un spectre nécessite ainsi un placement de la gemme qui fait passer le plus de lumière au travers. Cette technique, bien qu'utile, est délicate à mettre en œuvre.

Récemment, deux autres techniques ont montré leur valeur pour des cas particuliers de gemmes traitées. À l'aide de la technique de diffusion Raman, on détecte le remplissage des fractures des émeraudes non seulement avec de l'huile, mais aussi avec une variété de matériaux organiques. Lorsque l'on émet une lumière à une longueur d'onde donnée, cette lumière est diffusée et sa fréquence change de manière caractéristique selon les molécules diffusantes. Ces mesures révèlent la nature du produit présent dans une fracture, comme les polymères que l'on trouve dans le jade B ou dans d'autres gemmes imprégnées.

La fluorescence X à dispersion d'énergie permet d'identifier un type mal connu, mais fréquent, de traitement de la turquoise, le traitement « Zacharie ». Ce traitement, mal connu, donne une turquoise plus belle, moins poreuse, qui se polit mieux. La fluorescence X consiste à exciter les électrons des couches internes des atomes de la gemme. Lors de leur relaxation, ces atomes produisent des raies caractéristiques dont l'intensité dépend de la concentration. Sans préparation, la fluorescence X indique rapidement la composition chimique qualitative de l'échantillon étudié. Une comparaison systématique des turquoises non traitées et des turquoises traitées « Zacharie » montre que ces dernières contiennent une concentration supérieure en potassium.

Si toutes les techniques de laboratoire citées étaient déjà utilisées en gem-



6. CETTE PIÈCE DE JADE a été sciée. En haut, la pierre brute après son extraction ; en bas, la pierre a été « améliorée » : on l'a blanchie, puis imprégnée d'un polymère à l'indice de réfraction proche de celui du jade (du polystyrène). Pour distinguer ce jade B du jade naturel de

bonne qualité, on utilise la spectroscopie infrarouge. L'absorption de la lumière infrarouge du jade B (en bas) diffère de celle du jade naturel (en haut) : on y observe une absorption supplémentaire due à la présence du polymère vers 3,3 micromètres (partie bleue du spectre).

mologie pour caractériser des gemmes synthétiques (c'est-à-dire créées en laboratoire), il est symptomatique qu'un nombre croissant de ces méthodes élaborées soient nécessaires à l'identification correcte de nouveaux traitements des gemmes.

Malgré les efforts des gemmologues, un petit nombre de traitements demeurent indécélables. C'est le cas lorsque le procédé inventé par l'homme reproduit d'assez près celui de la formation naturelle de la pierre. Ainsi, on ignore pour l'instant comment détecter les tourmalines roses irradiées. Les mécanismes d'irradiation employés commercialement, bien que différents des procédés naturels, en sont suffisamment proches pour qu'aucune différence n'ait encore été identifiée.

Gemmes et droit du consommateur

Comment le consommateur peut-il savoir qu'une pierre est traitée? L'approche naïve consiste à penser que le vendeur lui indiquera l'existence du traitement. Or, le vendeur ignore souvent que la pierre qu'il vend a été traitée: l'information a pu se perdre en route. En 1994, des détaillants ont été surpris d'apprendre, lors d'une réunion avec des grossistes, que des pierres traitées leur avaient été vendues.

En France, tout manquement à signaler qu'une pierre est traitée est sévèrement condamné par la loi de 1968, qui précise que «les termes "diamant", "rubis", "saphir" et "émeraude" employés seuls ou suivis du qualificatif "naturel", "véritable" ou "fin", sont réservés aux diamants, rubis, saphirs et émeraudes formés dans les sites naturels d'où ils ont été extraits et qui n'ont subi d'autres interventions de l'homme que la taille et le polissage». Malheureusement, cette loi est rarement appliquée, et des gemmologues ont formé une association pour son application. Autre lacune du système: aucune compétence en gemmologie n'est requise pour ouvrir une bijouterie-joaillerie.

Pour pallier ces insuffisances, le consommateur doit exiger du vendeur l'indication que le bijou ne contient que des pierres naturelles et non traitées. Notons à ce propos qu'un laboratoire d'expertises gemmologiques est ouvert au public, à la Chambre de commerce et d'industrie de Paris.



7. LES CABOCHONS DE CE BRACELET ET DE CES BAGUES ont été traités par blanchissage, puis par impregnation, à l'exception de l'un d'entre eux. Pouvez-vous deviner lequel (la réponse est indiquée ci-dessous)? L'ingéniosité et l'habileté des traicteurs de jade est telle que seules des techniques élaborées, telle la spectrométrie, permettent d'identifier la présence du traitement.

Aujourd'hui, le plus gros problème de la gemmologie demeure la multiplication des nouveaux traitements, apanage de groupes riches et organisés. Face à ces traitements inconnus, le gemmologue est démuné: les organisations officielles ne sont pas concernées par cette nouvelle discipline, à la limite de la physique des matériaux et des sciences naturelles, de sorte que les efforts consentis sont moindres que ceux faits pour le développement des traitements.

Au sein de la Banque de France, des chimistes essaient de fabriquer des faux billets en inventant de nouvelles méthodes. À l'instar de ces contrefacteurs officiels, les organisations de vente des gemmes pourraient...

le but serait d'inventer de nouveaux traitements avant que ceux-ci n'arrivent sur le marché. Développons la science des gemmes pour relancer le secteur économique de la bijouterie sur des bases plus saines.

FRITZ FRITSCH est professeur au Laboratoire de physique cristalline à l'Institut des matériaux de Nantes (IMN). SHIGLEY est directeur de la recherche à l'Institut américain de gemmologie (GIA) à Carlsbad, en Californie. Bernard LASNIER est professeur à l'Université de Nantes.

K. NASSAU, *Gemstone Enhancement*,

Butterworths, 1984. Traduit en français par Michèle May, 1990, mémoire de DUG, Université de Nantes.

P. BARIAND et J.-P. POIROT, *Larousse des pierres précieuses*, Larousse, 1984.

R.C. KAMMERLING, J.I. KOIVULA et R.E. KANE, *Gemstone Enhancement and Its Detection in the 1980s*, in *Gems & Gemology*, vol. 26, n° 1, pp. 32-49.

La mission Ulysse

EDWARD SMITH • RICHARD MARSDEN

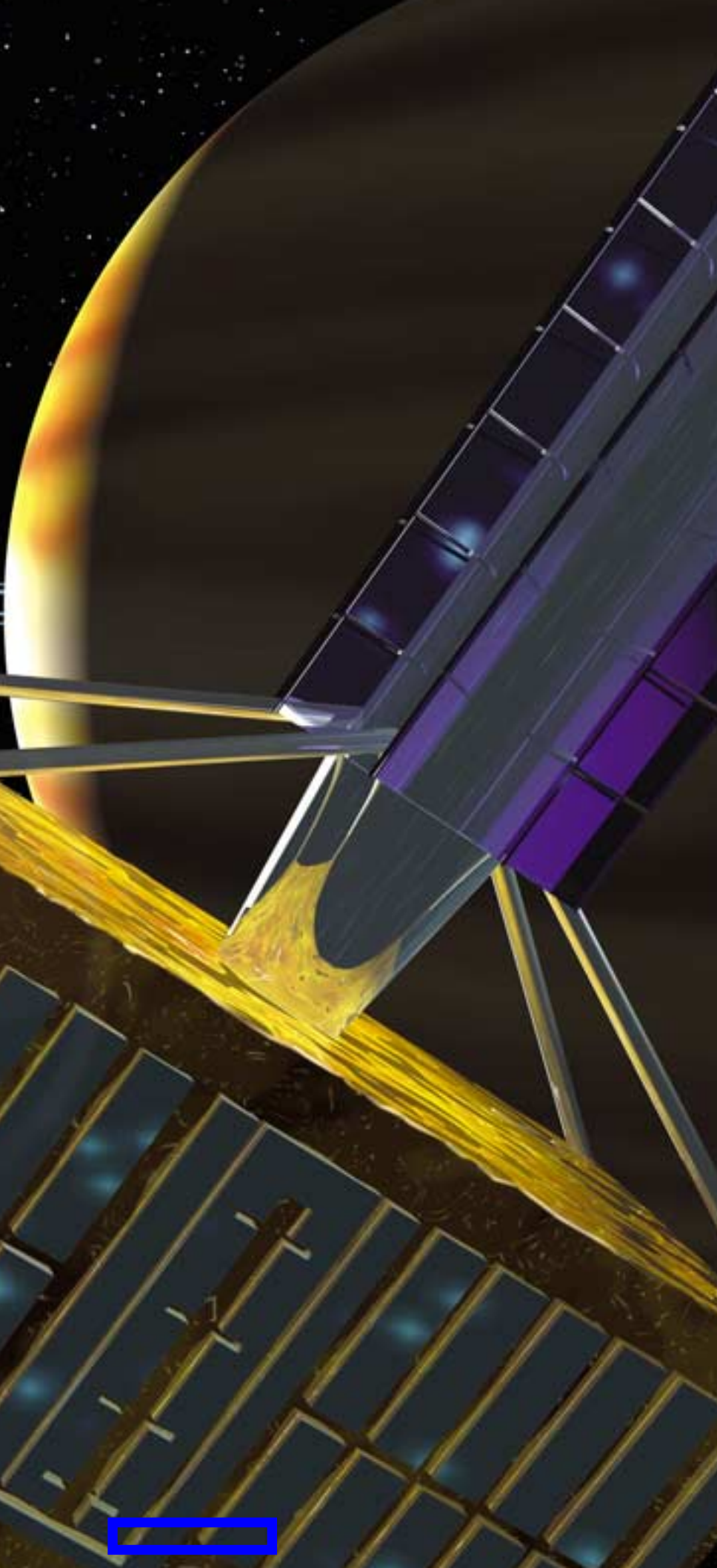
La sonde Ulysse a survolé les pôles du Soleil et analysé le fonctionnement de notre étoile.

MARS

TERRE

VÉNUS

MERCURE



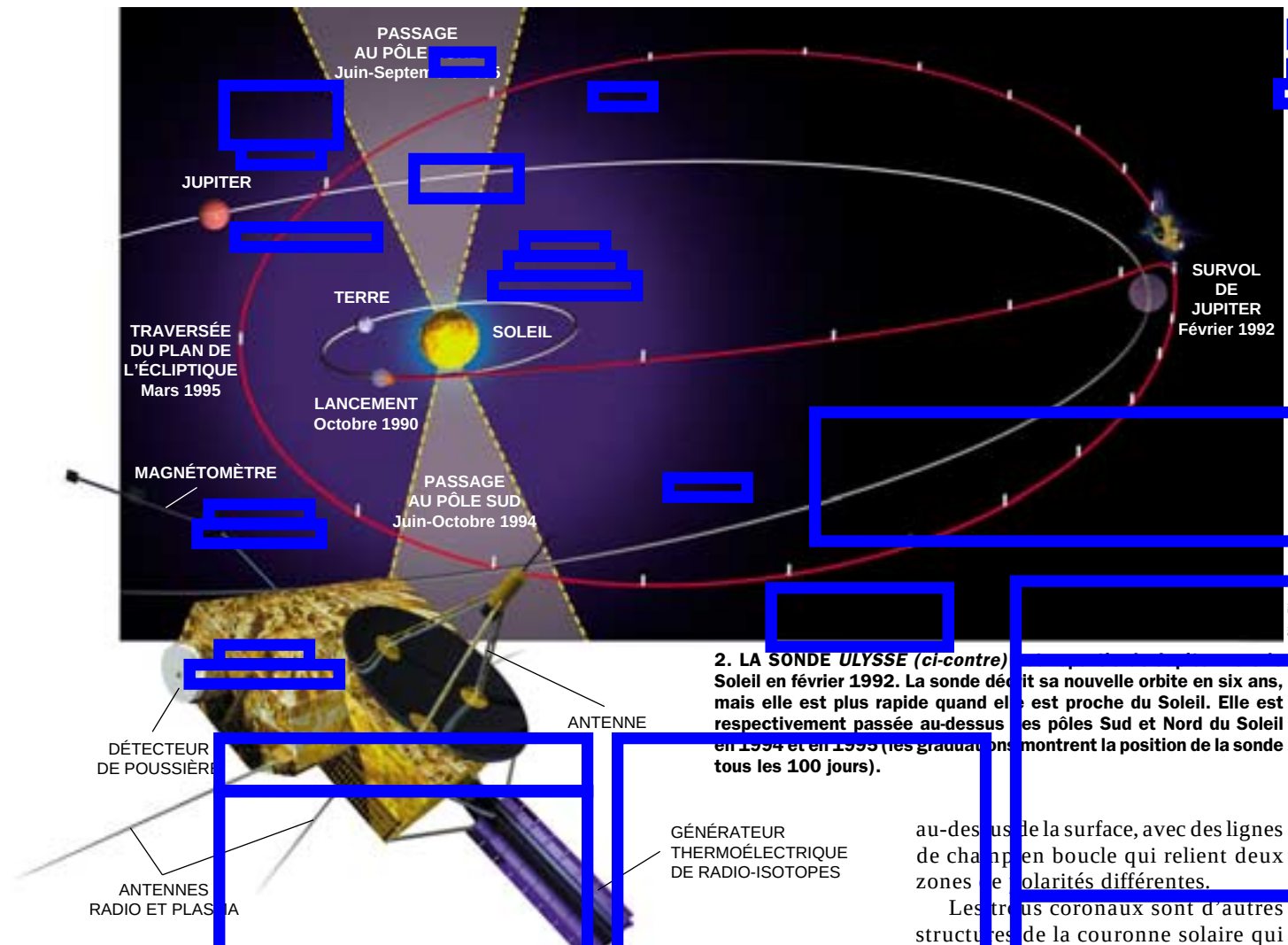
Des voyageurs parcourent la Terre depuis des millénaires, mais on n'a exploré les déserts glacés de l'Arctique et de l'Antarctique qu'au XX^e siècle. De même, pendant quatre décennies, les sondes scientifiques envoyées dans l'espace sont restées près du plan équatorial du Soleil, où s'inscrivent les orbites de la Terre et d'autres planètes, mais on n'explore les «régions polaires» du Système solaire que depuis peu : la sonde *Ulysse*, consacrée à ces régions, n'a été lancée qu'en 1990.

Pourtant la curiosité des astrophysiciens était grande : ils savent depuis plusieurs décennies que le Soleil est entouré d'une atmosphère diaphane, la couronne solaire, qui s'étend au-delà de l'orbite de la Terre ; si les queues de comète pointent constamment dans la direction opposée du Soleil, c'est parce que leurs gaz sont repoussés par la matière qui s'écoule rapidement de la couronne solaire en un flot nommé vent solaire. Encore récemment, toutefois, les astrophysiciens ne savaient pas comment la matière émanant des pôles solaires parcourt les vastes étendues interplanétaires.

Le vent solaire a des effets très importants. S'il était absent, la matière dispersée dans l'espace – gaz, poussières et particules isolées – dériverait près du Soleil et flotterait dans le vide entre les planètes. Le vent solaire balaie cette matière bien au-delà de l'orbite des planètes les plus lointaines. L'immense domaine ainsi nettoyé, l'héliosphère, restait largement inexploré ; notamment on connaissait très mal l'état des régions à haute latitude.

L'envoi d'une sonde en dehors du plan de l'écliptique semblait toutefois difficile : pour sortir de l'écliptique, un vaisseau spatial doit perdre la quantité de mouvement qu'il reçoit de sa plate-forme de lancement, la Terre, qui tourne autour du Soleil à la vitesse de 30 kilomètres par seconde. En raison de cette vitesse initiale considérable, même les fusées les plus puissantes ne peuvent expédier une sonde directement sur une orbite perpendiculaire à l'écliptique. La seule manière d'obtenir une telle orbite est d'utiliser la force gravitationnelle d'une planète géante,

1. JUPITER a modifié la trajectoire de la sonde *Ulysse* et lui a fait quitter le plan de l'écliptique, qui contient les orbites des planètes du Système solaire. La sonde est alors partie vers le pôle Sud du Soleil, sur une orbite inclinée de 79 degrés par rapport au plan de l'écliptique.



2. LA SONDE ULYSSE (ci-contre)
Soleil en février 1992. La sonde décrit sa nouvelle orbite en six ans, mais elle est plus rapide quand elle est proche du Soleil. Elle est respectivement passée au-dessus des pôles Sud et Nord du Soleil en 1994 et en 1995 (les graduations montrent la position de la sonde tous les 100 jours).

Jupiter en l'occurrence, afin de dévier la sonde dans la direction voulue.

De nombreux ingénieurs craignaient que les rayonnements intenses au voisinage de Jupiter n'endommagent l'électronique sensible emportée par la sonde, mais deux engins spatiaux, *Pioneer 10* et *Pioneer 11*, survolèrent Jupiter au début des années 1970 et démontrèrent qu'ils résistaient aux tempêtes de particules énergiques. Une mission autour des pôles du Soleil fut alors décidée : elle fut nommée *Ulysse*, comme le guerrier grec mythique qui traversa également des territoires inexplorés.

La NASA et l'Agence spatiale européenne collaborèrent à ce projet à partir de 1977, mais le lancement de la sonde *Ulysse* n'eut lieu qu'en 1990 : il fallait étudier l'engin, le fabriquer, le tester. Initialement l'Europe et les États-Unis voulaient construire des sondes séparées, mais les impératifs budgétaires imposèrent que l'Agence spatiale européenne construise une sonde qui serait

envoyée par la NASA ; elle emporterait des instruments européens et américains. Puis un accident désastreux se produisit l'année même où la sonde *Ulysse* devait être chargée dans la navette spatiale : la navette *Challenger* explosa peu après le décollage, immobilisant la flotte de navettes pendant deux ans. Ainsi, en 1986, après neuf années de préparation, la sonde *Ulysse* resta clouée au sol pendant quatre ans.

Feu et vent

Bien avant le début de la mission *Ulysse*, les observations faites du sol ou par des satellites en orbite autour de la Terre avaient montré que le vent solaire n'est pas uniformément émis par tous les points du Soleil. Les boucles brillantes qui s'élèvent très haut au-dessus du Soleil, au voisinage de l'équateur solaire, émettent beaucoup plus de vent solaire que les autres régions. Ces «arches éruptives» suivent le champ magnétique du Soleil, qui s'étend bien

au-dessus de la surface, avec des lignes de champ en boucle qui relient deux zones de polarités différentes.

Les trous coronaux sont d'autres structures de la couronne solaire qui émettent des courants rapides de vent solaire. Ces zones, qui se caractérisent par une absence de matière visible, peuvent apparaître n'importe où à la surface du Soleil, mais ils sont habituellement présents aux calottes polaires.

La sonde *Ulysse* a montré que le vent solaire n'est pas uniforme dans l'hémisphère : après avoir tourné autour de Jupiter et commencé son voyage vers le Sud (c'est-à-dire vers le pôle solaire qui se trouve du même côté que le pôle Sud terrestre), la sonde a traversé une région de vent rapide qui provenait d'un trou coronal situé au pôle Sud du Soleil : les capteurs ont détecté un vent intense, au débit régulier et dont la vitesse moyenne était deux fois supérieure à celle des rafales des latitudes inférieures. Comme la sonde a rencontré ce vent rapide bien avant d'atteindre la latitude du trou coronal méridional du Soleil, on a conclu que le vent polaire se détend considérablement après avoir quitté le Soleil.

Cette détente inattendue a été expliquée par d'autres mesures. Avant l'envoi de la sonde, les astrophysiciens mesuraient indirectement le champ magnétique solaire, en examinant comment certains éléments de l'héliosphère absorbent les divers rayonnements lumineux ; comme les longueurs d'onde absorbées dépendent du champ magnétique, ils déduisaient l'intensité du champ magnétique solaire. En utilisant cet « effet Zeeman », ils avaient trouvé que le champ magnétique autour du Soleil ressemblait à celui qui enveloppe la Terre : les lignes de champ magnétique sont concentrées au voisinage des deux pôles magnétiques, localisés près de l'axe de rotation.

Toutefois la sonde a révélé que, loin du Soleil, le flux magnétique est quasi égal à toutes les latitudes. Les astrophysiciens ont conclu que la détente du vent solaire émis par les pôles doit être causée par des forces magnétiques qui poussent le vent vers l'équateur et étalent les lignes du champ magnétique.

Le champ magnétique et le vent solaire sont étroitement liés, parce que le vent se compose de particules chargées (la couronne solaire est si chaude – à une température d'un million de degrés – que les atomes perdent des électrons, chargés négativement, et forment des ions positivement chargés). Toutefois, tant la couronne chaude que le vent solaire qui en émerge sont électriquement neutres, parce qu'ils se composent d'ions positifs et d'électrons négatifs en nombres égaux. Malgré leur attraction mutuelle, les ions et les électrons du vent solaire ne se recombinaient pas, parce que la densité de matière est faible et que la probabilité de rencontre de deux particules est infime.

Ces particules chargées sont soumises à l'influence des champs magnétiques : elles tournent autour des lignes de champ magnétique en orbites serrées. Inversement, le champ magnétique est modifié par les particules chargées du vent solaire : les mouvements du vent solaire repoussent les lignes de champ, qui oscillent comme des algues prises dans les courants.

Intrus galactiques

Les astrophysiciens savent depuis de nombreuses années que les particules chargées de l'espace interplanétaire ne proviennent pas toutes du Soleil. Certaines sont des noyaux atomiques qui ont été accélérés dans la Galaxie à des vitesses proches de celle de la lumière. On sait détecter les plus énergiques de ces particules lorsqu'elles bombardent l'atmosphère : ce sont les rayons cosmiques.

Plus, il y a 40 ans, des satellites ont montré que l'espace est traversé par de nombreuses particules d'énergie inférieure à celle des rayons cosmiques trouvés à la surface de la Terre ; le Système solaire est envahi par des particules variées qui semblent provenir de toutes les directions de la Galaxie.

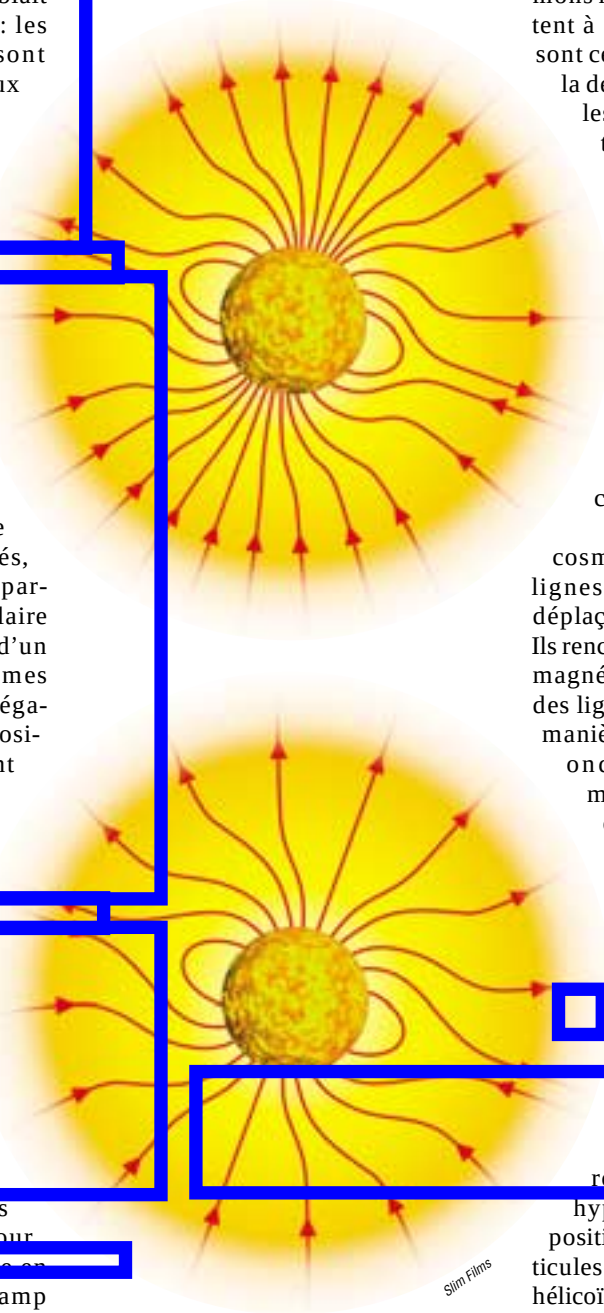
Le vent solaire doit empêcher certains rayons cosmiques galactiques d'approcher du Soleil : une partie d'entre eux seulement pénètrent dans l'héliosphère interne où, tels des saumons remontant la rivière, ils se heurtent à des obstacles successifs. Quels sont ces obstacles, dans un espace où la densité de matière est si faible que les rayons cosmiques et les particules du vent solaire ne se heurtent pas ? Le vent solaire transporte le champ magnétique dans son mouvement.

Parce que, composé de matière ionisée, il est comme un arceau métallique, qui fige les lignes de champ. Les rayons cosmiques qui arrivent au Soleil sont soumis aux forces que les champs magnétiques exercent sur les particules chargées en mouvement.

Plus précisément, les rayons cosmiques s'enroulent autour des lignes de champ magnétique en se déplaçant dans la direction du champ. Ils rencontrent ainsi, parfois, des ondes magnétiques, qui se propagent le long des lignes de champ magnétique à la manière d'un drapeau qui flotte. Ces ondes provoquent de brusques modifications de la direction du champ magnétique, perturbant le mouvement des particules chargées de la même façon que le ressac repousse un nageur qui s'avance dans la mer.

Avant la mission *Ulysse*, les astronomes supposaient que les rayons cosmiques qui arrivaient au Soleil par les pôles pénétraient plus facilement dans l'héliosphère que ceux qui empruntaient des routes plus équatoriales. Leur

hypothèse se fondait sur deux suppositions. D'une part, comme les particules chargées suivent une trajectoire hélicoïdale le long des lignes de champ magnétique, ils avaient pensé que les lignes de champ arrivant aux pôles, plus droites et plus courtes, canalisent mieux les particules dans l'héliosphère. D'autre part, certains physiciens



3. LE CHAMP MAGNÉTIQUE SOLAIRE semblait être concentré aux pôles (en haut), mais la sonde *Ulysse* a révélé que les lignes de champ magnétique sont régulièrement espacées à la surface du Soleil (en bas).

croyaient que les ondes et les diverses perturbations du champ seraient minimales, parce que le vent solaire s'écoule régulièrement à partir des trous coronaux polaires.

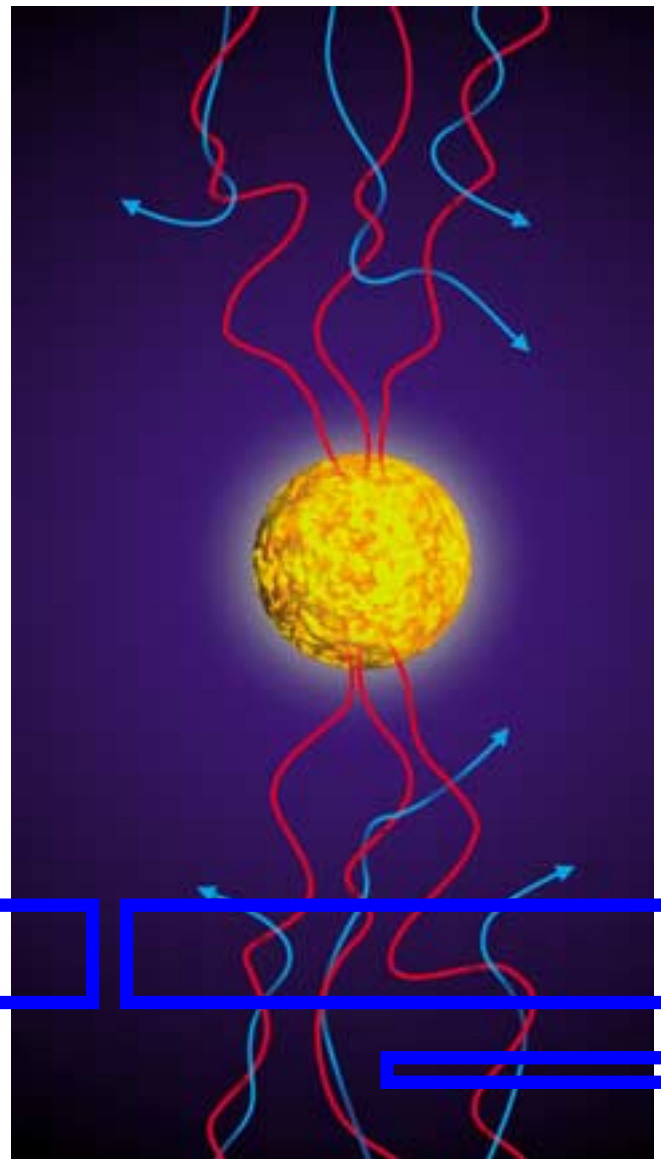
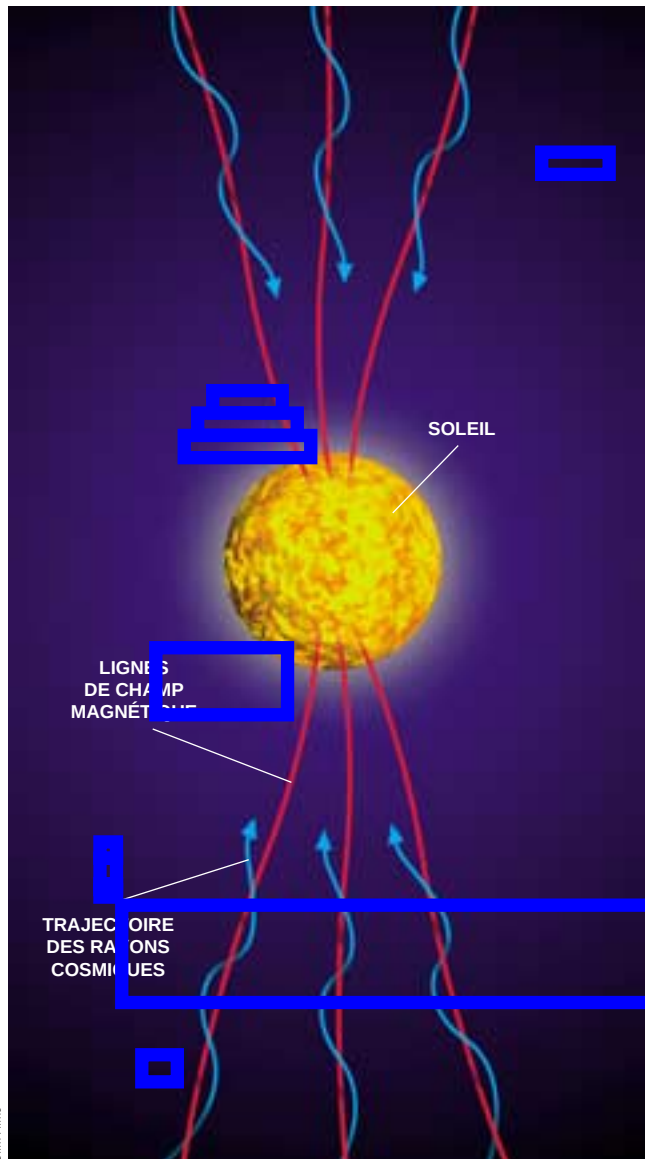
Les mesures de la sonde *Ulysse* ont montré que les rayons cosmiques sont à peine plus abondants au-dessus des pôles du Soleil qu'au voisinage de l'équateur : la sonde a trouvé des ondes qui rident le champ magnétique polaire, s'opposant au passage des rayons cosmiques vers les calottes polaires. De telles perturbations dévient les particules cosmiques durant leur périple dans l'héliosphère ; au total, les rayons cosmiques atteignant l'héliosphère interne sont homogénéisés par le champ magnétique tumultueux,

comme les composants d'un cocktail dans un shaker.

Prendre de la vitesse

Les rayons cosmiques ne sont pas les seules particules présentes dans l'héliosphère : d'autres particules rapides y naissent. D'une composition similaire à celle des ions du vent solaire, elles se meuvent considérablement plus vite que lui. Mieux encore, elles se déplacent si vite qu'elles n'ont pu gagner leur énergie élevée par chauffage ; apparemment ces ions très rapides sont accélérés par un phénomène analogue à celui qui est mis en œuvre dans les accélérateurs de particules nommés cyclotrons.

Dans un cyclotron, les particules chargées qu'on injecte sont piégées par un champ magnétique intense autour duquel elles tournent en spirale, tout en recevant de l'énergie d'un champ électrique oscillant. Dans l'espace, des champs électriques et magnétiques intenses apparaissent que dans des circonstances particulières, par exemple lorsqu'un flot rapide de vent solaire rencontre des flots plus lents, devant eux : un front incurvé de hautes pressions se forme, créant de grandes ondes magnétiques qui se propagent vers l'avant et vers l'arrière. Ces ondes magnétiques s'intensifient progressivement, telles les vagues qui approchent du rivage, et elles forment finalement des ondes de choc, de



4. AVANT L'ENVOI DE LA SONDE *ULYSSE*, on croyait que les rayons cosmiques étaient guidés par les lignes de champ magnétique vers les calottes polaires du Soleil (à gauche). Toutefois la sonde a montré que ces lignes de champ magnétique polaires sont

tordues par des ondes magnétiques (à droite) : leurs irrégularités, qui sont approximativement de la même taille que le rayon de giration des particules, gênent l'écoulement des rayons cosmiques vers le Soleil.

minces couches où les propriétés du vent solaire changent brusquement.

Les mesures effectuées par les sondes qui ont précédé *Ulysse* ont démontré que de telles ondes de choc accélèrent parfois les particules considérablement. Voilà pourquoi les particules énergiques apparaissent régulièrement dans le voisinage de la Terre, deux fois par rotation solaire : l'axe magnétique du Soleil étant un peu incliné vers l'écliptique, notre planète reçoit alternativement un vent solaire lent, issu des environs de l'équateur solaire, et un vent rapide venant d'abord d'une calotte polaire, puis de l'autre ; les alternances engendrent les ondes de choc, et les particules rapides.

Entre la Terre et Jupiter, la sonde *Ulysse* a observé de nombreuses concentrations de particules énergiques associées à de telles ondes de choc.

Toutefois, après avoir quitté les basses latitudes, elle cessa d'observer des ondes de choc, parce qu'elle était dans une région où le vent solaire, émis par les calottes polaires du Soleil, est toujours rapide. Pourquoi enregistrait-elle encore des bouffées régulières de particules énergiques ? Les astrophysiciens étudient ce mystère. Notamment, une équipe du CEA analyse les électrons, les rayons cosmiques.

D'autres types de particules solaires énergiques restent également à étudier. Quand des champs magnétiques de directions opposées se rencontrent, une situation qui se produit communément près du Soleil, les deux champs opposés s'annulent, et l'énergie magnétique est transférée aux particules chargées, à proximité. La nature de certaines particules énergiques détectées indique qu'elles provenaient de régions de la basse atmosphère solaire, où l'annihilation de champs est fréquente. Il reste à élucider comment ces particules y ont été accélérées.

Les « rayons cosmiques anormaux » sont également des particules qui sont accélérées dans l'héliosphère. Ce sont initialement des atomes neutres du gaz interstellaire (de l'hélium, de l'azote ou de l'oxygène), qui dérivent lentement dans l'héliosphère. Leur neutralité élec-

trique leur permet de traverser le champ magnétique qui barre l'accès de l'héliosphère interne à la plupart des autres particules. Cependant, au voisinage du Soleil, les atomes sont ionisés par le rayonnement solaire ou par des collisions avec des ions du vent solaire. Les ions formés sont alors immédiatement happés par le champ magnétique environnant, et ils s'éloignent du Soleil, avec les autres particules. En révélant la nature des ions happés, la sonde *Ulysse* donnera une meilleure compréhension de l'évolution des ions piégés au sein de l'héliosphère et de la nature des atomes qui peuplent l'espace interstellaire.

Avant la mission *Ulysse*, on pensait que l'accélération des ions happés, et la création de rayons cosmiques anormaux, avaient lieu dans l'onde de choc qui limite l'héliosphère, une frontière fixe où le vent solaire ralentit brusquement et se réchauffe. La sonde *Ulysse* a démontré que des ondes de choc qui se propagent à l'intérieur du choc frontal accélèrent aussi les ions happés.

Le nombre de ces ondes de choc, et de la plupart des phénomènes enregistrés par la sonde *Ulysse* pendant son premier tour polaire de l'héliosphère, varie périodiquement avec une période de onze ans, égale à celle de l'activité solaire.

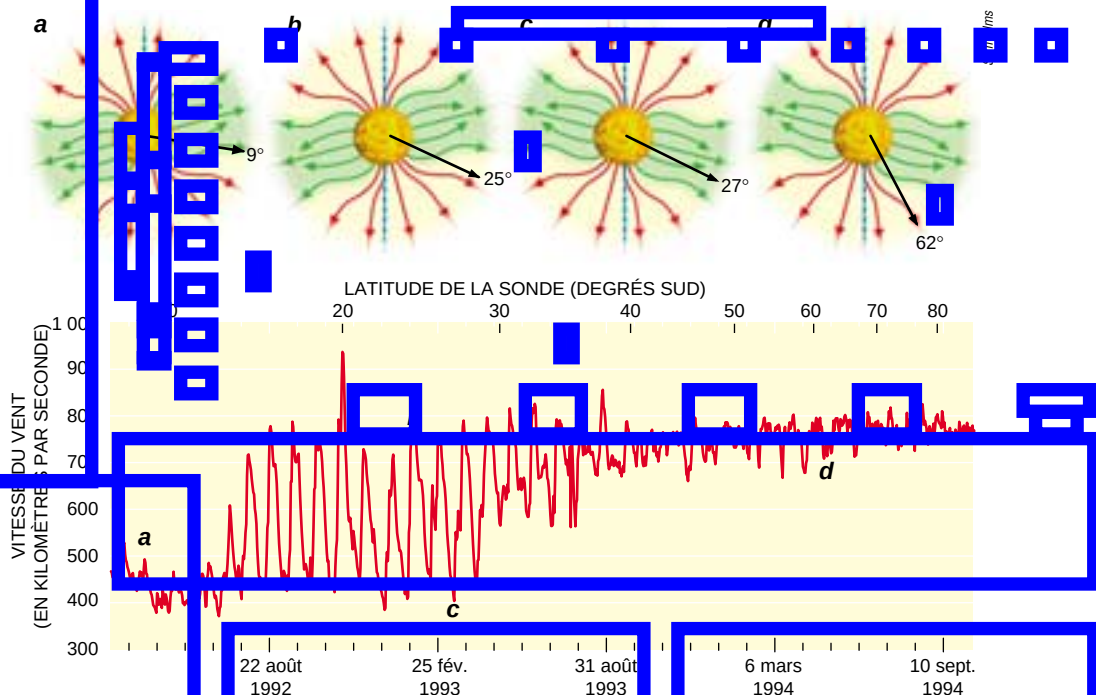
Par un heureux hasard, la sonde est passée au-dessus des deux pôles en 1994 et en 1995 quand le Soleil était calme ; les conditions aux calottes polaires du Soleil semblaient très simples. Quand la sonde repassera au-dessus des pôles, en 2000 et en 2001, l'activité du Soleil sera maximale. L'équipe d'astrophysiciens qui pilote *Ulysse* est impatiente de découvrir les modifications de l'espace péri-solaire à ce moment. La sonde fonctionne très bien ; elle envoie continuellement ses résultats de mesures vers la Terre, tout en tournant autour du Soleil. Les astrophysiciens ont déjà beaucoup appris, mais ils s'attendent encore à des masses de résultats importants.

Edward SMITH et Richard MARSDEN sont coordonnateurs scientifiques de la mission *Ulysse*.

The High Latitude Heliosphere, sous la direction de R.G. Marsden, Kluwer Academic Publishers, 1995.

R.G. MARSDEN et E.J. SMITH, *Ulysses : Solar Sojourner*, in *Sky and Telescope*, vol. 91, n° 3, pp. 24-31, mars 1996.

Ulysse est présentée sur le réseau Internet à l'adresse : <http://ulysses.jpl.nasa.gov/> and at <http://helio.estec.esa.nl/ulysses/welcome.html>, et <http://www.ifctr.mi.cnr.it/ulysses>



5. LA VITESSE DU VENT SOLAIRE a été mesurée par la sonde *Ulysse*. Elle varie selon la latitude de la sonde (flèches noires) et selon l'orientation des pôles magnétiques du Soleil. Tant que la sonde était aux basses latitudes (a), elle ne rencontra que des vents équatoriaux lents (en vert). À des latitudes australes supérieures, la sonde s'est heurtée à des vents polaires rapides (en jaune) quand le Soleil tournait son pôle magnétique Sud vers la sonde (b) et à des vents lents quand ce pôle s'écartait (c). Puis, près de l'axe des pôles, les vents étaient continuellement rapides (d).

Lise Meitner et la fission nucléaire

RUTH LEWIN SIME

En critiquant des résultats expérimentaux et en indiquant les expériences à mener, Lise Meitner, exilée en Suède, fit découvrir la fission nucléaire à Fritz Strassmann et à Otto Hahn. Pourtant, seul ce dernier reçut le prix Nobel.

Tous les historiens savent qu'à la fin de l'année 1938 la surprise de la communauté scientifique fut générale quand des physiciens et des chimistes découvrirent qu'un neutron pouvait dissocier le noyau d'un atome. Aucune théorie physique n'avait prévu la fission nucléaire, et les découvreurs n'imaginaient pas que la fission nucléaire servirait à fabriquer des bombes ou à construire des centrales nucléaires.

La grande question d'histoire des sciences est de savoir qui a découvert la fission nucléaire. Elle a été longtemps débattue. La physicienne Lise Meitner et deux chimistes, Otto Hahn et Fritz Strassmann, ont travaillé pendant quatre ans, dans leur laboratoire de Berlin, avant de découvrir le phénomène. Pour échapper à la persécution des juifs par les nazis, Lise Meitner quitta l'Allemagne en 1938. Peu après, Otto Hahn et Fritz Strassmann annonçaient leur découverte ; quelques semaines plus tard, Lise Meitner et son neveu Otto Frisch publièrent l'interprétation théorique de la fission. Pourtant, Otto Hahn fut le seul lauréat du prix Nobel de chimie de 1944, décerné en 1945.

On suppose que Fritz Strassmann n'obtint pas le prix Nobel parce qu'il était le plus jeune de l'équipe et que les comités Nobel récompensent en général des scientifiques confirmés, plus âgés. En revanche, Lise Meitner avait la même expérience professionnelle qu'Otto Hahn. Pourquoi a-t-elle été exclue ? Pendant longtemps, Otto Hahn expliqua que la découverte reposait uniquement sur des expériences de

chimie qui avaient été réalisées après le départ de Lise Meitner. Ni elle, ni aucun physicien n'avaient contribué à son succès ; peut-être même l'avaient-ils retardé, affirmait-il.

Fritz Strassmann, dans l'ombre d'Otto Hahn, n'était pas de cet avis. Selon lui, Lise Meitner avait été leur guide intellectuel, et elle l'était restée après son départ de Berlin, par la correspondance régulière qu'elle avait avec Otto Hahn. Les documents récemment analysés par les historiens des sciences accréditent la thèse de Fritz Strassmann. Les publications scientifiques, tout d'abord, montrent combien les recherches qui menèrent à la découverte de la fission étaient pluridisciplinaires. Ce sont des questions de physique nucléaire qui ont été à l'origine de ces travaux ; des données et des hypothèses relevant à la fois de la chimie et de la physique les firent progresser dans la bonne (ou parfois la mauvaise) direction. De plus, des lettres écrites révèlent que Lise Meitner apporta une contribution précieuse à la découverte.

Dans des circonstances normales, les comités Nobel auraient certainement reconnu sa contribution, mais plus rien n'était normal pendant la guerre. La politique antisémite du régime nazi chassa Lise Meitner de son laboratoire et de son pays, l'empêchant de cosigner avec Otto Hahn et Fritz Strassmann la publication de la découverte de la fission. Par crainte du pouvoir, Otto Hahn prit ses distances avec Lise Meitner et avec la physique juste après la découverte. Quelques années plus tard, les comités Nobel entérinè-

rent cette injustice : des documents récemment publiés montrent que les comités ignoraient à quel point la découverte résultait d'une coopération étroite entre chimistes et physiciens, et qu'ils n'ont pas compris qu'Otto Hahn avait écarté Lise Meitner, non pas pour des raisons scientifiques, mais par opportunisme.

Lise Meitner s'exprima peu en public sur cette affaire, mais, en privé, elle disait qu'Otto Hahn savait simplement « oublier le passé », l'époque où ils avaient été des collègues et même des amis. Sans doute pensait-elle qu'avec le temps justice lui serait rendue, mais il fallut attendre 50 ans.

Les recherches sur l'uranium

Née à Vienne, où elle fit ses études, Lise Meitner s'installa à Berlin en 1907, alors qu'elle avait 29 ans. Elle fit équipe avec Otto Hahn, un chimiste de son âge, pour étudier la radioactivité, c'est-à-dire le mécanisme par lequel un noyau se transforme en un autre par émission de particules alpha (des noyaux d'hélium) ou bêta (des électrons). En 1918, ils découvrirent le protactinium, un élément radioactif de numéro atomique égal à 91 (il se trouve juste avant l'uranium dans la Classification périodique des éléments). Leurs carrières progressèrent de la même façon, et ils restèrent égaux tant sur le plan scientifique que professionnel : ils étaient tous deux professeurs à l'Institut de chimie Kaiser Wilhelm, Otto Hahn dirigeait le département de radiochimie et Lise Meitner celui de physique.

Au cours des années 1920, Otto Hahn expérimenta les techniques de radiochimie, tandis que Lise Meitner s'intéressa à la physique nucléaire. Selon Otto Hahn, les recherches que fit Lise Meitner pendant cette période valurent une renommée internationale à l'Institut (bien plus que ses propres travaux). Sa notoriété et sa nationalité autrichienne protégèrent Lise Meitner lorsque Hitler accéda au pouvoir en 1933 : contrairement à la plupart des autres juifs, elle conserva son poste. Malgré le grand nombre de ses étudiants qui étaient de fervents nazis, elle ne partit pas d'elle-même, car elle était trop passionnée par la physique.

Les expériences d'Enrico Fermi et de ses collègues, à Rome, l'intéressaient tout particulièrement. Ces physiciens bombardaient les divers éléments chimiques avec des neutrons et ils observaient que les noyaux cibles changeaient peu : le neutron incident expulsait généralement un proton ou une particule alpha du noyau cible, rien de plus. Les noyaux lourds absorbaient parfois un des neutrons incidents ; dans le cas d'un élément radioactif, le noyau lourd se désintégrait en émettant invariablement un rayonnement bêta, se transformant en l'élément immédiatement supérieur dans la Classification périodique des éléments.

Toutefois, lorsque Enrico Fermi irradiait l'élément le plus lourd, l'uranium, avec des neutrons, il observait la formation de plusieurs nouveaux éléments émetteurs de rayonnement bêta, mais aucun n'avait les propriétés de l'uranium ou des éléments voisins. Il supposa prudemment qu'il avait synthétisé de nouveaux éléments situés au-delà de l'uranium : les «transuraniens». Les scientifiques du monde entier étaient fascinés.

Lise Meitner avait vérifié les résultats d'Enrico Fermi. Ces travaux correspondaient parfaitement à ses domaines d'intérêt et de compétence : elle fut l'une des premières femmes à faire partie de l'élite scientifique allemande et l'une des plus éminentes spécialistes de la physique nucléaire de son temps. Toutefois, pour étudier ces nou-

veaux éléments transuraniens, il lui fallait le concours d'un radiochimiste expérimenté. D'abord réticent, Otto Hahn finit par accepter de l'aider, et Fritz Strassmann, chercheur à l'Institut de chimie analytique, se joignit à eux. Les trois scientifiques avaient des points de vue politiques convergents : Lise Meitner n'était pas aryenne, Otto Hahn était antinazi et

Fritz Strassmann avait refusé de faire partie de la Société chimique allemande liée au parti national-socialiste, de sorte qu'il ne pouvait plus travailler ailleurs qu'à l'Institut.

Vers la fin de 1934, ils montrèrent que les émetteurs de rayonnement bêta observés par Enrico Fermi ne pouvaient être attribués à



© Atelier Lotte Meitner-Grat, Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

1. LISE MEITNER (vers 1930 ; elle avait alors une cinquantaine d'années) fut un des physiciens les plus éminents de son temps. Bien qu'elle ait fumé et qu'elle ait été exposée à des substances radioactives durant toute sa carrière, elle vécut jusqu'à 90 ans.

aucun de ces éléments connus et qu'ils se comportaient comme les éléments transuraniens semblaient devoir le faire : quand on les séparait chimiquement de l'uranium, on les retrouvait associés aux éléments de transition, tels le platine et le rhénium ; les transuraniens sont effectivement situés dans les mêmes colonnes de la Classification périodique que les éléments de transition, et l'on pouvait donc s'attendre à ce qu'ils aient les mêmes propriétés chimiques. Comme Enrico Fermi, les scientifiques berli-

nois admettent que ces émetteurs étaient des transuraniens.

Cette idée fausse était fondée sur une hypothèse physique et sur une hypothèse chimique, dont on démontra, plusieurs années plus tard, qu'elles étaient erronées : d'une part, les physiciens avaient alors observé que seules des modifications mineures se produisaient lors des réactions nucléaires, de sorte qu'ils n'envisageaient même pas la possibilité de la fission, c'est-à-dire de la dissociation d'un noyau en deux autres noyaux de tailles voisines ;

d'autre part, les chimistes croyaient que les éléments transuraniens étaient des éléments de transition, parce que le thorium et l'uranium réagissaient comme des éléments de transition.

Des réactions de désintégration complexes

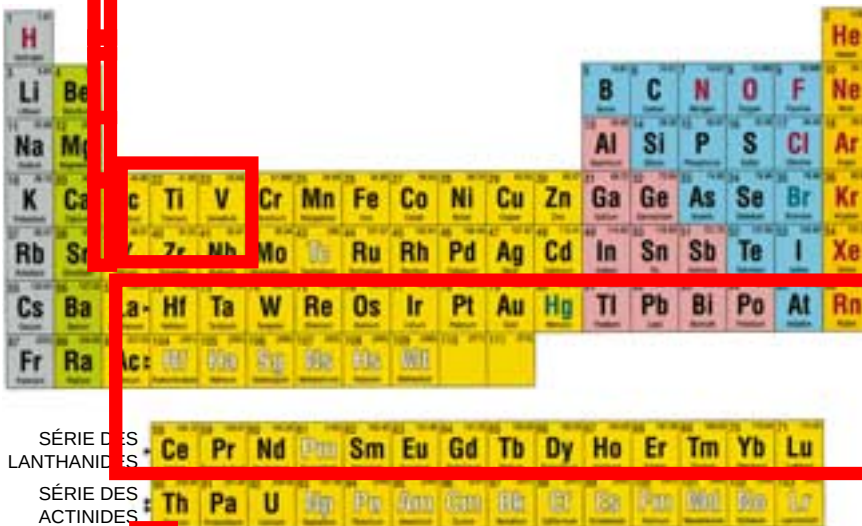
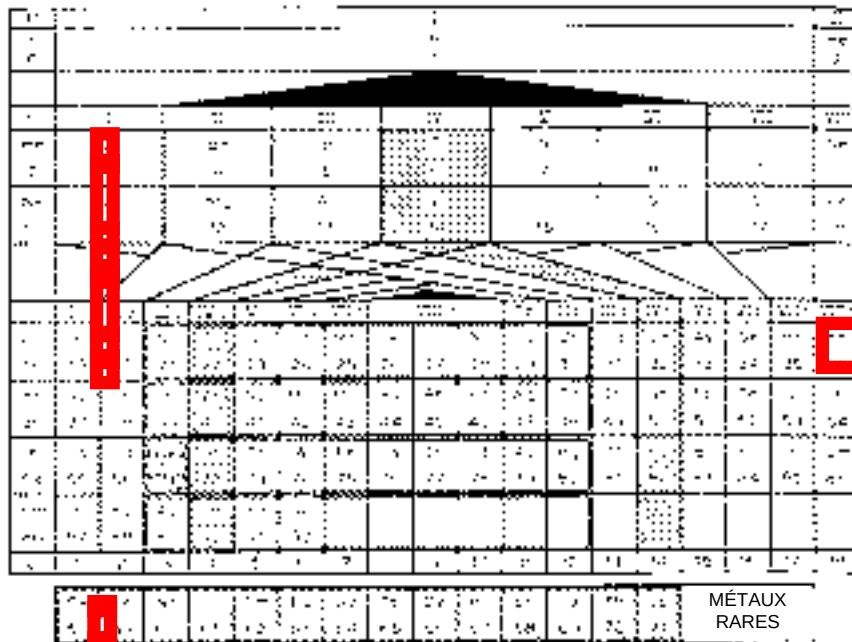
Les deux hypothèses erronées se confortaient, orientant les recherches sur une fausse piste pendant plusieurs années. Après la découverte de la fission, Otto Hahn accusa les physiciens d'avoir prétendu que les modifications du noyau étaient négligeables et d'avoir ainsi retardé la découverte de la fission. Les chimistes doutaient moins de la théorie alors en vigueur que les physiciens, qui détectaient des incohérences.

Les scientifiques berlinois tentèrent de séparer les transuraniens présumés, dont la radioactivité est très faible, de l'uranium et de ses produits de désintégration, dont la radioactivité naturelle est bien supérieure. Après avoir irradié des échantillons d'uranium avec des neutrons, ils les dissolvaient, puis séparaient de la solution les composés qui avaient les propriétés chimiques des métaux de transition (généralement en les précipitant avec des métaux de transition). Le précipité était un mélange de plusieurs émetteurs bêta que les chimistes de l'équipe berlinoise entreprirent d'identifier.

En deux ans, ils identifièrent deux réactions parallèles de désintégration bêta, qu'ils nommèrent mécanisme 1 et mécanisme 2 (voir l'encadré page 83). Les éléments envisagés dans ces réactions avaient les mêmes propriétés que les éléments transuraniens, et la concordance entre les schémas théoriques et les observations chimiques semblait si bonne que le doute était difficile. Dans les articles publiés en 1936 et en 1937, Otto Hahn et ses collègues jugeaient «indubitable» l'existence de ces éléments transuraniens et affirmaient : «Le sujet est clos.»

Toutefois, les mesures des chimistes allaient à l'encontre des théories des physiciens. Lise Meitner avait bien du mal à élaborer une théorie des mécanismes nucléaires qui soit cohérente avec les résultats obtenus par les chimistes et les radiochimistes, et avec ses propres mesures.

Quand les physiciens de Berlin bombardèrent de l'uranium avec des neutrons rapides, ils obtenaient cer-



2. LA CLASSIFICATION PÉRIODIQUE des éléments conduisit les chimistes des années 1920 et 1930 (en haut) à penser que les éléments de numéro atomique supérieur à celui de l'uranium se comportaient comme des éléments de transition : ils semblaient se trouver dans les mêmes colonnes que les éléments de transition. Après la découverte de plusieurs éléments transuraniens dans les années 1940, Glenn Seaborg découvrit que les éléments de la famille des actinides forment une seconde série de terres rares homologues des lanthanides. L'élément 109 fut nommé meitnerium en 1994. En bas, on a représenté le tableau périodique des éléments de 1995.

tains produits ; quand ils utilisaient des neutrons thermiques (très lents), ils obtenaient les mêmes produits, mais en plus grande quantité. Puisque les neutrons lents augmentaient le rendement, Lise Meitner en conclut qu'il s'agissait d'un mécanisme de capture de neutrons (après la découverte de la fission, les résultats furent réinterprétés de façon totalement différente). Lise Meitner identifia également un troisième processus de désintégration, plus court et fondé sur une capture de neutrons moyennement lents.

Elle se étonnait pourtant qu'un même isotope, l'uranium 238, capte les neutrons de trois façons différentes. Elle pressentait que les mécanismes 1 et 2 étaient incorrects, car elle comprenait mal comment la capture d'un seul neutron engendrait une instabilité telle qu'il faille quatre ou cinq émissions bêta pour stabiliser le noyau. Pis encore, pourquoi les deux longues chaînes de désintégration bêta suivaient-elles des chemins parallèles durant plusieurs étapes ? La théorie ne donnait aucune réponse. Dans une publication de 1937, Lise Meitner concluait que les résultats étaient « difficilement conciliables avec les concepts de la structure du noyau ».

Après la découverte de la fission, les physiciens et les chimistes comprirent que les mécanismes 1 et 2 étaient en fait des réactions de fission : l'uranium se scinde en fragments très radioactifs, qui se désintègrent lentement en émettant des rayonnements bêta (comme l'uranium peut se scinder de diverses façons, les voies de désintégration possibles sont nombreuses). Lise Meitner considérait le mécanisme 3 comme le plus plausible, celle qui était correct : l'isotope de l'uranium 239 formé par capture d'un neutron se désintègre par émission bêta en un élément de numéro atomique égal à 93. En 1940, cet élément fut identifié par Edwin McMillan et Philip Abelson : c'est le neptunium. Si les Berlinoises avaient détecté le neptunium, ils auraient trouvé que cet élément appartient aux terres rares et ils auraient compris que les produits des mécanismes 1 et 2 n'étaient pas des transuraniens. Malheureusement, ils ne pouvaient pas le détecter, car leurs sources de neutrons n'étaient pas assez intenses.

Leur principale erreur fut d'étudier uniquement les éléments qui se comportaient comme des métaux de transition et de négliger les autres familles. En 1938, à Paris, Irène Curie et Pavel Savitch utilisèrent une technique

différente pour analyser le mélange de sous-produits de l'uranium ; ils découvrirent un composé très radioactif, mais ne purent en établir les propriétés chimiques. Sa formation augmentait quand on bombardait les éléments à l'aide de neutrons thermiques, comme elle devait le faire pour des éléments transuraniens. Quand en octobre 1938, l'équipe de Berlin s'intéressa à la réaction étudiée par Irène Curie et Pavel Savitch, Lise Meitner avait déjà été contrainte de quitter l'Allemagne. En novembre 1938, Otto Hahn et Fritz Strassmann analysèrent seuls la substance radioactive découverte par Irène Curie et Pavel Savitch. Ils savaient d'un isotope de radium.

L'identification du baryum

Lise Meitner et Otto Hahn s'écrivaient fréquemment : le courrier entre Stockholm et Berlin était acheminé en une journée. Lise Meitner ne pensait pas que l'élément obtenu était du radium, car, pour former du radium, le nouveau d'uranium aurait dû émettre deux particules alpha. Si des décharges d'énergies mises en jeu, elle pensait que le choc d'un neutron thermique ne pouvait pas produire une telle réaction. En novembre 1938, elle se rendit à Washington, D.C., où elle eut une entrevue avec Otto

La découverte de la fission

L'équipe de Berlin découvrit qu'un grand nombre d'émetteurs bêta (des noyaux radioactifs qui émettent des électrons) se forment lorsque des neutrons entrent en collision avec des noyaux d'uranium. Les chimistes proposèrent deux cascades de réactions de désintégration entre des éléments qu'ils croyaient plus lourds que l'uranium.

Mécanisme 1



Mécanisme 2

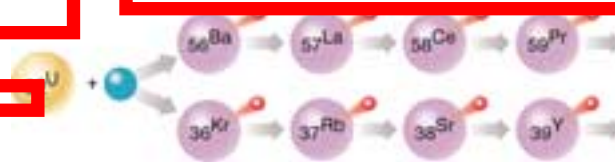


Ils identifièrent aussi une autre réaction plus simple :

Mécanisme 3



Lise Meitner considérait que le mécanisme 3 était le plus vraisemblable, et l'on démontra ultérieurement qu'elle avait raison. La longueur des mécanismes 1 et 2, ainsi que leur parallélisme la gênaient. Finalement, lorsque Otto Hahn et Fritz Strassmann identifièrent qu'un des produits de la réaction était du baryum, Lise Meitner et Otto Frisch comprirent que le noyau d'uranium s'était scindé en un noyau de baryum et un noyau de krypton, déclenchant une série d'émissions bêta :



C'est ce mécanisme qui était correct. Lise Meitner et Otto Frisch proposèrent le terme de fission nucléaire pour ce phénomène, en publièrent la première explication théorique et donnèrent une estimation de l'énorme quantité d'énergie que libère la fission.

Jared Schneidmann Design

Pourquoi Lise Meitner n'a pas eu le prix Nobel

Considéré comme la récompense suprême pour un scientifique, le prix Nobel confère aux personnes qui le reçoivent un prestige sans égal, une renommée nationale et internationale. Les autorités leur accordent les crédits qu'elles réclament pour leurs recherches ; on les consulte à tout propos, sur des questions scientifiques, sociales ou politiques.

Quand il décerne un prix, le Comité Nobel se fait le porte-parole de la communauté scientifique internationale. Dans la plupart des cas, ses décisions ne sont pas contestées. Rarement, des protestations s'élèvent : c'est le cas lorsque les scientifiques estiment que la récompense n'est pas méritée ou n'a pas été attribuée à la personne la plus qualifiée. Le prix Nobel qui a honoré Otto Hahn pour sa découverte de la fission fait partie de ces prix contestés pour la seconde raison : alors qu'elle a pris une part active à la découverte de la fission, Lise Meitner n'a pas été récompensée en même temps qu'Otto Hahn. Aujourd'hui, les archives des comités Nobel sont ouvertes aux historiens qui ont cherché à comprendre cette décision.

Les résultats d'Otto Hahn et de Fritz Strassmann furent publiés dans la revue allemande *Naturwissenschaften*, au début de l'année 1939, alors que Lise Meitner s'était déjà réfugiée en Suède. Comme ils ne pouvaient pas publier leur interprétation théorique des expériences de l'équipe de Berlin dans une revue allemande, Lise Meitner et Otto Frisch firent paraître leur article dans la revue anglaise *Nature*. La publication séparée de ces deux articles com-

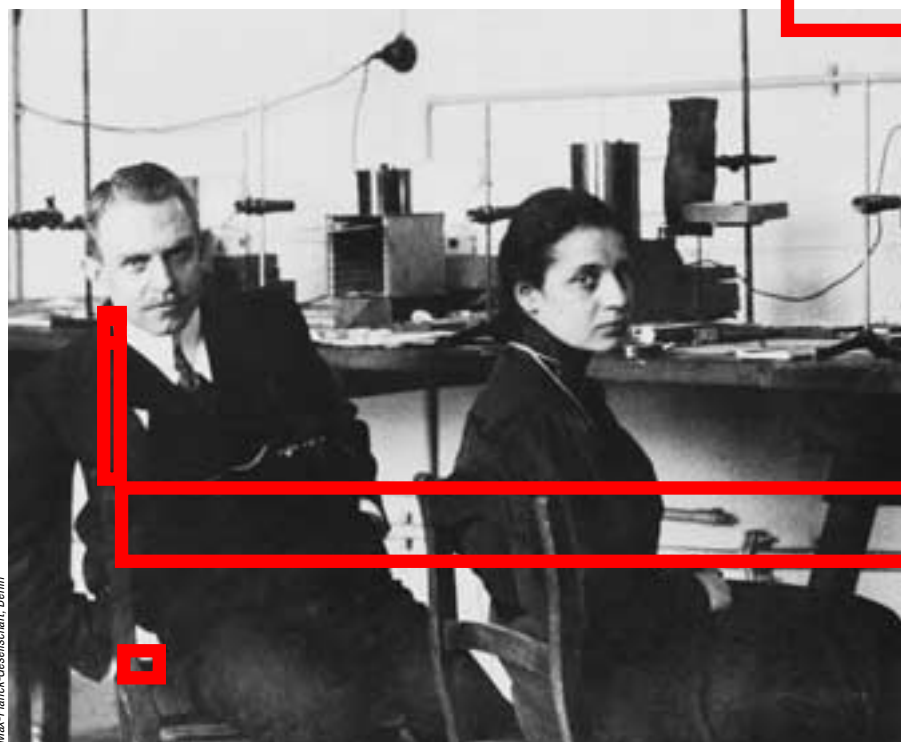
mença à creuser un fossé entre chimie et physique, expérimentation et théorie, Allemands et émigrés. En Suède, Lise Meitner trouva refuge à l'Institut Nobel de physique expérimentale. Manne Siegbahn, directeur de cet institut, présidait aussi le Comité Nobel de physique. Or, s'il procura à Lise Meitner un bureau à l'institut et un salaire, il l'isola de la communauté scientifique et la tint écartée du cercle des physiciens.

Les prix Nobel de sciences physiques sont décernés par l'Académie royale des sciences de Suède après trois étapes où interviennent des comités Nobel de physique et de chimie, des représentants de l'Académie, et enfin tous les académiciens réunis au grand complet. Les comités, composés de cinq membres, tous suédois, évaluent un petit groupe de candidats. L'Académie prend sa décision après avoir étudié un résumé de chaque dossier de candidature.

Les recherches sur la radioactivité ont toujours été soumises au Comité de chimie, lequel connaissait Otto Hahn et Lise Meitner, dont les dossiers avaient déjà été évalués à plusieurs reprises pour leurs travaux en radiochimie. Au début de l'année 1939, le Comité Nobel de chimie reconnut implicitement l'importance de la découverte de la fission quand le biochimiste Theodor Svedberg, son président, proposa qu'Otto Hahn, seul ou avec Lise Meitner, reçoive le prix. Selon lui, même si Lise Meitner n'avait pas participé directement à la découverte, elle pourrait être récompensée en raison de sa contribution antérieure au travail de l'équipe. Il mentionna également l'article publié dans *Nature*, mais, apparemment, il

ne l'avait pas compris ou ne l'avait pas lu attentivement. Ainsi, il nota que le modèle de la goutte liquide de Bohr avait été utilisé pour expliquer la fission, mais il ne mentionna pas que Lise Meitner et Otto Hahn furent les premiers à appliquer ce modèle à la fission. Cette interprétation erronée du rôle de Bohr revint régulièrement dans les rapports ultérieurs sur la fission.

Pendant la guerre, les conditions d'attribution des prix Nobel ont été perturbées. Ajourné en 1940, annulé en 1941 et 1942, reporté en 1943, le prix fut à nouveau attribué à partir de 1944. La suspension de l'attribution n'empêcha pas les comités de continuer à évaluer des candidats. En 1940 et 1941, les anciens prix Nobel Arthur Compton et James Franck proposèrent Otto Hahn et Lise Meitner pour le prix Nobel de physique. En 1941, le Comité de physique déclara que le travail d'Otto Hahn et de Lise Meitner était du ressort de la chimie.



Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

1. OTTO HAHN ET LISE MEITNER, photographiés ici dans leur laboratoire à l'Université de Berlin, vers 1910, travaillèrent ensemble et furent amis de 1907 jusqu'en 1938, quand Lise Meitner dut fuir en Suède pour échapper aux nazis.

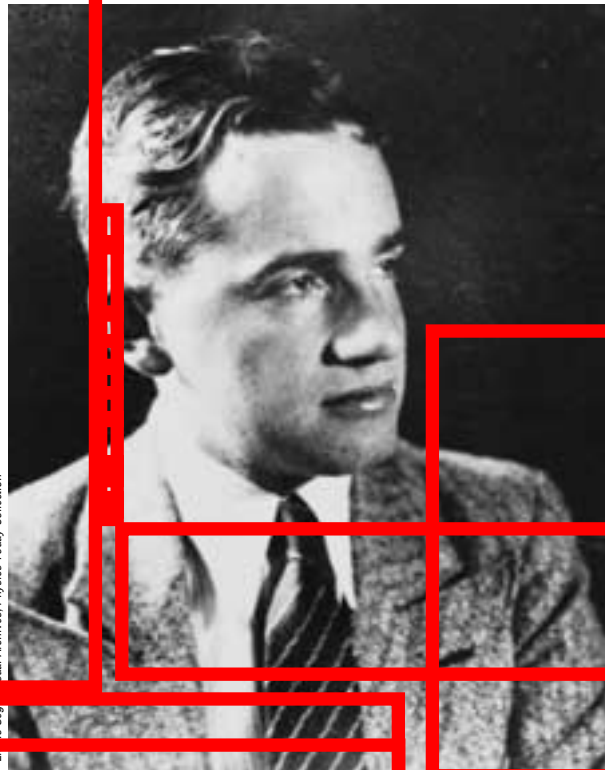
Simultanément, le Comité de chimie était arrivé à la conclusion que seul Otto Hahn méritait le prix pour «sa» découverte. Durant toutes les années où le prix a été reporté, la candidature d'Otto Hahn fut maintenue.

Jusqu'à ce que l'Institut Kaiser Wilhelm soit bombardé, au début de l'année 1944, Otto Hahn et Fritz Strassmann continuèrent à identifier des fragments de fission. La publication de leurs résultats dans des revues allemandes renforça l'idée que la découverte avait ouvert un vaste champ de recherche, raison supplémentaire pour le Comité Nobel de récompenser Otto Hahn. Toutefois, en 1937, Hitler avait interdit à ses concitoyens d'accepter un prix Nobel. Comme avait décliné le prix Nobel de la paix, en 1935, au dissident pacifiste allemand Carl von Ossietzky. En 1944, le Comité Nobel de chimie proposa Otto Hahn pour le prix, mais l'Académie décida de reporter la décision à l'année suivante.

En 1945, après la défaite de l'Allemagne, les Alliés ont arrêté et emprisonné, à Farm Hall, en Angleterre, Otto Hahn et neuf scientifiques liés à des degrés divers au projet allemand de bombe atomique. C'est alors, le 6 août, au moment même où le Comité Nobel devait rendre sa décision pour les prix de 1944 et 1945, qu'une bombe atomique fut lâchée sur Hiroshima. Après l'explosion de la bombe, les membres du comité jugèrent nécessaire de réévaluer la découverte et d'étudier les contributions des Alliés au projet Manhattan. Deux camps s'opposaient : ceux qui voulaient attribuer le prix 1944 à Otto Hahn et ceux qui voulaient reporter la décision. Le vote de l'Académie trancha en faveur de la première proposition.

Restait la possibilité que Lise Meitner et Otto Frisch soient récompensés par le prix Nobel de physique. En 1945, Oskar Klein, professeur de physique théorique de l'Université de Stockholm, avait proposé ces deux candidats. Bien que le rapport d'Erik Hulthén ait été négatif, la décision fut reportée. L'année suivante, les deux candidats furent à nouveau proposés par Oskar Klein, par Niels Bohr et par Egil Hylleraas, professeur de physique à l'Université d'Oslo : ils soutenaient que Lise Meitner et Otto Frisch avaient fourni l'explication théorique des résultats expérimentaux d'Otto Hahn et Fritz Strassmann.

En 1946, l'évaluation des deux candidats fut à nouveau confiée à Erik Hulthén. Malheureusement, son rapport ne fut ni rigoureux, ni exhaustif. Il ne mentionna ni le rapport officiel du gouvernement américain sur le



2. OTTO FRISCH ET LISE MEITNER furent les premiers à expliquer, en 1939, le mécanisme de la fission nucléaire. En 1940, Otto Frisch et son collègue émigré Rudolf Peierls comprirent l'intérêt de la fission nucléaire pour la fabrication d'armes et contribuèrent au lancement du projet de bombe atomique des Alliés.

Projet Manhattan, ni celui du gouvernement britannique sur les projets de bombe atomique, ni l'article publié dans *La Revue de physique moderne* rédigée en 1940 par Louis Turner : ces rapports soulignaient pourtant tous la contribution théorique de Lise Meitner et d'Otto Frisch. Le rapporteur entretint aussi l'idée que Bohr avait élaboré la théorie de la fission : Niels Bohr s'était peut-être inspiré de l'article de Lise Meitner et d'Otto Frisch pour élaborer sa théorie, mais c'est lui qui devait être recommandé pour le prix Nobel de physique.

Divers facteurs personnels et sociaux se sont conjugués pour écarter Lise Meitner du prix Nobel. L'un des facteurs serait qu'elle n'avait pas de bonnes relations avec Manne Siegbahn, le président du Comité de physique. Elle n'avait pas été très bien accueillie dans son institut et se préparait à partir. De surcroît, la communauté scientifique pensait, bien plus

qu'aujourd'hui, que les femmes scientifiques sont soit des subordonnées, soit des incompetentes.

Enfin, les rivalités et la compétition pour obtenir des fonds faisant rage dans la petite communauté des physiciens suédois. En 1945-1946, le gouvernement suédois cherchait à maîtriser l'énergie nucléaire à des fins tant civiles que militaires. Manne Siegbahn et Erik Hulthén, tous deux membres des «comités suédois pour l'énergie nucléaire», étaient chargés d'allouer les fonds de recherche à des instituts... qu'ils dirigeaient. Oskar Klein, un des fervents avocats de Lise Meitner et d'Otto Frisch espérait recruter les deux physiciens pour un nouvel institut de recherche en physique nucléaire qui était en cours de construction à l'Université de Stockholm. Ce nouvel institut représentait un concurrent sérieux pour Manne Siegbahn en termes de ressources et de prestige.

Avec le temps, le début de l'histoire de la fission devint une sorte de conte de fées, celui d'une découverte faite par un chimiste, dans un domaine où l'Allemagne a traditionnellement été pionnière, par un Allemand qui n'avait pas été nazi, par un scientifique «pur» qui avait découvert la fission nucléaire, mais n'avait jamais travaillé sur la bombe. Dans cette glorification de l'Allemagne et de lui-même, Otto Hahn ne fit aucune place à Lise Meitner.

Elisabeth CRAWFORD
CNRS - Institut d'histoire des sciences
Université Louis Pasteur, Strasbourg

Hahn le 11 novembre. Cette rencontre fut tenue secrète pour qu'Otto Hahn ne soit pas accusé de collaborer avec les juifs émigrés. Plus tard, Otto Hahn ne la mentionna jamais, mais elle était consignée dans son agenda personnel. Au cours de la discussion, Lise Meitner refusa d'admettre que l'on obtenait du radium. C'est le message qu'Otto Hahn rapporta à Fritz Strassmann, resté à Berlin.

Selon Fritz Strassmann, Otto Hahn lui aurait dit que Lise Meitner avait insisté pour qu'ils vérifient la nature de l'élément qu'ils prenaient pour du radium : « Nous accordions tant d'importance à son opinion que nous avons immédiatement procédé à des expériences de contrôle. » Ils voulaient vérifier la présence de radium en le combinant avec du baryum stable et en séparant le complexe ainsi obtenu du mélange réactionnel. Ayant échoué, ils durent conclure que ce qu'ils avaient pris pour du radium n'était qu'un isotope radioactif inconnu du baryum, un élément bien plus léger que l'uranium et non un transurannique.

En décembre 1938, juste avant Noël, Otto Hahn annonça à Lise Meitner que l'élément isolé était du baryum. Le

résultat était gênant, car « l'uranium ne peut évidemment pas se dissocier en libérant du baryum ! » ; trouverait-elle quelque « explication miracle » à ce « résultat épouvantable » ? Par retour du

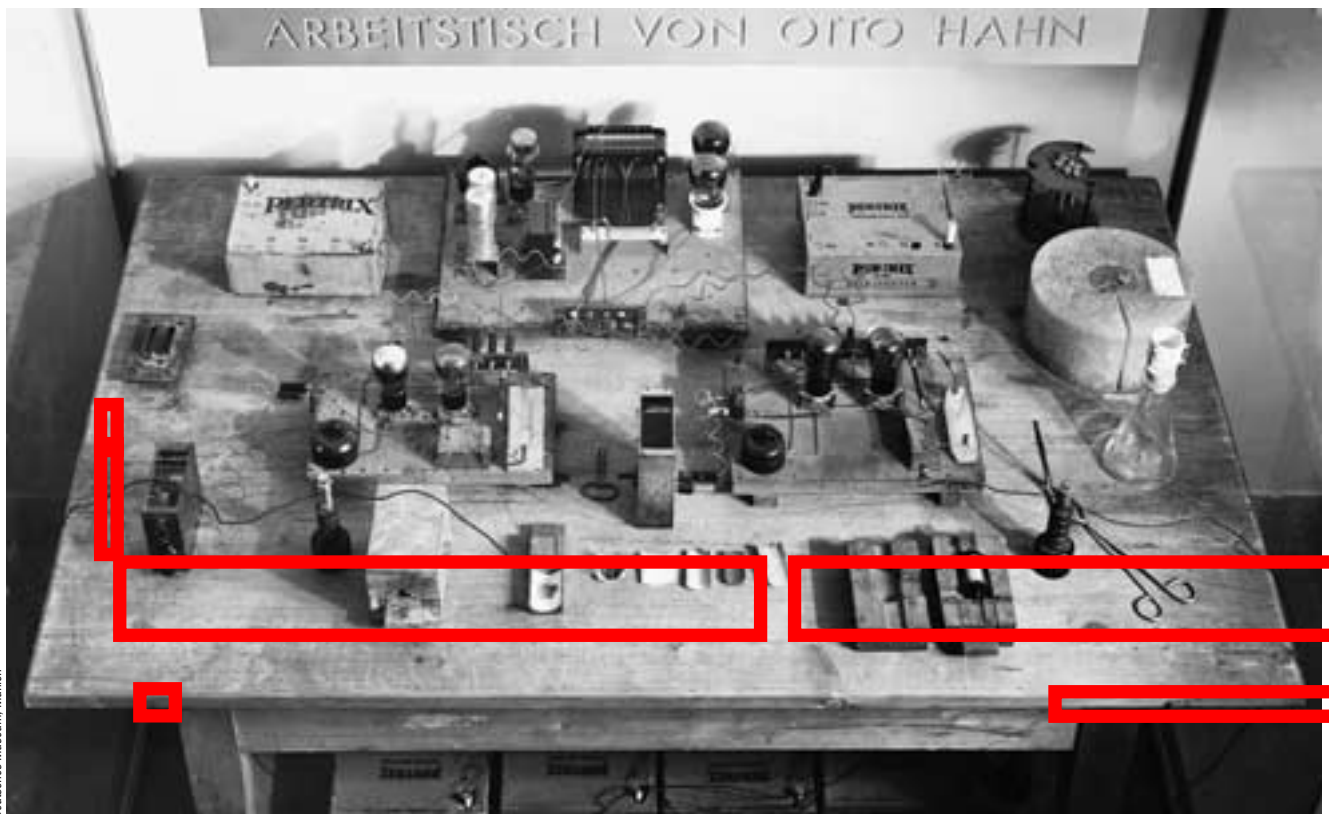


Ingard Strassmann

3. FRITZ STRASSMANN participe avec Lise Meitner et Otto Hahn à la découverte de la fission nucléaire. Ses connaissances en chimie analytique furent décisives lors de l'identification du baryum. Pendant la guerre, il eut une position antinazie courageuse.

courrier, Lise Meitner répondit qu'elle envisageait difficilement que le noyau se soit brisé, mais qu'on ne devait pas affirmer catégoriquement qu'un tel événement est impossible. Otto Hahn considérait sans doute cette lettre comme son plus beau cadeau de Noël : Lise Meitner avait refusé que l'élément trouvé soit du radium, mais elle acceptait l'hypothèse du baryum et considérait que ce résultat n'était pas en contradiction avec la théorie.

Plus tard, Otto Hahn prétendit que, si Lise Meitner avait encore été à Berlin, elle l'aurait détourné de l'hypothèse du baryum et l'aurait empêché de découvrir la fission. Pourtant, la lettre de Lise Meitner, qu'Otto Hahn avait toujours en sa possession, montre le contraire. Cette lettre le réconforta à ce point qu'après l'avoir reçue et seulement après, il ajouta un paragraphe à l'article où il publiait l'identification du baryum : il émettait l'hypothèse que le noyau d'uranium s'était scindé en deux. Lise Meitner était profondément déçue de ne pas partager avec eux cette « belle découverte », mais tous savaient qu'ils ne pouvaient associer une « non-aryenne » à la publication.



Deutsches Museum, Munich

4. CES APPAREILS DE PHYSIQUE furent utilisés par l'équipe de Berlin de 1934 à 1938 pour les travaux qui aboutirent à la découverte de la fission nucléaire. À partir de 1950 et pendant une trentaine

d'années, ils ont été exposés dans un musée sous l'étiquette « Plan de travail d'Otto Hahn » ; les panneaux explicatifs mentionnaient rapidement Fritz Strassmann, mais pas du tout Lise Meitner.

La révision de la théorie nucléaire

À Noël, Lise Meitner rendit visite à un ami dans l'Ouest de la Suède ; son neveu Otto Frisch, physicien à l'Institut Niels Bohr, les rejoignit. Tous deux considéraient le noyau comme une goutte, mais ils comprirent alors que la goutte était animée de vibrations et prête à se scinder en deux. Otto Frisch comprit que la tension superficielle d'un noyau aussi gros que celui de l'uranium était très faible. Lise Meitner calcula de tête le défaut de masse et en déduisit une estimation de l'énorme énergie libérée lors de la fragmentation du noyau. Tous les éléments d'une nouvelle théorie se mettaient en place. La communauté des physiciens adopta le terme de « fission » que proposaient Lise Meitner et Otto Frisch, et Niels Bohr utilisa leurs travaux comme point de départ pour généraliser la théorie que les deux découvriers avaient ébauchée.

La découverte du baryum par Otto Hahn et Fritz Strassmann fut publiée en janvier 1939 ; Lise Meitner et Otto Frisch publièrent leur interprétation quelques semaines plus tard. Contrairement à ce qui s'était réellement passé, la découverte de la fission n'apparut pas comme le fruit d'une coopération entre physiciens et chimistes, et l'on pouvait désormais croire que la fission avait été découverte par des chimistes, les physiciens s'étant contentés d'interpréter le phénomène.

Au cours des semaines qui suivirent la découverte, Otto Hahn profita de la situation. Il savait que Lise Meitner avait dû émigrer et qu'elle avait pleinement participé à la découverte, mais il ne pouvait pas le dire, car il craignait pour sa personne et pour sa carrière : il avait peur que l'on ne découvre que Fritz Strassmann et lui avaient continué à travailler avec Lise Meitner après son départ de Berlin. Il décida que la découverte de la fission résultait des seules expériences chimiques qu'il avait réalisées avec Fritz Strassmann en décembre 1938. En février 1939, il écrivit à Lise Meitner : « Nous n'avons pas fait de physique et nous nous sommes contentés de faire des séparations chimiques jusqu'à isoler le baryum. » Il qualifia la fission de « don du ciel » qui les protégeait, lui et son institut.

Toutefois Otto Hahn n'aurait pas eu besoin de renier Lise Meitner et la



5. DANS LES ANNÉES 1920, Lise Meitner, professeur et chef du département de physique de l'Institut de chimie Kaiser Wilhelm, devint une spécialiste renommée de physique nucléaire. Cette photographie, prise en 1920 au cours d'une visite de Niels Bohr à Berlin, rassemble plusieurs de ses plus proches collègues et amis ; près de la moitié ont reçu un prix Nobel. Au premier rang, de gauche à droite : Otto Stern (prix Nobel en 1943), James Franck (1925), Niels Bohr (1922) ; le deuxième en partant de la droite est Gustav Hertz (1925). À la droite de Lise Meitner et derrière elle, Otto Hahn (1944) et George Hevesy (1943).

physique pour que le « miracle » se produise. Au printemps 1939, les militaires allemands s'intéressèrent de près aux applications potentielles de la nouvelle découverte et, dès l'été 1939, Otto Hahn et son institut étaient protégés.

L'arrivée au point de la bombe atomique confirma l'importance de la fission, et Otto Hahn devint célèbre. Dans l'Allemagne de l'après-guerre, il fut une personnalité renommée, couronné par un prix Nobel, considéré comme un Allemand qui n'avait pas cédé aux nazis, qui n'avait pas construit la bombe. Pourtant, il fut injuste avec Lise Meitner : pas une seule fois dans ses nombreuses publications ni dans ses interviews, ni dans ses mémoires, ni dans ses autobiographies, il ne mentionna la place prépondérante de Lise Meitner dans l'équipe de Berlin ni leur collaboration après son exil. Il mourut à Göttingen en 1968, à 89 ans.

En Suède, durant la guerre, Lise Meitner occupa une fonction très importante. D'après ses amis, elle aurait eu le prix Nobel si elle avait émigré dans un autre pays. En 1943, elle fut invitée à Los Alamos pour travailler sur la bombe atomique, mais elle refusa. Après la guerre, elle fut brièvement célébrée aux États-Unis et en

Angleterre, où elle symbolisait – à tort – une réfugiée juive ayant échappé aux nazis. L'important le secret de la bombe atomique. Elle était réservée et détestait la publicité. Elle ne rédigea aucune autobiographie et n'autorisa personne à écrire une biographie. En 1960, elle quitta Stockholm pour Cambridge en Angleterre, où elle mourut en 1968, quelques jours avant son 90^e anniversaire. Elle disparut près de 30 ans avant que ses travaux ne soient enfin reconnus.

Ruth LEWIN SIME est professeur de chimie à l'Université de Sacramento.

Lise MEITNER, *Looking Back*, in *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 20, pp. 1-5, novembre 1964.

Otto F. FRISCH, *What Little I Remember*, Cambridge University Press, 1979.

Fritz STRASSMANN, *Im Schatten des Science. Leben und Wirken von Fritz Strassmann*, Verlag Chemie, Weinheim, 1981.

Ruth LEWIN SIME, *Lise Meitner : A Life in Physics*, University of California Press, 1996.

Elisabeth CRAWFORD, Ruth LEWIN SIME et Mark WALKER, *A Nobel Tale of Postwar Injustice*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 9, pp. 26-32, septembre 1997.

L'acoustique picoseconde

HUMPHREY MARIS

À l'aide d'ultrasons de très haute fréquence, on teste les connexions des circuits intégrés.

Depuis quelques décennies, les ingénieurs apprennent à construire des objets miniatures. Les circuits intégrés, par exemple, sont fabriqués à partir de minces couches de silicium que l'on enrichit d'impuretés judicieusement placées, afin de provoquer l'effet transistor ; au-dessus du semiconducteur ainsi dopé, une succession de couches métalliques et de couches isolantes assurent les connexions des transistors. Certaines de ces couches ont une épaisseur de seulement dix milliardièmes de mètre. La qualité et l'efficacité de ces circuits et les performances des systèmes où ces circuits sont incorporés, dépendent de l'épaisseur et de la régularité des diverses couches.

L'épaisseur des couches est généralement comprise entre cinq nanomètres (ou milliardièmes de mètre) et quelques micromètres. Pour les couches les plus minces, l'épaisseur doit être connue à moins d'un dixième de nanomètre, c'est-à-dire moins que la taille d'un atome. Les mesures d'épaisseur, excessivement difficiles, se font par des techniques qui détruisent les échantillons : on les coupe perpendiculairement à la surface des couches, et on observe par la tranche.

Pour obtenir des épaisseurs précises, la plupart des fabricants contrôlent en permanence les conditions de fabrication comme la température, l'hygrométrie et la pression, sacrifiant périodiquement des composants afin de les analyser en cours de fabrication.

En 1985, afin d'étudier le comportement des électrons dans des matériaux semiconducteurs, nous avons envoyé une brève impulsion lumineuse sur un film métallique déposé à la surface d'un échantillon ; puis, quand nous avons envoyé une seconde impulsion lumineuse, nous avons constaté que la surface réfléchissait la lumière de façon périodique, au cours du temps ; nous avons ainsi découvert que la surface vibrait et qu'elle était parcourue par des

ondes de pression de longueur d'onde égale à 0,1 nanomètres environ. Personne n'avait envisagé que des ondes sonores de fréquence aussi élevée et de durée aussi brève puissent être émises.

Une technique naturelle

Après cette découverte, nous avons mis au point une technique qui utilise ces émissions extraordinairement brèves pour étudier les structures microscopiques, tels les films métalliques des composants électroniques.

Notre technique reprend le principe de l'écholocation des chauve-souris. En 1911, l'ingénieur Hiram Maxim, connu pour ses avions et son invention de la mitrailleuse, proposa que les chauve-souris détectent les insectes volant à l'aide d'ondes de pression inaudibles pour l'oreille humaine ; il supposait que ces ondes étaient des ondes de basses fréquences, produites par les battements de leurs ailes. Toutefois, ces ondes, avec leur grande longueur d'onde, sont diffractées par les petits objets, et non réfléchies : la théorie de Maxim expliquait mal comment les chauve-souris captent les très faibles échos réfléchis par leurs proies.

En 1920, à l'Université de Cambridge, Hamilton Hartridge proposa alors que ces ondes émises soient des ultrasons, c'est-à-dire à des ondes de pression à des fréquences supérieures à celles des sons les plus aigus perceptibles par l'oreille humaine. Puis, en 1931, à Harvard, George Pierce et Donald Griffin détectèrent ces émissions. Depuis ces études, les zoologistes ont enregistré les ondes inaudibles émises par de nombreux animaux, tels les dauphins et certains oiseaux. Même des insectes utilisent ce principe : les gerris, les tourniquets et les autres gyryns qui glissent à la surface des eaux douces utilisent la réflexion des ondes produites lors de leur déplacement sur l'eau pour localiser les objets.

Le sonar des chauve-souris est remarquablement perfectionné. Les déplacements de l'animal décalent la fréquence de l'écho reçu par rapport à celle du signal émis en raison de l'effet Doppler, le même effet qui change la hauteur du son d'une ambulance quand elle s'éloigne d'un observateur, après s'en être approché rapidement : la chauve-souris utilise ce décalage pour déterminer la direction et la vitesse de ses proies (le même effet permet aux policiers de détecter les excès de vitesse des automobilistes). En outre, l'intérieur de chacune des séquences émises, la chauve-souris varie la fréquence du son. Cette modulation aide l'animal à analyser le signal reçu et à identifier sa proie, en déterminant sa forme, sa taille, la fréquence de battement de ses ailes.

Pour déterminer sa distance à un insecte, la chauve-souris doit achever l'émission du signal ultrasonore avant que l'écho ne revienne. Comme la vitesse du son dans l'air est égale à 330 mètres par seconde, les ultrasons ne mettent qu'un cinquantième de seconde pour atteindre un insecte situé à une distance de 3,30 mètres et revenir. Lorsqu'un insecte est ainsi détecté, la chauve-souris émet des séquences d'ultrasons de plus en plus courtes (jusque moins d'une milliseconde), afin de localiser l'insecte à mieux qu'un mètre près.

Les mesures d'épaisseur des très petites structures métalliques sont encore plus difficiles, car la vitesse du son dans l'aluminium atteint 6 000 mètres par seconde : l'aller et retour d'une onde sonore à travers une couche métallique d'un cent millionième de mètre dure seulement trois billionièmes de seconde. Pour effectuer des mesures sonar sur de tels objets, nous avons dû trouver un moyen de créer des impulsions ultrasonores qui durent moins d'un billionième de seconde.

Pour transmettre des sons dans les liquides ou dans les solides, les phy-

siciens utilisent généralement des transducteurs piézo-électriques, composés de cristaux tel le quartz, dont le volume change quand on leur applique une tension électrique. L'application d'un courant électrique alternatif fait vibrer ces cristaux à la fréquence du courant. Ainsi, depuis les années 1920, les physiciens produisent des sons de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 1 000 mégahertz, pendant des durées qui peuvent être inférieures à un milliardième de seconde. À l'aide de telles ondes, on teste des matériaux de quelques millimètres d'épaisseur seulement : les performances sont bien insuffisantes pour l'analyse des circuits intégrés.

Toutefois des progrès effectués par les spécialistes des lasers nous ont donné les moyens de mettre en œuvre notre idée. Les lasers se sont considérablement perfectionnés, depuis le premier, qui fut construit en 1960 par Theodore Maiman, des Laboratoires de recherche Hughes : ce système com-

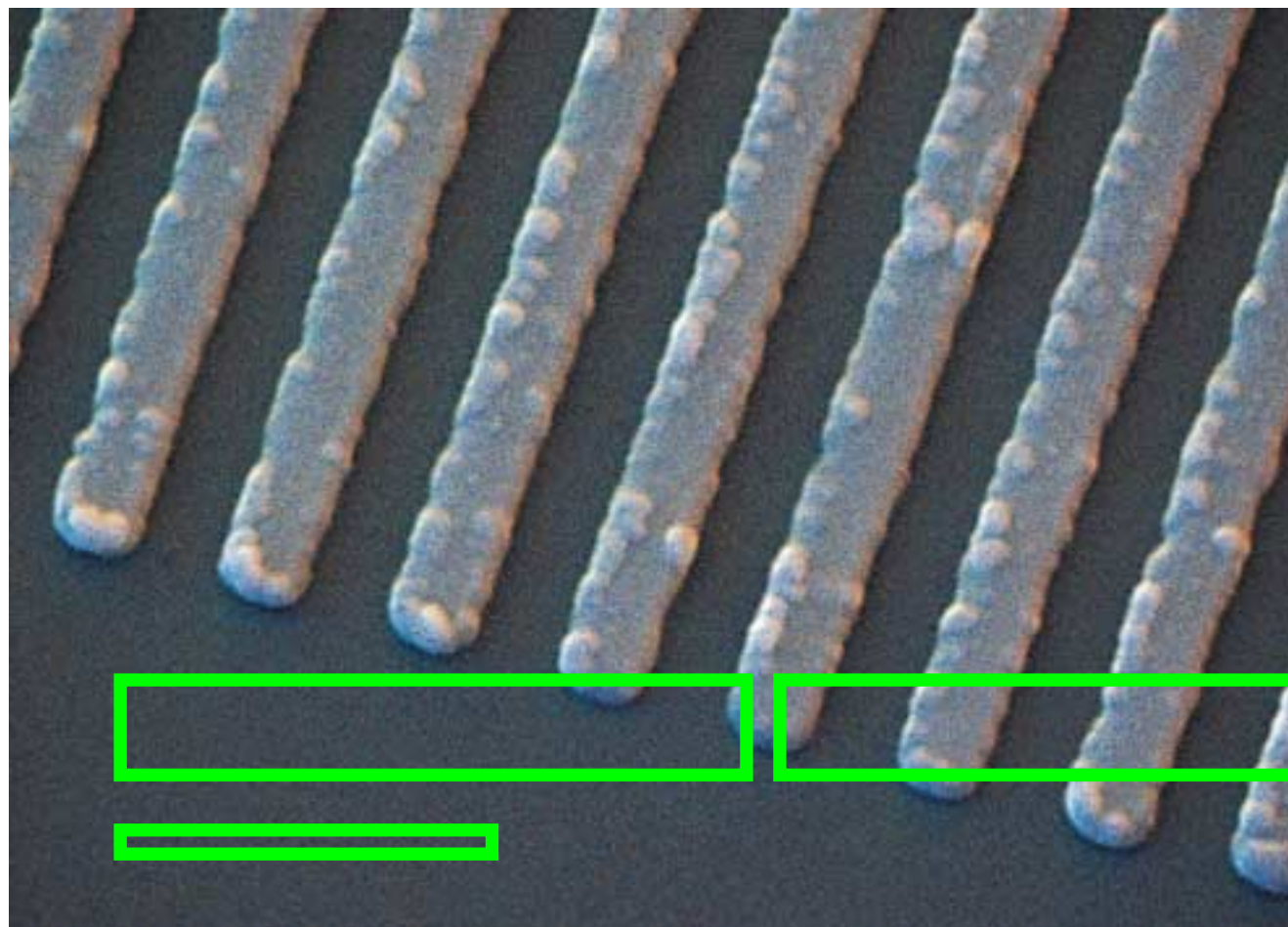
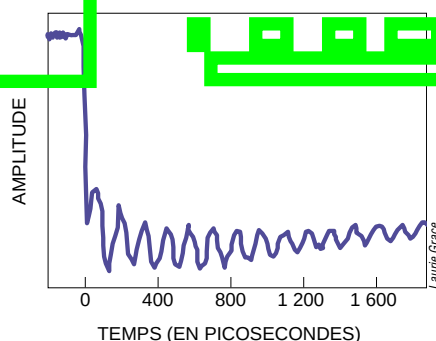
portait des flashes qui excitaient des atomes de chrome d'un cylindre de rubis ; la désexcitation de ces atomes amplifiait la lumière qui traversait le rubis. Le laser émettait de la lumière rouge sous la forme d'impulsions qui duraient moins d'un milliardième de seconde. Le laser à rubis de Maiman fut suivi de lasers à gaz, de lasers à colorants et de lasers à état solide (il existe même un laser où le matériau actif est la gélatine, mangeable après utilisation). Depuis le début des années

1980, certains lasers émettent des impulsions lumineuses qui durent moins d'un cent milliardième de milliardième de seconde (10^{-14}) : le train d'ondes lumineuses ne comprend que cinq longueurs d'onde et s'étend sur trois micromètres.

Dans notre laboratoire, nous utilisons la lumière d'un laser à impulsions pour former des ondes de pression : nous focalisons le faisceau du laser sur une couche très mince, à la surface d'un matériau qui absorbe les photons (ou « grains de lumière »). L'énergie des photons est transmise aux électrons, qui se déplacent sur de courtes distances dans le matériau en dissipant de l'énergie.

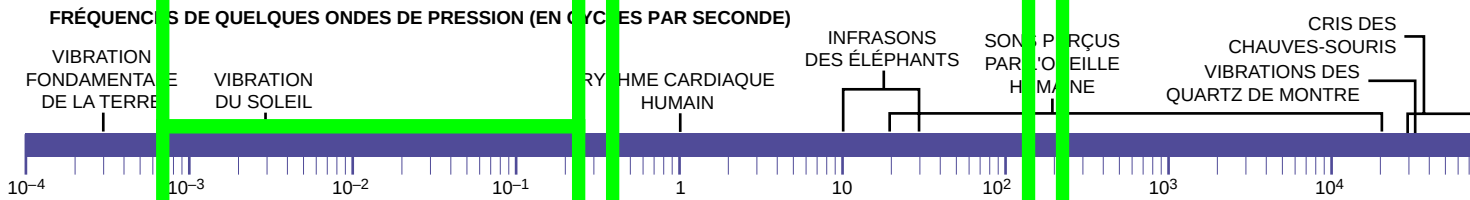
La température de la surface du matériau augmente alors brusquement de quelques degrés, provoquant une dilatation : une onde de compression, parfois une seule compression, se propage alors dans le matériau.

Les impulsions ultrasonores ainsi produites durent parfois une picoseconde seulement (10^{-12} seconde) et



1. CE NANOXYLOPHONE produit des sons à des fréquences de 8 gigahertz, soit 24 octaves au-dessus du *do* central du piano. Il est composé de petites lamelles d'or de moins de 150 atomes d'épaisseur. La courbe supérieure montre la variation de l'amplitude du son

émis. Les ingénieurs de l'industrie micro-électronique utilisent des ondes de fréquences encore supérieures, durant quelques picosecondes (ou milliardièmes de milliardième de seconde), pour tester la qualité des circuits intégrés.



s'étendent sur quelques nanomètres. Leur amplitude, c'est-à-dire la distance sur laquelle elles déplacent les atomes, est à peine dix fois le diamètre d'un noyau d'atome.

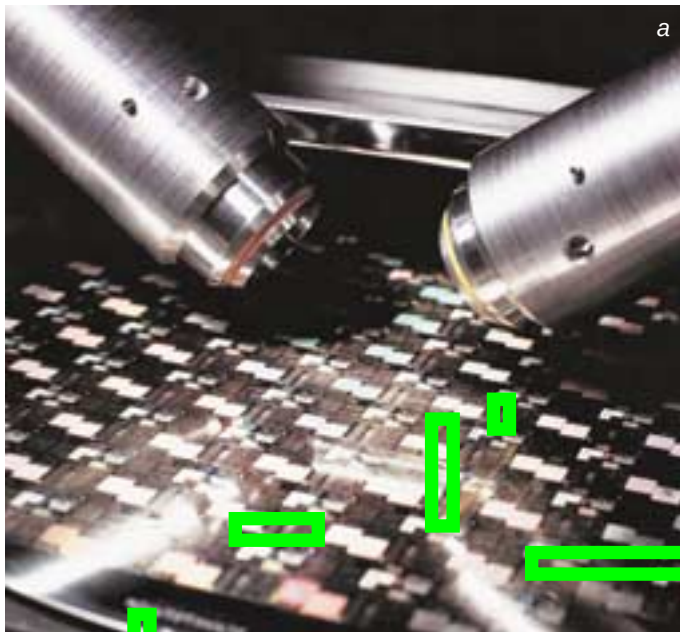
Comment détecter les échos de ces minuscules impulsions, après leur propagation dans les échantillons ? La découverte de la réflexion périodique des surfaces a répondu à cette question :

quand l'écho revient à la surface du matériau, il la déforme de manière périodique, provoquant des changements de ses propriétés optiques. Nous détectons ces variations de la réflectivité à l'aide d'une sonde lumineuse dirigée vers la surface.

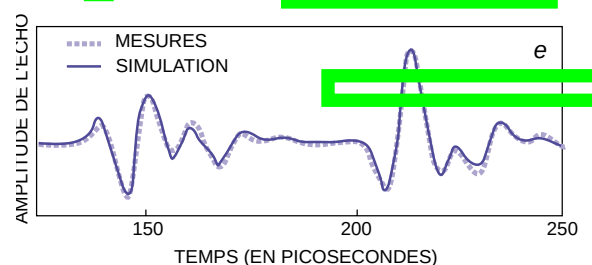
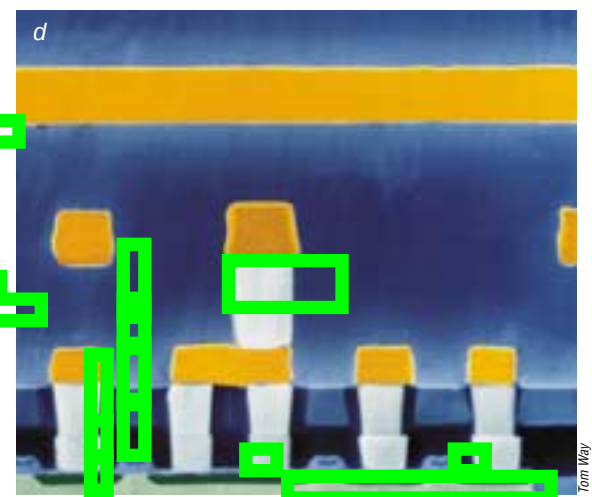
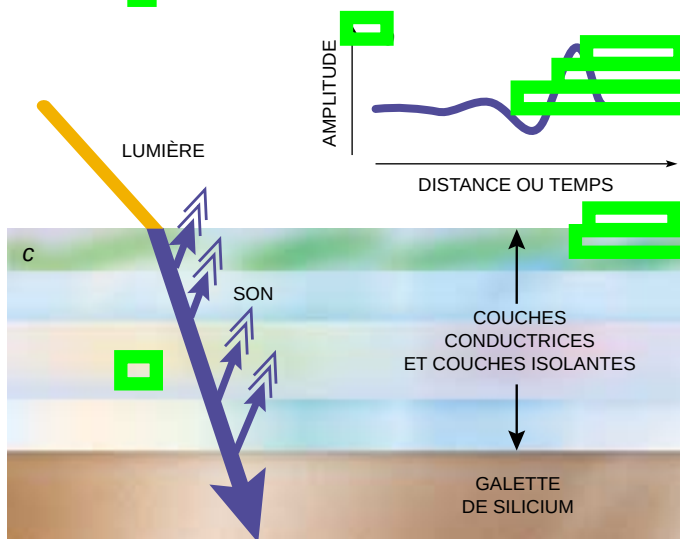
Les impulsions ultrasonores déterminent l'épaisseur d'une couche avec une précision meilleure que le dixième de nanomètre, qui est bien inférieure

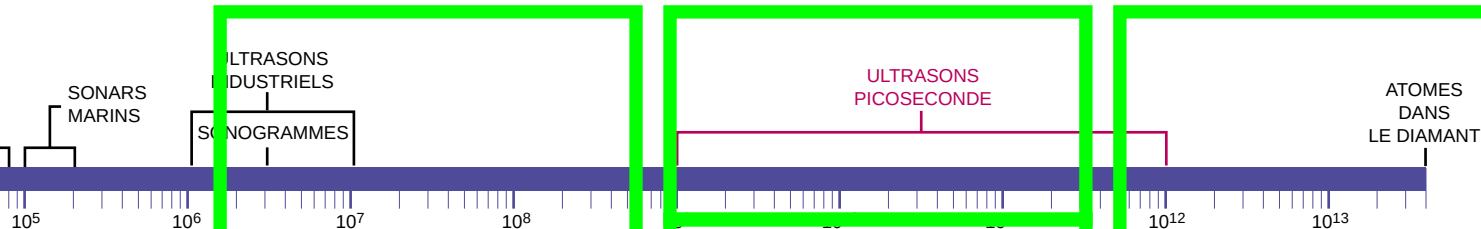
à la longueur d'onde des ultrasons (comprise entre 5 et 50 nanomètres) : il y a là de quoi heurter l'intuition des physiciens, qui savent que les ondes optiques ont une résolution limitée par la longueur d'onde des rayonnements utilisés. Toutefois nous évitons cette limitation en comparant le profil de l'onde ultrasonore émise et le profil de l'onde réfléchie. Alors

L'échographie picoseconde



L'industrie micro-électronique utilise les ultrasons pour étudier les propriétés des couches métalliques à l'intérieur des composants électroniques : un rayon laser (a) qui éclaire la surface d'une puce chauffe le matériau et engendre un train d'onde ultrasonore (b) de longueur égale à dix nanomètres environ (ce qui correspond à une durée d'une picoseconde, un millionième de millionième de seconde). Les ultrasons sont réfléchis par les diverses structures dont l'empilement compose les circuits (c et d). Lorsque les échos reviennent à la surface, ils en modifient les propriétés optiques, que l'on mesure à l'aide d'un second laser. Par ordinateur, on compare la forme de l'écho à un modèle (e) afin de déterminer la position exacte, l'épaisseur et la qualité des interfaces des couches internes.





que le début et la fin d'un train d'onde sont difficiles à déterminer, on localise facilement le maximum à moins d'une fraction de picoseconde, de sorte que l'on mesure la longueur de propagation de l'onde à moins d'un dixième de nanomètre près. La méthode de comparaison des profils est analogue à l'interférométrie.

Ayant mis au point ce procédé, certains physiciens de notre équipe se demandent si, avec notre système, nous pourrions faire de la musique : ne savions-nous pas déjà faire des sons ? En collaboration avec des ingénieurs du Centre de recherche IBM de Yorktown Heights, nous avons alors réalisé un «nanoxylophone», dont chaque élément vibrant est une lamelle d'or de moins de 40 nanomètres d'épaisseur et de 200 nanomètres de large. Lorsque nous envoyons une impulsion lumineuse sur une de ces lamelles, nous obtenons un son à une fréquence de huit gigahertz, environ 24 octaves au-dessus du *do* central du piano.

Nous avons également trouvé d'autres structures qui vibrent lorsqu'elles sont excitées par une impulsion lumineuse. Le ton le plus élevé que nous ayons atteint a une fréquence égale à 700 gigahertz, sept octaves au-dessus de la précédente. Toutefois notre nanoxylophone est un médiocre instrument de musique, car toutes ses lamelles produisent à peu près la même note.

À côté de ces explorations acoustiques, certains d'entre nous se préoccupaient de la mise au point de tests non destructifs des circuits intégrés. La fabrication de tels circuits nécessite plusieurs centaines d'étapes et des semaines de travail. Après la découpe d'un barreau de silicium très pur en galettes de 20 centimètres de diamètre et d'une fraction de millimètre d'épaisseur, on effectue un polissage, puis on injecte des impuretés sélectionnées, qui modifient la conduction électrique locale. Le semi-conducteur est alors recouvert de diverses couches minces, métalliques ou isolantes.

Les couches métalliques qui relient électriquement les différentes parties du circuit forment un réseau sur toute

la galette de silicium, à la manière d'un réseau autoroutier, avec ses ponts et ses échangeurs. Les couches isolantes, composées de silice ou de polymères, séparent les couches de métal. En fin de fabrication, les galettes sont découpées en une centaine de circuits intégrés.

Toute perturbation du processus de fabrication peut conduire à un désastre. Notamment l'ensemble du travail doit se faire en salle blanche, car la moindre particule de poussière bloque la fonctionnalité des transistors. Or tous les transistors d'un circuit doivent être synchronisés pour que le circuit complet fonctionne ; cette synchronisation dépend des temps de transit des signaux et de la résistance électrique de la couche métallique qui sépare les transistors. Comme cette résistance est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche métallique, le contrôle des épaisseurs est fondamental.

Une puce et au-delà

L'acoustique picoseconde permet aux fabricants de mesurer l'épaisseur des couches dans les circuits intégrés. Une impulsion lumineuse, focalisée sur la partie de composant à étudier, est absorbée par la couche supérieure du circuit. L'échauffement et la dilatation qui en résultent engendrent des ondes de pression qui se propagent au travers de l'empilement. Chaque fois que l'onde de pression rencontre une interface entre deux couches, une partie du signal est réfléchi. En mesurant les temps mis par ces échos pour revenir en surface, on détermine l'épaisseur de chaque couche avec précision.

Cette méthode est analogue aux techniques sismiques que les géophysiciens utilisent pour déterminer l'épaisseur des diverses couches de la croûte terrestre, mais les couches sont si minces que les échos se rejoignent et interfèrent. Le phénomène est analogue à celui que l'on observe quand de la lumière se réfléchit sur une couche d'huile à la surface de l'eau : les interférences conduisent à des figures irisées. Dans le cas des circuits testés par acoustique picoseconde, les ondes produi-

sent des battements qu'on doit déchiffrer pour en extraire des renseignements sur la géométrie et la taille des couches.

Les échos révèlent de nombreuses autres caractéristiques des couches empilées. Lorsqu'une impulsion de pression se réfléchit sur une surface irrégulière, l'onde se disperse dans l'espace et dans le temps. L'analyse des formes d'ondes donne une idée de la rugosité de la surface. De même, l'amplitude de l'écho révèle la qualité de la jonction entre deux couches : lorsque le contact entre deux films est mauvais, par exemple en raison d'une contamination, l'onde ne franchit pas l'interface, de sorte que le signal réfléchi est anormalement intense.

Maintenant que l'acoustique picoseconde a fait ses preuves pour l'étude des circuits intégrés, nous cherchons à l'utiliser pour étudier des systèmes plus compliqués. Les médecins utilisent déjà les échographies pour surveiller le bon développement des fœtus, *in utero*. À l'aide des ultrasons picosecondes, nous espérons sonder l'intérieur d'une cellule vivante. Nous voudrions créer des images acoustiques des cellules et analyser leur fonctionnement. Notamment nous cherchons à réaliser des images fines du cytosquelette (le réseau qui soutient l'ensemble de la cellule), afin de réaliser l'équivalent des radiographies, mais à l'échelle microscopique.

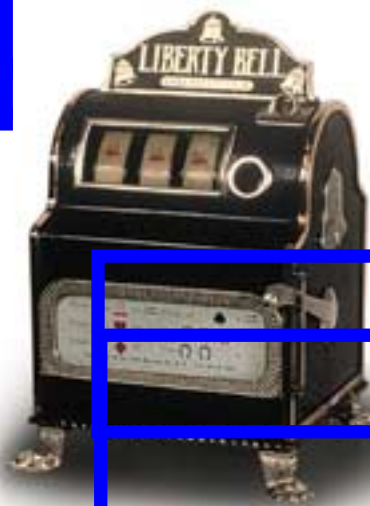
Hubert MARIS est professeur de physique à l'Université Brown.

H.-N. LIN et al., *Study of Vibrational Modes of Gold Nanostructures by Picosecond Ultrasonics*, in *Journal of Applied Physics*, vol. 73, n° 6, pp. 3745, 1er janvier 1993.

Stephen A. CAMPBELL, *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University Press, 1996.

Bernard PERRIN, Bernard NONELLO, Jean-Claude JEANNET et Alain MARILLIER, *Développements récents en acoustique picoseconde*, Actes du 4e Congrès français d'acoustique, vol. 1, p. 117, 1997.

C.J. MORATH et al., *Ultrasonic Multilayer Metal Film Metrology*, in *Solid State Technology*, vol. 40, n° 6, pp. 85-92, juin 1997.



Aléas du hasard informatique

JEAN-PAUL DELAHAYE

Le vrai hasard étant hasardeux, contentons-nous d'un pseudo-hasard et adaptons-le à nos besoins.

Un calcul composé de milliards d'étapes successives peut être répété et donner exactement le même résultat : le hasard a été éliminé des systèmes informatiques. Cette extraordinaire maîtrise des petits courants électriques, que l'on combine pour exécuter un programme, est époustouflante. Dans nos ordinateurs, le hasard est maîtrisé jusqu'au niveau microscopique : il a disparu ! N'est-il pas étonnant qu'on en ait besoin ? Après avoir tout fait pour l'éliminer, il faut recréer le hasard.

Roland Moreno, plus connu pour son invention de la carte à puce, avait perfectionné, dans sa jeunesse journalistique, un dispositif automatique pour tirer à pile ou face. L'informatique supplantée au tirage physique dans un grand nombre d'applications où il faut engendrer rapidement des chiffres aléatoires.

La difficulté est la suivante : imiter tant qu'il est possible le tirage à pile ou face, où la perméabilité d'un lancer ne permet pas de déterminer le résultat du lancer suivant, et ce, par un programme fondé sur une formule mathématique d'utilisation simple par l'ordinateur. Or, qui dit formule mathématique dit déterminisme, donc un hasard limité.

NÉCESSITÉ DU HASARD

Le hasard est nécessaire dans les logiciels de *simulation* : pour reproduire des phénomènes aléatoires, il faut disposer de briques élémentaires d'aléas, c'est-à-dire de nombres aléatoires.

En cryptographie aussi, car, pour échapper aux espions, on doit déguiser les messages en les combinant avec des séquences de chiffres quelconques, c'est-à-dire aléatoires : on constate d'ailleurs qu'à partir d'un bon système de codage, on obtient un bon système de création de suites aléatoires et... inversement.

Le hasard est nécessaire en *théorie de l'information*, où les séquences au plus

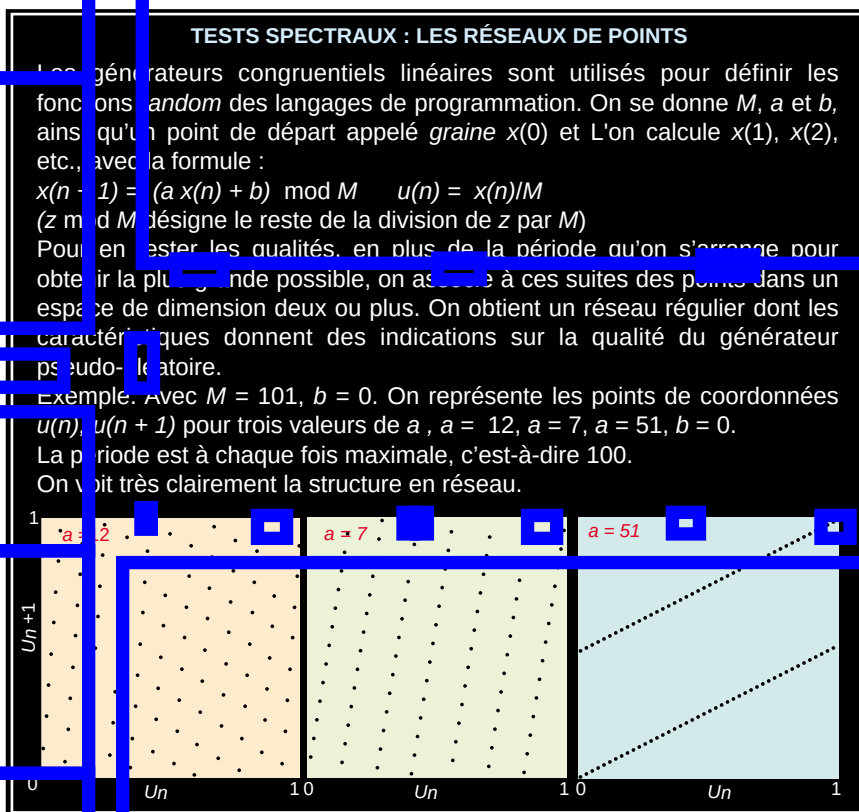
fort contenu en information sont justement les séquences vraiment aléatoires. Aussi s'est développée une science de la production contrôlée de l'aléa, qui a aujourd'hui atteint un grand raffinement.

En réalité, il y a au moins trois disciplines dans la science du hasard : celle du *hasard faible*, utile pour les simulations, celle du *hasard moyen*, qui convient

en cryptographie, et celle du *hasard fort*, née de la théorie de l'information et de la calculabilité.

LE HASARD FAIBLE

Pour créer un nuage de points noirs destinés à colorier en gris une partie d'image (et plus généralement dans



1. En prenant une suite pseudo-aléatoire de nombre entre 0 et 1, $u(0)$, $u(1)$, etc. et en dessinant les points $M(0) = (u(0), u(1))$, $M(1) = (u(1), u(2))$, etc., on obtient une figure où l'imperfection des $u(i)$ apparaît instantanément. Ici on examine les générateurs congruentiels linéaires. Pour $a = 12$, les points sont bien distribués (trop bien ?). Pour $a = 7$, le résultat est un peu moins bon, et pour $a = 51$, il n'est pas satisfaisant. Des méthodes mathématiques et des algorithmes spécialisés permettent de calculer les meilleurs jeux de paramètres pour que les réseaux (en dimension deux ou plus) soient satisfaisants. Un générateur de ce type, nommé RANDU, fut exploité pendant des années dans toutes sortes de logiciels (en particulier, dans le système d'exploitation des machines de la fameuse gamme IBM 360), avant qu'on ne découvre ses graves insuffisances. Les paramètres utilisés étaient : $M = 2^{31}$, $a = 65539$, $b = 0$.

tout problème de texture), pour simuler la circulation automobile d'un réseau routier, pour étudier des molécules de gaz dans un réservoir ou encore des interactions entre particules élémentaires, il faut des méthodes rapides produisant des millions de bits aléatoires, même s'ils ne le sont que superficiellement. Un hasard faible suffit.

George Marsaglia, de l'Université de Floride, spécialiste des générateurs aléatoires, pense que dans bien des simulations même un médiocre hasard convient : « Un générateur aléatoire, écrit-il, c'est comme le sexe : quand c'est bon c'est merveilleux, et quand c'est mauvais c'est encore assez bon ».

Les fonctions *random* des langages de programmation procurent ce hasard peu coûteux en temps de calcul. On les utilise assez souvent avec satisfaction, mais mille exemples ont montré, dans le passé, qu'en cas d'expérimentations intensives ou de calculs de désagréables séries statistiques, ils produisent. En 1993, des chercheurs de

l'Université de Géorgie, explorant, par simulation, un problème de physique des solides, obtinrent des résultats en contradiction avec ceux obtenus par calculs directs. Une autre équipe découvrit un an plus tard que ces comportements aberrants étaient dus à l'utilisation de générateurs aléatoires insuffisamment rapides. Le hasard élevé en simulation, mais si l'on veut s'en garder, alors les difficultés commencent, et cette fois la règle est que, pour obtenir un hasard garanti, il ne faut surtout pas faire n'importe quoi.

LES GÉNÉRATEURS LES PLUS SIMPLES

Les générateurs congruentiels linéaires sont souvent utilisés pour les fonctions *random*. Leur mode de fonctionnement est le plus simple possible, et donc rapide.

On part de trois nombres entiers : M , a et b . M définit l'intervalle où les nombres de la suite vont être engendrés, a et b qui sont pris entre 0 et $M-1$. On choisit un

quatrième nombre, la *graine* $x(0)$, elle aussi entre 0 et $M-1$. On changera cette graine si l'on veut, avec le même générateur, obtenir une autre suite, ou en la reproduisant si l'on souhaite obtenir exactement le même « hasard » lors d'un second essai, ce qui est souvent utile pour la mise au point d'un programme.

La suite pseudo-aléatoire est donnée par les calculs suivants :

$x(1) = \text{reste de la division de } ax(0)+b \text{ par } M$
 $x(2) = \text{reste de la division de } ax(1)+b \text{ par } M$
 etc.

Chaque $x(i)$ est un nombre entier compris entre 0 et $M-1$, qu'on utilise pour engendrer des bits aléatoires (0 ou 1) ; se choisit fait, par exemple, en prenant la parité de $x(i)$, - 0 si $x(i)$ est pair, et 1 si $x(i)$ impair - (ou mieux, en calculant la parité de la somme des chiffres de $x(i)$, 0 si cette somme est paire, 1 si cette somme est impaire).

On peut transformer les entiers $x(i)$ pour donner des nombres réels. En prenant par exemple $u(i) = x(i)/M$, on obtient une suite de nombres réels $u(i)$ compris entre 0 et 1, dont la distribution est, en première approximation, uniforme : chaque sous-intervalle de $[0, 1]$ de $[0, 1]$ contient $x(i)$ un nombre de fois proportionnel à sa longueur $z-y$.

Les paramètres suivants ont été utilisés : $M = 2^{31} - 1$, $a = 16807$, $b = 0$.

Avec $x(0) = 12345$, on obtient :

$x(1) = 20732415$ $u(1) = 0,0966165285$

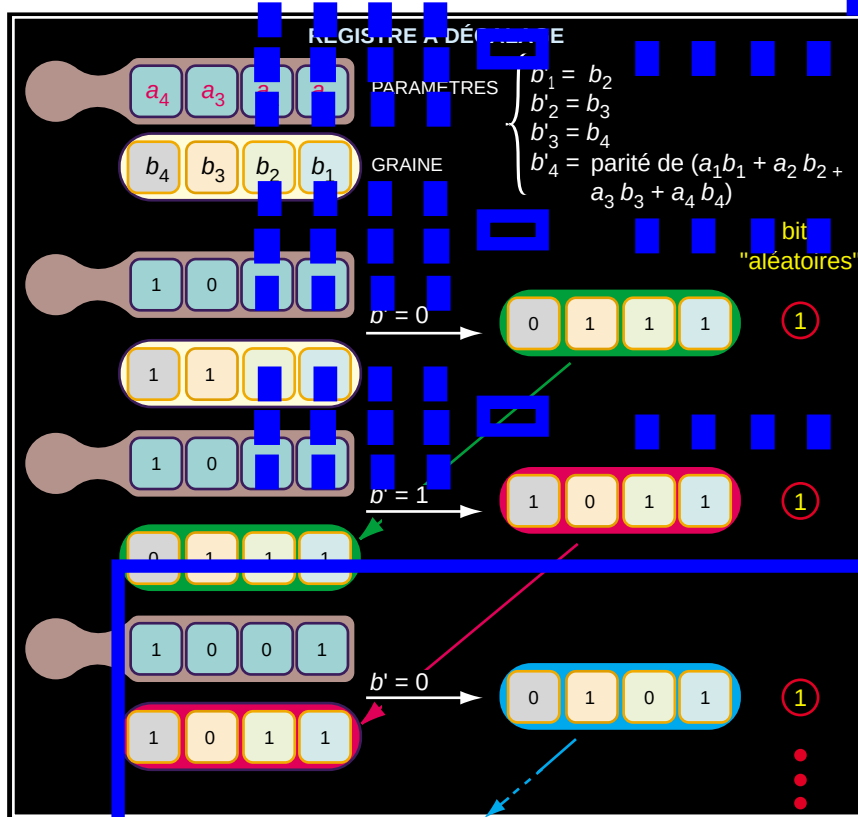
$x(2) = 179089824$ $u(2) = 0,8339946274$

$x(3) = 2035175616$ $u(3) = 0,9477024977$
 etc.

La question est : comment obtenir des garanties sur le caractère aléatoire de la suite ? Persuadons-nous d'abord qu'une suite engendrée par le générateur précédent ne peut pas recommencer. En effet, il n'y a qu'un nombre fini de valeurs possibles pour $x(i)$ (les entiers entre 0 et $M-1$), et donc quand apparaît une valeur déjà obtenue - ce qui se produit nécessairement - la suite repasse par les mêmes valeurs, dans le même ordre, et ce, indéfiniment. Le nombre d'étapes pour revenir aux mêmes calculs est la période.

Cette période n'est pas si grave qu'elle en a l'air, et tout générateur fondé sur une formule du type précédent présentera ce défaut. Essayons d'apprivoiser cette ronde.

Il est clair qu'on ne saurait se contenter de faire, pour la simulation, d'une suite dont la période serait trop petite. On souhaite que la suite ait une grande période, voire la plus grande possible, c'est-à-dire M . L'analyse mathématique du problème a conduit au résultat suivant, démontré au début des années 1960 : si les nombres b et M n'ont pas de diviseurs communs, si tout nombre premier qui



2. Le registre à décalage (à rétroaction linéaire) est défini par le mécanisme suivant. Une série de N bits est fixée a_1, a_2, a_3, a_4 . Ce sont les paramètres, ici, 1 0 0 1. On initialise le générateur avec quatre bits b_1, b_2, b_3, b_4 (ils constituent la graine. Ici, 1 1 1 1). À chaque étape, un nouveau bit b' est introduit. $b' = 0$ si $(a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 + a_4 b_4)$ est pair, 1 sinon (dans notre exemple, il suffit de compter le nombre de 1 parmi les bits b_1 et b_4 : s'il y en a 0 ou 2, b' vaut 0, sinon b' vaut 1). Le nouveau bit b' remplace b_4 , lequel remplace b_3 , lequel remplace b_2 , lequel remplace b_1 . Le bit b_1 , lui, est utilisé comme bit aléatoire et disparaît du quadruplet. Dans notre exemple, on obtient successivement les quadruplets : 1111 0111 1011 0101 1010 1101 0110 0011 1001 0100 0010 0001 1000 1100 1110, puis la suite se répète. Les chiffres « aléatoires » engendrés sont obtenus en prenant le dernier de chaque série de quatre : 111101011001000...

3. LES DIFFÉRENTS HASARDS UTILISÉS

Hasard facile

Bon mélange, uniformité, longue période, satisfaction des tests statistiques. Peut être produit par des algorithmes rapides. Utile en simulation.

Hasard moyen

Imprévisibilité pour un observateur ne disposant que de moyens de calcul réalistes.

Peut être produit (vraisemblablement) par algorithmes moyennement rapides. Utile en cryptographie.

Hasard fort

Imprévisibilité totale, incompressibilité, contenu maximum en information.

Ne peut jamais être produit par algorithme.

Peut être produit (vraisemblablement) par des moyens physiques.

Utile en cryptographie et en théorie de l'information.



des différents chiffres et des suites de ces chiffres. Des jeux de tests ont ainsi été développés (en particulier, la série *Diehard* de George Marsaglia) et sont disponibles sur Internet pour qui souhaite tester la qualité d'une suite aléatoire : <http://stat.cu.edu/~geo/diehard.html>

Reste que les spécialistes des générateurs aléatoires ont aussi obtenu une démonstration des bonnes propriétés structurelles et statistiques.

Même une batterie de tests statistiques ne garantissent pas qu'un générateur donné sera satisfaisant pour une simulation donnée. Mais quelques tests peuvent disqualifier une suite, mais pas en assurer la qualité.

PRÉVISIBILITÉ

Cette situation est particulièrement dommageable en cryptographie, où l'on a souvent besoin de suites aléatoires et où le fait qu'une suite ne le soit pas vulnérabilise un procédé de codage. On raconte qu'après la guerre, un algorithme de codage qui devait utiliser des suites aléatoires toutes différentes fut utilisé deux fois de suite par les Russes avec la même clef, ce qui permit le déchiffrement des messages par les Américains et les conduisit à arrêter Klaus Fuchs, Julius et Ethel Rosenberg, Donald MacLean. L'officier russe responsable fut fusillé.

Les générateurs congruentiels linéaires sont depuis longtemps déconseillés en cryptographie. La raison tient à une série de résultats mathématiques qui indiquent qu'ils sont *prévisibles* : à partir de quelques points successifs de la suite $x(n)$, il est possible de calculer en un temps court les paramètres du générateur, et donc de prévoir son comportement futur avec une exactitude absolue, ce qui évidemment est contraire aux nécessités de la cryptographie. En cryptographie, conformément à l'idée que le hasard est imprévisible, il faut être certain que la suite aléatoire ne pourra pas être prédite rapidement à partir de la connaissance de quelques-uns de ses points.

« Rapidement », en informatique, signifie « ce qui peut être calculé en un temps plus petit qu'un polynôme de la taille des paramètres ». Si la durée du calcul est inférieure à $n^3 + 2n^2 + 12$, où n est la taille des paramètres, on considère que le calcul est rapide. Si, en revanche, on ne sait faire un calcul qu'en un temps 2^n ou 3^n , etc., on considère que la longueur du calcul est inacceptable.

En utilisant cette idée, on arrive à une définition précise de la notion de « géné-

divise M divise aussi $a - 1$, et si M n'est pas divisible par 4, alors la période du générateur est maximale, c'est-à-dire M . Si M est un multiple de 4, il faut que $a - 1$ le soit aussi pour que la période soit maximale.

Autrement dit, si vous vous y prenez bien, en partant d'une valeur $x(0)$ quelconque (entre 0 et $M - 1$), vous n'y reviendrez qu'après être passé par tous les nombres entre 0 et $M - 1$. Cette promenade par tous les nombres possibles entre 0 et $M - 1$ assure pas que la suite soit vraiment désordonnée, mais montre qu'on ne va pas osciller entre des valeurs trop proches, ce qui est déjà

Il s'agit d'une propriété dite structurale. Les spécialistes ont analysé d'autres propriétés structurales identifiant des conditions mathématiques suffisantes pour qu'une suite engendrée par des générateurs congruentiels

acceptables, c'est-à-dire produise des points assez équitablement distribués ou ne s'alignant pas trop quand on les représente dans des espaces de test.

Dans une simulation utilisant n nombres pseudo-aléatoires, il est recommandé d'utiliser un générateur de période supérieure à n . En connaissant des combinaisons de générateurs congruentiels linéaires engendrant des suites de période de 2^{200} et même plus. Récemment un générateur de période $2^{19937} - 1$ a été proposé. En fait de précaution, il est même risqué d'utiliser un générateur simple dont on connaît les propriétés quand on a démontré.

En plus des propriétés structurales prouvées, on met en œuvre (sans cette fois chercher à faire de démonstrations mathématiques) des tests statistiques de

4. LE PROCÉDÉ DE L. BLUM, M. BLUM ET D. M. SHAMIR (BBS)

Le générateur BBS est vraisemblablement satisfaisant en cryptographie.

Soit n un produit de deux entiers premiers, chacun de la forme $4m + 3$. On prend comme graine l'entier x sans facteur commun avec n et l'on calcule $x(i) = x^2 \bmod n$. On définit ensuite $x(i+1) = x(i)^2 \bmod n$. La parité de $x(i)$ donne la suite pseudo-aléatoire de bits proposée par BBS.

70	PARITÉ	0	b_0
$70^2 = 4900 = 23 \times 209 + 93$	PARITÉ	1	b_1
$93^2 = 8649 = 41 \times 209 + 80$	PARITÉ	0	b_2
$80^2 = 6400 = 30 \times 209 + 130$	PARITÉ	0	b_3

Si la graine est choisie aléatoirement, et si l'hypothèse QRA est vraie (elle exprime que «trouver les racines carrées modulo n est un problème difficile») alors la suite de bits $b_0 b_1 \dots b_m$ proposée par BBS est imprévisible (aucun algorithme rapide ne fait mieux que le hasard pour prédire le m -ième digit à partir des précédents). Il en résulte, d'après un résultat de A. Yao de 1982, que la suite de bits $b_0 b_1 \dots b_m$ est indiscernable, par des tests fonctionnant en temps polynomial, d'une suite produite par une variable aléatoire équitable.

rateur aléatoire cryptographique sûr». Est sûr un générateur dont la période est trop grande pour être explorée exhaustivement, et tel qu'en plus les moyens exigés pour mener une analyse conduisant à en prévoir le comportement seraient ceptablement coûteux.

Il faut remarquer qu'en cryptographie on accepte parfois qu'un générateur ne soit pas uniforme (par exemple, qu'il donne 45 pour cent de '0' contre 55 pour cent de '1') s'il est imprévisible, alors qu'en simulation la situation est inverse : l'uniformité est plus importante que l'imprévisibilité.

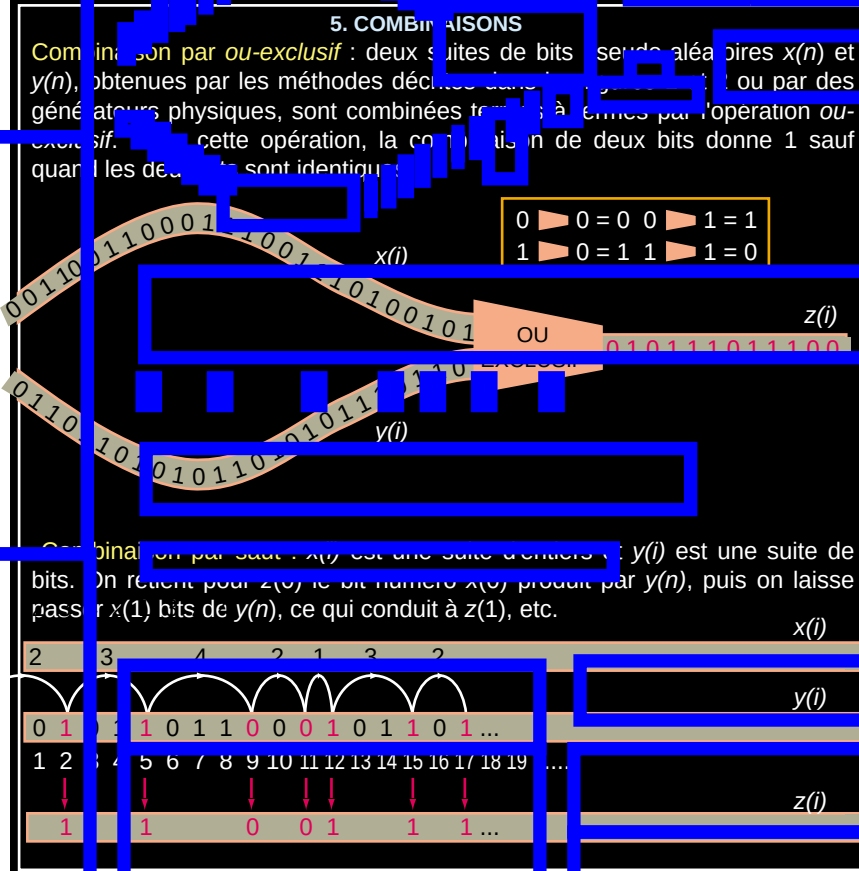
Existe-t-il des générateurs cryptographiquement sûrs ? Vraisemblablement oui, et le générateur BBS décrit sur la figure 4 est un bon candidat comme générateur cryptographiquement sûr. Pourquoi vraisemblablement ? Parce que les mathématiciens ont seulement réussi à établir que le BBS est sûr en admettant qu'une certaine conjecture est vraie (il s'agit de la conjecture sur la difficulté du calcul de la *résiduosité quadratique*). La conjecture est jugée très vraisemblable, et donc on est presque certain que BBS est un bon générateur aléatoire... mais pas absolument.

Cette situation où un résultat, conjecturé et jugé vraisemblable par les spécialistes, reste non démontré est fréquente en théorie de la complexité. D'autres conjectures attendent le génie mathématique qui saura les élucider. La situation est inconfortable : les cryptographes utilisent des méthodes vraisemblablement bonnes, sans avoir d'assurances fermes à leur sujet. Cette remarque s'applique en particulier aux systèmes utilisés pour la carte à puce ou les transactions entre banques.

Qui a dit qu'on faisait trop de mathématiques ? La création de suites aléatoires sûres est un exemple paradigmatique (qu'on trouverait « physique ») de l'insuffisance du développement des mathématiques contemporaines face aux besoins de l'industrie. Même sur des sujets économiquement cruciaux, car liés au commerce électronique et à la sécurité bancaire, on attend des avancées mathématiques.

LE HASARD FORT

Ce hasard cryptographique (défini par la difficulté de la prédiction), sans doute atteint pas plus, est le **hasard moyen**. Le **hasard fort** est défini par l'impossibilité absolue de la prédiction, quelle que soit la puissance de calcul utilisée. On a démontré, il y a quelques années, que cette impossibilité absolue est équivalente à l'impossibilité de la compression des données : une suite de nombres est



aléatoire au sens fort s'il est impossible de la décrire en utilisant moins de places que celle qu'elle occupe.

Le niveau de ce hasard fort défini en 1966 par le mathématicien suédois Pier Martin LÖf est que, par nature, aucun programme déterministe d'ordinateur ne peut l'engendrer. Une procédure d'ordinateur (par nature déterministe) n'engendrera jamais de suites aléatoires au sens fort.

Dès 1951, avant même qu'elle n'ait pris un sens mathématique précis, von Neumann, conscient de cette difficulté fondamentale, écrivait : «Quiconque envisage une méthode arithmétique pour produire des chiffres aléatoires est en état de péché».

À côté de l'impossibilité pour un programme déterministe d'engendrer une suite aléatoire au sens fort, on démontre que, si on réussit à disposer d'un phénomène physique non déterministe équivalent (produisant des 0 et des 1 en proportion égale), alors en faisant travailler ce générateur on tombera presque certainement sur une suite aléatoire au sens de P. Martin-Löf (donc au sens le plus fort). Ce résultat semble être un jeu de mots – l'indéterminisme produit le hasard –, mais mathématiquement il lui correspond un énoncé précis qui n'est ni évident ni une boutade.

RÉALISATION DE TABLES DE NOMBRES ALÉATOIRES

Toutes les raisons expliquent pourquoi on s'est souvent tourné vers des mécanismes physiques de production du hasard.

Il n'y a pas si longtemps, on éditait des tables de nombres aléatoires. En 1924, une table de 40 000 chiffres aléatoires fut publiée par L. Tippett. En 1939, un mécanisme physique fut utilisé par M. Kendall et B. Babington-Smith pour produire une table de 100 000 chiffres aléatoires. En 1955, la *RAND Corporation* publia une table d'un million de chiffres aléatoires engendrés, là encore, par une machine. Les tests statistiques utilisés pour mettre cette table à l'épreuve furent repris par J. Guilloud et M. Bouyer quand, en 1973, ils calculèrent un million de décimales de π . Le nombre π passa les tests. Cela ne signifie pas que π est aléatoire au sens fort : le cryptographe saura reconnaître la suite des décimales de π et calculer les suivantes pour déchiffrer le message.

Les chiffres de π , contrairement à une légende tenace, ne conviennent donc ni comme hasard faible pour la simulation (trop compliqués à calculer), ni comme hasard moyen en cryptographie, où ils ne possèdent pas les propriétés d'imprévisibilité souhaitées.

Aujourd'hui la tradition de l'édition des tables de nombres aléatoires s'est adaptée, et un CD-ROM de plus de quatre milliards de bits aléatoires a été récemment édité par Marsaglia selon une méthode que je vais décrire. Des sites Internet proposent aussi des morceaux de bits aléatoires à qui veut bien.

Partant du constat que (a) les méthodes purement physiques produisent souvent des séquences avec des déviations de fréquences et autres défauts de mélange et qu'il faut donc s'en méfier en simulation, mais que (b) les méthodes par générateurs algorithmiques ne sont pas sûres, principalement à cause de leur prévisibilité, Marsaglia a additionné les deux procédés.

Il a pris des séries de bits engendrées par des procédés physiques et des séries générées par des générateurs algorithmiques ayant passé les tests de bon mélange, et a opéré un *ou-exclusif* entre les deux séries : '0' et '0' donnent '0' ; '0' et '1' donnent '1' ; '1' et '0' donnent '0' ; '1' et '1' donnent '1'. Cela combine les bonnes propriétés des deux méthodes : l'imprévisibilité est garantie par la composante physique, le bon mélange par la composante algorithmique. Bien sûr, ces séries ont été soumises aux batteries de tests dont on dispose. Notons que ces mêmes batteries indiquaient clairement que la plupart des générateurs physiques ne fonctionnaient pas de manière très satisfaisante.

Même s'il a été produit avec soin et qu'il sera certainement utile, le CD-ROM n'est malheureusement pas la solution ultime. D'une part, pour la simulation, il se peut qu'on ait besoin de séries aléatoires encore plus longues que celles du CD-ROM. D'autre part, en cryptographie, le fait que le CD-ROM soit disponible à tous est quelque peu inquiétant !

Les générateurs physiques fondés sur le bruit thermique tel QNG de la Société ComScire (<http://shell.rmi.net/~comscire>), ou sur la diode Zener exploitant l'effet tunnel des électrons, comme SHRN (<http://195.142.42.43/ave/comom/home.html>) ou encore les générateurs devant eux. Selon les applications, on conseillera donc de les utiliser en les combinant (en utilisant un *ou-exclusif*, par exemple) avec des méthodes simples (par exemple, des générateurs congruentiels linéaires) car des méthodes dont l'imprévisibilité est admise.

L'ERREUR DE NETSCAPE

Dans les applications où peu de bits aléatoires sont nécessaires, l'idée ancienne de mesurer un paramètre dépendant du contexte physique est bonne, surtout si on la combine avec une autre.

6. UNIFORMISATION D'UN GÉNÉRATEUR BIAISÉ

Lorsqu'on utilise un générateur physique, il peut éventuellement produire autant de «0» que de «1» (c'est-à-dire un générateur équilibré). Il y a plus de 40 ans, von Neumann a proposé un moyen très simple de corriger un tel défaut : prendre les bits deux par deux ; supprimer tous les couples «00» et tous les couples «11» ; transformer tous les couples «01» en «0» et tous les couples «10» en «1». Exemple :

00 10 01 00 00 10 01 00 10 10 01 00 01 10 01 01 00 10 00 01

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

On perd quelques bits, mais on corrige un éventuel déséquilibre entre le nombre moyen de «0» et le nombre moyen de «1».

Si la suite initiale donne «1» avec une probabilité p et «0» avec une probabilité $1 - p$, le couple «01» a pour probabilité $p(1-p)$ comme le couple «10» et donc la suite obtenue par le procédé de von Neumann donne bien «0» et «1» avec la même probabilité, c'est-à-dire $1/2$.

C'est ce qui est fait dans les machines à sous des casinos où un générateur simple tourne en permanence, dont on ne prend en compte le résultat qu'à l'instant précis où le joueur joue (ce qui assure une forme d'imprévisibilité). Des mécanismes de mesure de la date ou des caractéristiques de la frappe de celui qui est devant l'ordinateur peuvent être utilisés pour obtenir un petit nombre de bits aléatoires, et c'est ce que fait PGP (*Pretty Good Privacy*, le fameux logiciel de cryptographie utilisé sur *Internet*) pour engendrer ses clés aléatoires.

Malgré toute cette attention : il y a deux ans, le protocole de communication confidentielle de Netscape, célèbre logiciel de navigation sur *Internet*, a été cassé par des étudiants. Ils avaient remarqué que les clés étaient engendrées par lecture de certaines parties de la mémoire de l'ordinateur selon un procédé qui ne pouvait conduire qu'à des clés appartenant à une partie assez réduite de l'ensemble des clés possibles (ensemble *a priori* trop grand pour être exploré exhaustivement). Les clés possibles étant en nombre réduit, l'approche exhaustive devenait utilisable et permettait de décrypter les messages.

Cette mésaventure s'est produite fréquemment et c'est pourquoi une note intitulée *Randomness Recommendation for Security*, rédigée par des experts en sécurité, insiste sur une erreur commune : en piochant dans une très grande base de données (par exemple, le disque dur de l'ordinateur de l'utilisateur), on ne tombe pas toujours sur des bits aléatoires.

Les disques des ordinateurs (surtout s'ils sont neufs) comportent de grandes zones vides ; de plus, les fréquences d'utilisation des caractères ne sont pas uniformes, ce qui conduit à fausser gravement l'uniformité *a priori* sur

les clés engendrées et rend parfois, comme dans le cas évoqué ci-dessus, envisageable une approche exhaustive.

Les recommandations des experts sont donc de mélanger plusieurs sources non corrélées, en utilisant le *ou-exclusif* déjà mentionné ou d'autres fonctions plus perfectionnées. Ils insistent aussi sur la taille des clés qui protègent contre les attaques par énumération exhaustive : elles doivent comporter au moins 66 bits (10^9 clés pourraient bientôt être traitées par seconde, et donc plus de 10^{10} par mois, ce qui correspond à 50 bits).

Ces exemples confirment que, dans le domaine de la génération de suites aléatoires, qu'il s'agisse de cryptographie ou pas, les pièges sont partout présents et infiniment variés : on ne se réfère jamais assez du hasard.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye@lil.fr

L. BLUM, M. BLUM et M. SHUB, *A simple unpredictable pseudo-random number generator*, SIAM J Computing 15.2, pp. 351-386, 1986.

J.-P. DELAHAYE, *Le fascinant nombre Pi*, Éditions Pour La Science, Paris, 1997.

L. GOUBIN et J. PATARIN, *La génération d'aléa sur l'ordinateur*, in *Quadrature*, oct.-nov.-déc. 2001, pp. 27-30.

P. L'ECUYER, *Random number generation. Handbook on Simulation*, Ed. Jerry Banks, Wiley, 1997.

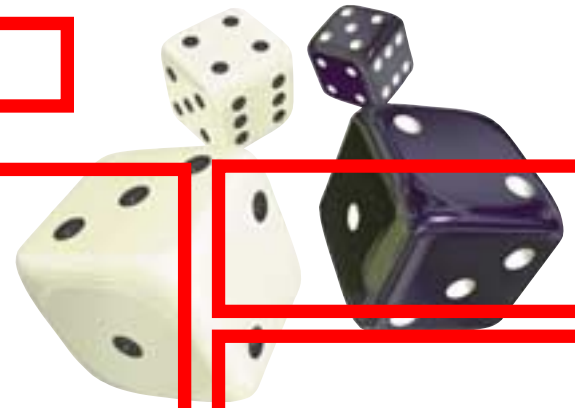
B. SCHNEIER, *Cryptographie appliquée*, Thompson Publishing, 1995.

C. P. SCHNORR, *A survey of the theory of random sequences*, in *Basic Problems in Methodology and Linguistics*, Dordrecht, pp. 193-210, 1977.

Us et charmes des dés

IAN STEWART

Comme le révèlent les dés, les probabilités vont souvent à l'encontre de l'intuition.



Qui dit dés dit jeu. Selon Hérodote ils remontent aux Lydiens du temps du roi Atys ; selon Sophocle, ils ont été inventés par le Grec Palamède, au cours du siège de Troie.

Qu'ils soient la création d'astérogamés désœuvrés semble plausible, mais des archéologues ont découvert des dés cubiques, analogues à ceux d'aujourd'hui, dans des tombes égyptiennes datant de 2 000 ans avant notre ère. Des dés ont également été mis au jour dans des ruines chinoises de 200 ans avant notre ère.

Des dés de toutes formes et aux marques étranges, faits dans des maté-

riaux allant des dents de castors à la porcelaine, ont été utilisés par les Indiens d'Amérique du Nord, par les Aztèques, par les Mayas, par les Polynésiens, par les Inuits et par nombre de tribus africaines. Dans cet article, nous nous limitons aux dés modernes standards : des cubes dont chaque face porte entre 1 et 6 points, de sorte que la somme des points sur deux faces opposées soit égale à 7. Ainsi, sur les trois paires de faces opposées, on trouve : 1 et 6, 2 et 5, 3 et 4. Cette règle autorise encore deux arrangements, image l'un de l'autre dans un miroir. Aujourd'hui, tous les dés de fabrication occidentale ressemblent au dé blanc de la figure 2, où les faces 1, 2 et 3 apparaissent autour de leur sommet commun, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Au Japon, les

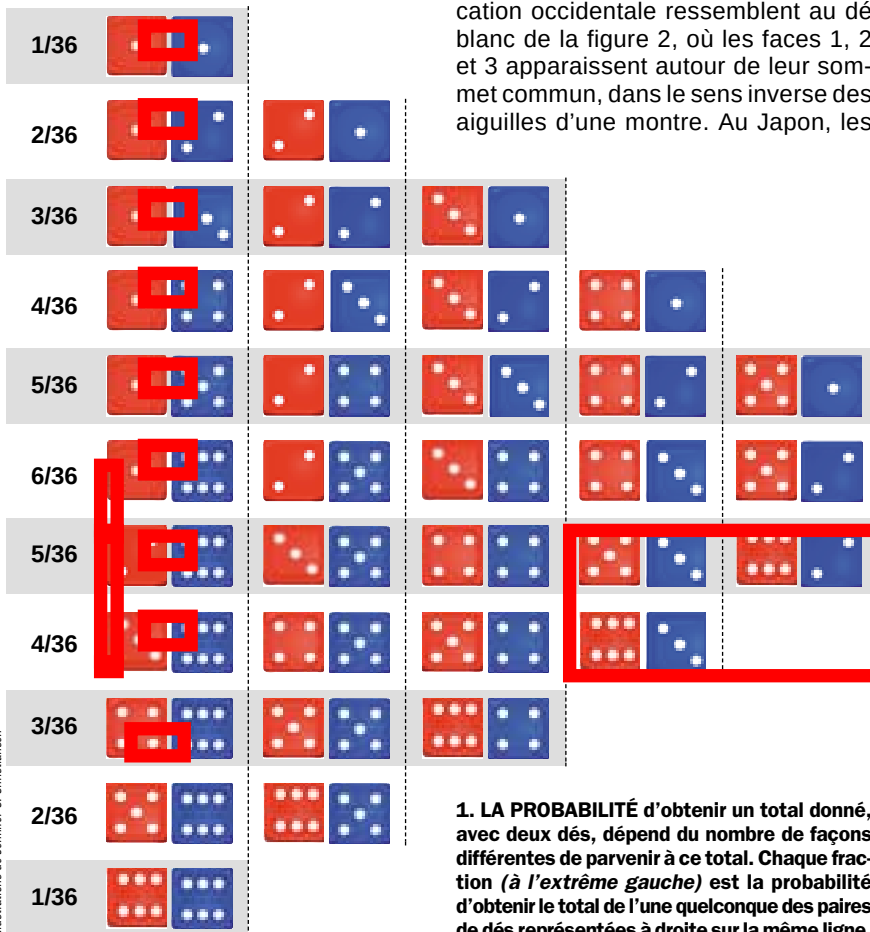
2. LES DÉS STANDARDS ressemblent aux dés blancs : les faces marquées 1, 2 et 3 se regroupent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de leur sommet commun. Ces faces sont placées en sens inverse dans le dé noir.

dés ayant cette orientation sont utilisés dans tous les jeux, excepté au mah-jong, où l'on adopte l'image miroir (le dé noir de l'illustration). Ces derniers sont aussi utilisés en Chine. Sauf mention contraire, nous n'utiliserons ici que des dés occidentaux.

On lance souvent les dés par deux, afin d'obtenir un total compris entre 2 et 12. Supposons d'abord que les dés soient « normaux », chaque face ayant la probabilité $1/6$ de sortir. La probabilité d'un total donné est égale au quotient du nombre de configurations qui donnent ce total par le nombre de configurations possibles, soit 36.

Imaginons qu'un dé est rouge et l'autre bleu. Un total de 12, ne s'obtient que d'une manière : les deux dés rouges et le dé bleu tombent sur 6. La probabilité d'obtenir 12 est donc $1/36$. En revanche, un total de 11 s'obtient de deux manières : la première est que le dé rouge indique 6 et le bleu 5 ; la seconde, que le dé rouge indique 5 et le bleu 6. La probabilité d'obtenir 11 est donc $2/36 = 1/18$.

Le grand mathématicien et philosophe Gottfried Leibniz (1646-1716) pensait que les probabilités de tirer 12 ou 11 étaient égales, car il ne distinguait pas les dés. Il se fourvoyait. Tout d'abord l'expérience montre que le 11 sort deux fois plus souvent que le 12. En outre, si l'on ne distinguait pas les dés, la somme des probabilités de tous les totaux possibles serait inférieure à 1. Or, par définition, la probabilité d'obtenir un total entre 2 et 12 lorsque l'on lance deux dés est égale à 1. L'illustration à gauche indique les probabilités des divers totaux possibles, de 2 à 12.



1. LA PROBABILITÉ d'obtenir un total donné, avec deux dés, dépend du nombre de façons différentes de parvenir à ce total. Chaque fraction (à l'extrême gauche) est la probabilité d'obtenir le total de l'une quelconque des paires de dés représentées à droite sur la même ligne.

LE CRAPS

Le craps est un jeu où une perception naturelle de ces probabilités est cruciale. Dans ce jeu, qui date des années 1840, le lanceur parie une somme d'argent contre d'autres joueurs. À la lancée, il jette les deux dés. Avec un résultat de 7 ou de 11 au premier jet, il gagne ; avec 2, 3 ou 12 («craps»), il perd. Un résultat de 4, 5, 6, 8, 9 ou 10 devient son «point». Dans ces derniers cas, il doit alors relancer les dés jusqu'à ce qu'il obtienne à nouveau son «point», mais sans faire 7 (le «craps sortant»). S'il réussit, il gagne tout l'argent, sinon il le perd.

À l'aide de ces règles du jeu, on calcule que les chances de gain du lanceur sont égales à 244/495 (49,3 pour cent), légèrement défavorables. De quelle manière les joueurs professionnels tournent-ils ce léger désavantage à leur profit ? En acceptant ou en rejetant divers «paris additionnels» avec des joueurs. Une autre manière est de tricher, usant de leur dextérité manuelle pour introduire des dés pipés.

Les dés peuvent être truqués de nombreuses façons. Lorsque leurs coins sont rognés ou lorsqu'ils sont «plombés», certains lancers sont plus probables que d'autres. Pis encore, les dés standards peuvent être remplacés par des dés ne portant que trois nombres distincts de points, les faces opposées en ayant le même nombre. La figure 3 en montre un exemple avec seulement des faces 1, 3 et 5. Comme chaque joueur voit au plus trois faces du dé en même temps, et que deux faces adjacentes n'ont jamais le même nombre de points, tout peut sembler normal au cours du jeu. Notons cependant que l'arrangement autour des sommets ne saurait être dans l'ordre standard partout. Si l'ordre 1-3-5 est dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'un sommet, il sera dans le sens contraire autour d'un sommet adjacent.

Comment les tricheurs utilisent-ils ces dés ? Une paire de dés 1-3-5, par exemple, ne totalise jamais 7, de sorte qu'à ce jeu, un joueur n'obtient jamais le «craps sortant» éliminatoire à la lancée. La raison d'un dé 1-3-5 et d'un dé 2-4-6, on n'obtient jamais de total pair 2, 4, 6, 8, 10 ou 12. Ces dés ne doivent être utilisés qu'exceptionnellement et on ne veut pas qu'ils soient détectés : même les joueurs les plus habiles insistent pour s'assurer de ne tirer que des totaux pairs.

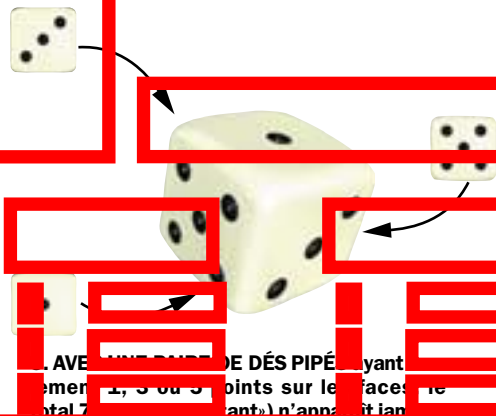
LA MAGIE DES DÉS

Nombre de tours de passe-passe ou de prestidigitation utilisent les dés et beaucoup s'appuient sur le fait que les faces

opposées ont pour somme 7. Un tour est décrit par Martin Gardner dans son livre *Maths Festival* (Éditions Pour la Science, 1981). Le magicien tourne le dos et demande à une personne de l'assistance de jeter trois dés standards, puis d'additionner les nombres tirés. Ensuite, la personne doit choisir l'un quelconque des dés et ajouter le nombre de sa face cachée au total. Enfin, elle relance ce même dé et ajoute le nombre tiré au précédent total, sans dévoiler aucun de ces totaux. Alors le magicien se retourne et indique immédiatement le dernier total obtenu. Il voit les dés, mais ne sait pas quel dé a été relancé.

Comment est-ce possible ? Supposons que le premier jet ait donné a, b, c et que le dé choisi porte a . Le total initial est $a + b + c$. En relance le dé, ce qui donne $a + c$. Le dé est alors relancé, donnant d , et le résultat final est donc $b + c + d + 1$. Or le magicien lit b, c et d sur les dés, lui suffit donc de les ajouter entre eux et à 7.

Henry Ernest Dudeney inclut un artifice différent dans son ouvrage *Amusements in Mathematics* (Dover Publications, 1958). Ici encore, le magicien, dos tourné, demande de lancer trois dés. Cette fois, le volontaire double la valeur d'un premier dé et ajoute 5, puis il multiplie le total par 5 et ajoute la valeur d'un second dé, puis multiplie le résultat par 10 et, enfin,



A	3	4	8
B			
1	A	A	A
5	B	B	A
9	B	B	B

A	1	5	9
B			
2	C	B	B
6	C	C	C
10	C	C	C

A	2	6	7
B			
3	A	C	C
4	A	C	C
8	A	A	A

4. LES DÉS NON STANDARD. Les faces 1, 2 et 3, ont la propriété particulière suivante : en moyenne, B bat A et C bat B mais A bat C . Le dé A est marqué 3 3 4 4 8 8, le dé B , 1 1 5 5 9 9 et le dé C , 2 2 6 6 7 7. Le tableau montre les tirages possibles lorsque deux quelconques de ces étranges dés sont opposés.

Réactions

Lesac a courriel concernant mon article «Le jeu de Juniper Green» (voir *Pour la Science*, juillet 1997) fut à ce point volumineux que «Réactions» lui rendra encore moins justice qu'à l'accoutumée. D'abord, mes excuses pour plusieurs erreurs. La plus grave étant ma référence à «Richard Porteous» comme inventeur du jeu : ce n'est pas Richard, mais Rob. Marc Loveday, de Fruita, Colorado, fait remarquer que le coup 18 de *Juniper Green* est un jeu que l'on peut choisir 18 au lieu de 2. Beaucoup de lecteurs, dont Arlin Anderson, de Madison, Alabama, et William G. Hays, de Vashon Island, Washington, ont corrigé mes statuts de JG-1 (jeu à une carte), ce qui est secondaire, car Alice ne peut jouer du tout. A. Anderson me corrige aussi sur JG-9, qui est secondaire.

R. Porteous m'a envoyée une analyse de JG-100 effectuée par Peter Conlon, Monique Barendse et Laurie

Fischer, trois de ses élèves actuels. Ils montrent en particulier l'existence de stratégies gagnantes si vous commencez par 58. Le professeur Robert Hays, de Clearwater, Floride, est arrivé à la même conclusion. Il note que les nombres premiers jouent un rôle dans tous les aspects du jeu et les répartit en quatre types : grands (53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97), assez grands (37, 41, 43, 47), moyens (29, 31) et petits (2, 3, 5). Les ouvertures gagnantes sont les doubles des moyens.

Paul Blitz, de Van Nuys, Californie, rappelle que le jeu *Juniper Green* a été donné à Princeton par Eugene Wigner à la fin des années 1930. Un critère de jeu gagnant dans tous les cas y figurait. L'existence d'une stratégie gagnante à JG- n dépend de la parité des exposants des facteurs premiers de la factorisation de $n!$ (avec $n! =$ factorielle de $n = n \times (n-1) \times (n-2) \times \dots \times 3 \times 2 \times 1$).

ajoute la valeur du troisième dé. On indique le total au magicien qui, immédiatement, donne les trois valeurs initiales des dés. En effet, le résultat est $10(5(2a + 5) + b) + c$, soit $100a + 10b + c + 250$. Retirant alors 250, les trois chiffres du résultat sont les nombres a, b, c cherchés.

D'autres problèmes de dés amènent des dés moins standards. Par exemple, supposez-vous marquer les faces de deux dés en n'utilisant que les nombres 0, 1, 2, 3, 4, 5 ou 6, pour obtenir une paire telle que tous les totaux de 1 à 12 soient équiprobables? (La réponse est indiquée en fin d'article).

LES DÉS NON TRANSITIFS

Le phénomène relatif aux dés le plus contraire à l'intuition est sans doute celui des «dés non transitifs». Numérotez trois cubes A, B, C ainsi :

$A : 3\ 3\ 4\ 4\ 8\ 8$

$B : 1\ 1\ 5\ 5\ 9\ 9$

$C : 2\ 2\ 6\ 6\ 7\ 7$

Si un joueur prend le dé B et un autre le dé A et qu'ils jouent un long moment, vous constaterez qu'en moyenne, le dé B bat le dé A . En fait, B présente un nombre supérieur à A , avec la probabilité $5/9$. De même, C bat B avec la même probabilité. Par suite, il semblerait que C batte A , non? Eh bien non! A bat C , avec la probabilité $5/9$. Le tableau de la page précédente (voir la figure 4) justifie clairement ces assertions. Vous pouvez faire fortune avec un ensemble de trois tels dés! Vous laissez votre adversaire choisir son dé, puis vous sélectionnez le dé qui le bat (à long terme, avec une probabilité supérieure à 0,5). Vous gagnerez 55,55 pour cent des jeux alors que votre adversaire a le libre choix du «meilleur» dé!

Une mise en garde cependant : ne vous fondez pas à l'excès sur la théorie des probabilités sans avoir rigoureusement précisé les règles du jeu. Dans son merveilleux petit livre *Au hasard* (Seuil, 1991), Ivar Ekeland raconte l'histoire de deux rois nordiques qui jouèrent aux dés le sort d'une île convoitée. Le roi suédois lança deux dés et obtint un double six : «Cela, fanfaronna-t-il, est imbattable!». Mais le roi de Norvège marmonna qu'il pourrait lui aussi faire un double six et lança ses deux dés. L'un donna 6 et l'autre se fendit en deux parties, apportant l'un un 1 et l'autre un 6. Total : 13! Ce qui tend à prouver que ce que vous pensez possible dépend de la manière dont vous modélisez le problème.

RÉPONSE : Pour rendre tous les totaux de 1 à 12 équiprobables, il suffit qu'un dé porte : 1, 2, 3, 4, 5, 6 et l'autre 0, 0, 0, 6, 6 et 6.

Marcher sur l'eau

CAROLINE LOUBET

De la semoule modifie l'écoulement de l'eau.

Certains matériaux ne sont ni liquides ni solides, mais un peu des deux à la fois. Pour les explorer, je vous propose quelques expériences avec de la farine de maïs (couramment vendue dans les épiceries ou dans les grandes surfaces sous le nom de *Maïzena*).

Prenez en un peu et mélangez-la avec de l'eau pour faire une sauce épaisse. On ne peut dire, en observant le mélange immobile, s'il est solide ou liquide. Si l'on donne un coup de poing à la surface, on se heurte à un solide : rien ne bouge, et la main reste sèche. En revanche, si nous penchons lentement le récipient d'un côté, le mélange coule comme un liquide. Seul le temps de réaction que l'on a laissé au mélange à changer, entre les deux manipulations : court dans la première expérience, long dans la seconde.

Chaque matière possède son propre temps de réaction à une contrainte extérieure ; si nous imposons rapidement une contrainte pendant un temps inférieur au temps de réaction de la matière, les molécules ou les agrégats moléculaires

n'ont pas le temps de réagir, et le matériau a un comportement de solide. Inversement, si la contrainte est appliquée en un temps supérieur à ce temps de réaction, le matériau réagit et la matière s'adapte.

On retrouve cette ambiguïté de la matière dans les cathédrales : les vitraux anciens sont souvent plus épais à la base qu'au sommet, parce que la pesanteur agit sur eux depuis des siècles ; le verre, qui paraît solide à notre échelle, ne cesse de couler comme un liquide, mais très lentement. De même, les câbles des ponts suspendus doivent être retendus périodiquement parce qu'ils s'allongent lentement. Passons à encore plus grandiose : le Globe terrestre. Est-il vraiment solide ?

Les remarques précédentes nous rappellent que l'échelle d'observation détermine la réponse à la question. Les montagnes sont immobiles, à l'échelle de la vie humaine, mais elles se sont formées, et elles se forment encore, par plissements de terrain. Les continents, eux, se déplacent les uns par rapport aux autres à la vitesse d'un ongle qui croît, soit quelques centimètres par an. Les

solides seraient-ils ainsi des liquides auxquels on ne donnerait pas le temps de couler ? Voilà qui confirmerait l'idée d'Héraclite, pour qui « tout coule ».

Les mécanismes de fluage des roches sont toutefois différents de ceux qui rendent solides les mélanges d'eau et de farine de maïs. Dans ce dernier cas, le comportement est plutôt analogue à celui du sable mouillé. Quand on appuie doucement sur un tel sable, la pression se transmet en partie par le sable, dont les grains supportent les uns sur les autres, et en partie par le liquide, dans les interstices. Quand la pression est plus forte, le volume total augmente, parce que les grains commencent à se séparer pour bouger (sans contrainte, le sable est compact, parce que les grains sont imbriqués). L'augmentation de volume aspire l'eau alentour. La réaction du système est limitée par l'écoulement du fluide : quand on marche sur une plage, le pourtour du pied s'assèche lentement, parce que la migration de l'eau dans les interstices, sous le pied, n'est pas immédiate.

Ainsi, quel qu'un qui marcherait lentement sur du sable mouvant s'enfoncerait, parce que les grains auraient le temps de se réorganiser au poser du pied, mais que le retrait, qui est plus rapide, serait impossible : le liquide n'aurait pas le temps de migrer pour s'adapter aux déformations globales du sable. Ce type de comportement des liquides « dilatants » est caractéristique de suspensions très concentrées, telle celle de la farine de maïs dans l'eau.

Voici enfin quelques expériences pour poursuivre vos explorations rhéologiques : dans un saladier, mélangez un paquet de 350 grammes de *Maïzena* (attention à choisir de la farine sans adjuvants) et 0,35 litre d'eau, afin d'obtenir un demi-litre de matière.

Plongez-y un doigt, doucement d'abord, puis rapidement enfoncer.

Puis amusez-vous à en faire une boule, en ne cessant pas de malaxer la matière ou de faire sauter la boule dans la main. Si vous cessez d'agiter la boule, vous la voyez couler.

Pour apprécier la dureté du mélange, cassez-le en prenant rapidement un morceau que vous soulevez comme une plaque.

Enfin, si vous voulez reproduire un exploit du Nouveau Testament, faites une quantité supérieure de mélange et remplissez un grand bac : vous pourrez alors courir à la surface sans vous enfoncer.



Des enfants ont couru sur de l'eau additionnée de farine de maïs, pour les caméras d'Archimède, le magazine scientifique d'Arte : ils ne s'y enfonçaient pas.

Caroline LOUBET est coordinatrice de l'Association des ateliers des Petits Débrouillards en Île-de-France.

Les hologrammes

Un hologramme est l'enregistrement sur un film à grain très fin d'une image optique tridimensionnelle réalisée à l'aide d'un faisceau laser. Contrairement à la photographie, qui enregistre uniquement l'intensité d'une onde lumineuse réfléchie par un objet (ce qui produit des zones claires et sombres sur un film), un hologramme enregistre à la fois l'intensité et la direction, ou phase, de la lumière. L'information sur l'intensité et la direction est contenue dans la figure d'interférence entre l'onde réfléchie par l'objet et une

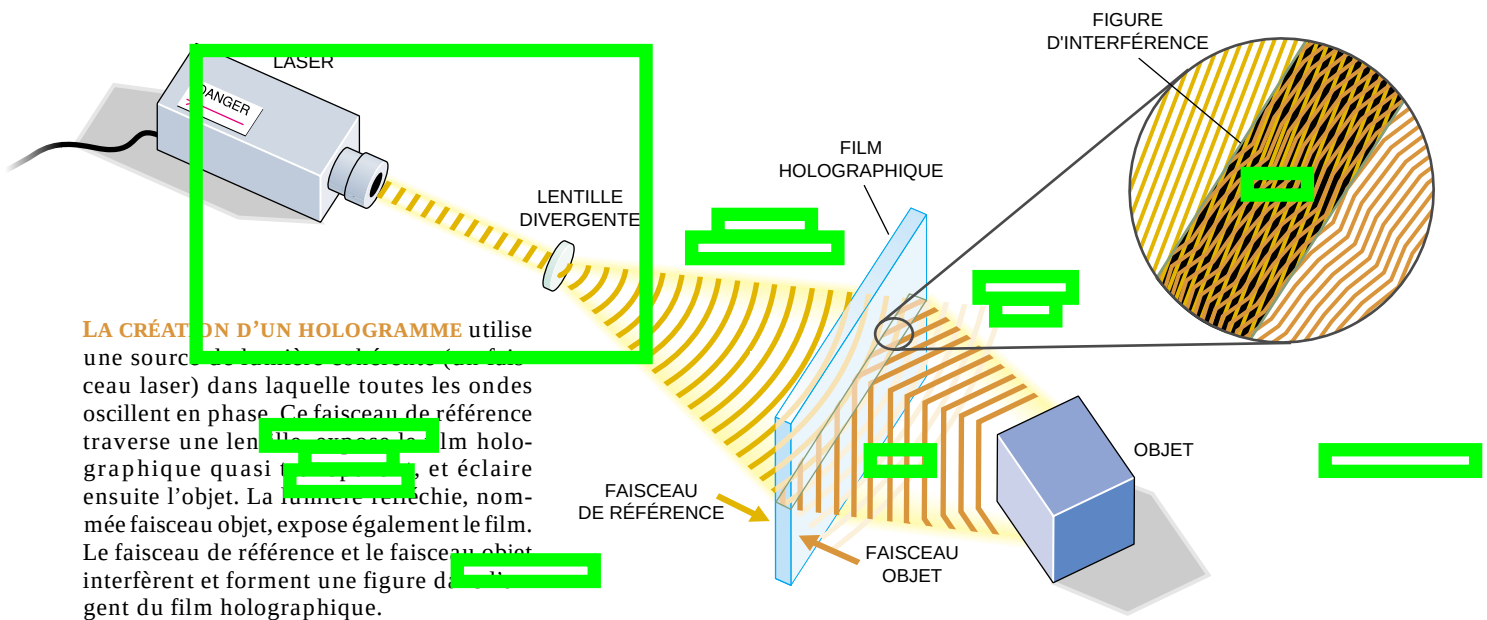
onde de référence. Les deux ondes qui interfèrent créent sur le film des zones brillantes, quand elles sont en phase, et des zones sombres, quand elles sont en opposition de phase.

Après l'enregistrement, lorsqu'on éclaire le film holographique développé avec de la lumière blanche, la figure d'interférence agit comme une multitude de minuscules miroirs placés à des myriades d'angles. Ces miroirs réfléchissent la lumière à la surface de l'hologramme, exactement dans la même direction que celle réfléchie par l'objet

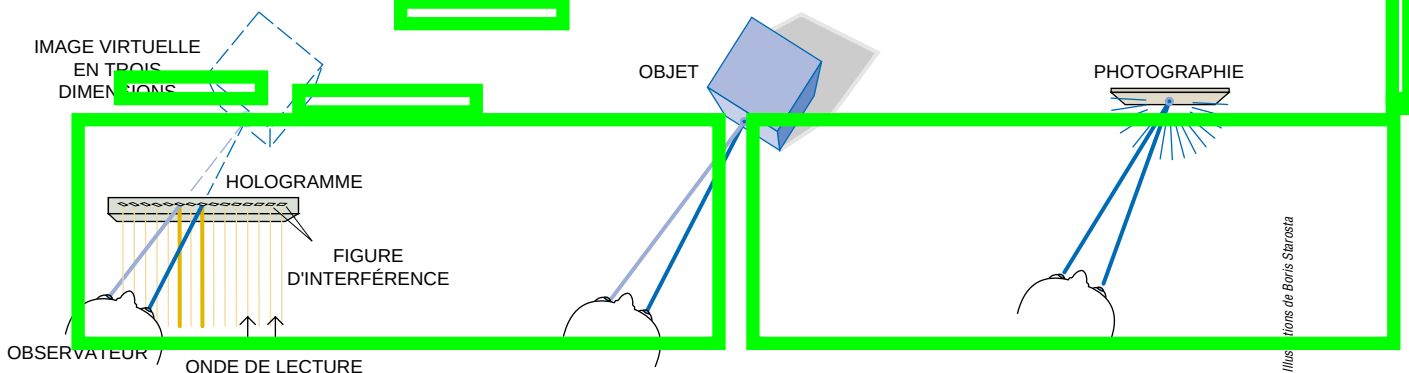
initial. Chaque œil à un angle de vue différent voit donc l'intensité des ondes réfléchies varier selon leur direction ; ainsi, l'observateur voit en relief.

Un unique hologramme équivaut à de nombreuses photographies classiques, chacune prise d'une direction différente et mise au point à différentes profondeurs de champ.

Stephen BENTON, Groupe d'imagerie spatiale du Laboratoire des média, Institut de technologie du Massachusetts

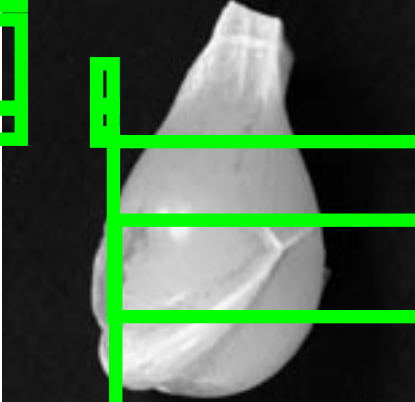


LA CRÉATION D'UN HOLOGRAMME utilise une source de lumière cohérente (un faisceau laser) dans laquelle toutes les ondes oscillent en phase. Ce faisceau de référence traverse une lentille divergente et éclaire ensuite l'objet. La lumière réfléchie, nommée faisceau objet, expose également le film. Le faisceau de référence et le faisceau objet interfèrent et forment une figure d'interférence sur le film holographique.



LA LECTURE D'UN HOLOGRAMME requiert un éclairage sur le film qui provient de la même direction que le faisceau de référence. La figure d'interférence sur le film d'argent diffracte et réfléchit la lumière de façon à recréer l'orientation et l'intensité de l'onde lumineuse du faisceau objet original. Pour un même point de l'objet, chaque œil voit la lumière arriver d'un point différent de la figure d'interférence (à gauche). En répétant cette opération pour chaque point de l'objet, l'observateur voit une

image virtuelle en trois dimensions flotter derrière l'hologramme. L'hologramme imite la manière dont on perçoit un objet réel : la nature de la lumière réfléchie varie avec l'angle de vue. Cette variation est indiquée par la différence de couleur entre les rayons atteignant chaque œil pour l'hologramme et l'observation de l'objet réel (à gauche et au centre). À l'inverse, une photographie en deux dimensions réfléchit la même intensité de lumière dans toutes les directions (à droite).



Fractures

H. VAN DAMME • F. DUVAL • Y. ABDELHAYE

On fracture des gels pour étudier la fracturation de la roche.

L'industrie pétrolière se préoccupe des fracturations : afin de mieux récupérer les combustibles fossiles piégés dans les roches, elle injecte de l'eau sous pression et espère une dilatation des interstices créés par les fracturations. La dilatation qui facilitera la circulation du pétrole vers les stations de pompage.

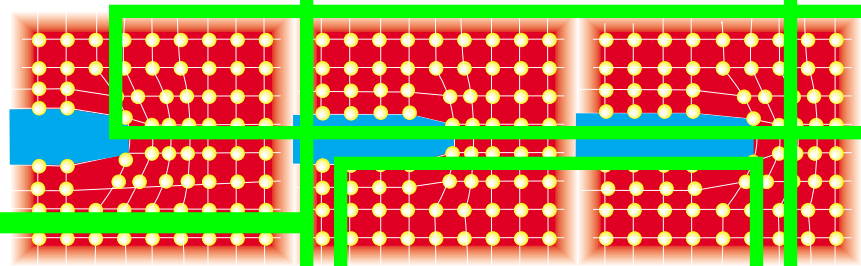
Comment la roche se fissure-t-elle ? La rupture s'amorce au point d'injection du liquide quand la pression du liquide est supérieure à la limite de rupture de la roche. La fissure est un plan vertical, parce que c'est dans cette direction que l'ouverture de la fissure est le moins contrecarée par le poids des couches supérieures qui la refermeraient.

Une fois créée, la fissure continue de se propager presque sans consommation d'énergie, parce que de l'énergie est récupérée lors de son ouverture. En effet, le liquide qui ouvre une fissure déforme d'abord le matériau, ce qui dépense de l'énergie ; puis, au fond de la fissure, s'ouvre, la déformation de l'endroit initialement déformé, ce qui restitue l'énergie «élastique» : celle-ci déforme alors le matériau plus avant (voir la figure).

Pour modéliser ce phénomène, nous avons utilisé une argile de synthèse, la laponite, en suspension dans de l'eau : cette suspension forme un gel, qui simule la roche. Un tel gel réagit élastiquement quand on lui applique un effort modéré : quand on cesse de lui appliquer des forces de déformation, il reprend sa forme initiale. En revanche, quand les déformations sont excessives, le gel s'écoule. Nous y injectons une résine époxy, qui reproduit l'eau, et nous observons que la fracturation est différente selon les viscosités respectives de la résine et du gel.

Quand la résine est bien plus visqueuse que le gel, à la vitesse d'injection, elle forme une goutte (à gauche). Au contraire, quand la résine est peu visqueuse, le gel est fracturé. À faible vitesse d'injection (quelques millimètres par seconde), plusieurs plans de fractures apparaissent, et chaque plan de fracture se divise, au bout d'un certain parcours en plusieurs plans de fractures secondaires (voir la figure de la page ci-contre).

Ces expériences révèlent trois phénomènes. Le premier concerne le front d'invasion : stable sous la forme d'une goutte qui gonfle lorsque c'est le fluide le plus visqueux qui envahit l'autre (pensez à du miel qui coule dans de l'eau), il devient instable dans le cas inverse et le front devient irrégulier.



Un liquide qui comprime le fond d'une fissure déforme le matériau : de l'énergie mécanique est stockée. Quand les liaisons entre atomes lâchent, sous la contrainte appliquée, cette énergie de déformation est libérée et se propage, sous la forme d'une onde de pression (non représentée ici) le long des flancs de la fissure. La pression se reporte ensuite au fond de la fissure, qui poursuit sa propagation.

D'autre part, bien que les gels de laponite soient bien moins rigides que des métaux ou que des roches, le fluide injecté peut les fracturer, parce que, comme dans les solides tels les roches, l'énergie élastique est restituée lorsqu'une fissure s'ouvre et se propage. Ce type de propagation était inattendu dans le cas des gels.

Enfin, le troisième phénomène est le plus étonnant : c'est la très grande instabilité de la fracture, quand sa vitesse augmente. Dans les métaux ou dans les roches, la théorie de la mécanique des milieux continus prévoit un changement de direction des contraintes en pointe de fissure, lorsque la vitesse de la pointe atteint environ la moitié

de la vitesse du son dans le matériau : le son, en effet, est la propagation de la pression, et sa vitesse est la vitesse maximale de propagation des variations de pression dans le matériau. Comme une fissure qui s'ouvre s'accompagne de variations de pression (des compressions, puis des détenteurs ; lors de la rupture) ; comme ces variations de pression ne peuvent se déplacer à une vitesse supérieure à la vitesse du son, et comme le liquide est injecté de force dans le matériau, la fissure est bloquée, et elle se poursuit alors latéralement, dans des directions où elle ne se propageait pas encore à la vitesse du son. C'est l'explication de ces plans de fractures inclinés par rapport au plan de fracture initial, vertical. À leur tour, ces plans de fractures secondaires peuvent se diviser en plans du troisième

ordre, et ainsi de suite : ainsi se forme la structure divisée que l'on voit sur la photographie.

Dans une roche ou dans un métal, la vitesse du son est très élevée (environ 1 000 mètres par seconde), de sorte que le phénomène de déviation de fissures est rare. Dans un

gel, toutefois, la vitesse des ondes n'est que de quelques centimètres ou décimètres par seconde : on atteint bien plus facilement les régimes d'instabilité de fractures.

Des phénomènes d'instabilité des fractures se produisent-ils à grande profondeur dans les roches ? C'est peut-être l'étude de matériaux mous, en laboratoire, qui le dira.

Henri VAN DAMME est directeur du Centre de recherche sur la matière divisée du CNRS et de l'Université d'Orléans. **Franck DUVAL** et **Yehdid ABDELHAYE** sont chercheurs dans ce centre.



Géologie

Volcans

Bernhard Edmaier et Angelika Jung-Hüttl. Éditions Nathan, 1997.

Ce beau livre rassemble de superbes photographies de volcans qui soulignent leurs relations avec les hommes et les éléments naturels : eau, glace, végétation. On peut y admirer des volcans dans tous les environnements : sommets montagneux, vallées encaissées, désert, savane, steppe, glacier. On nous montre différents édifices et structures volcaniques, dont certaines sont spectaculaires, comme ces gigantesques tunnels naturels formés par une coulée de lave qui se refroidit au contact de l'air et laisse une carapace solidifiée. On comprend que les volcans créent leurs propres paysages et qu'ils sont sources de richesses pour l'homme. La beauté des paysages volcaniques et le ballet des couleurs dues aux éruptions sont illustrés intelligemment. Le texte est agréable et les quelques paragraphes techniques sont illustrés par des schémas clairs. Ce livre est dans la lignée «classique» de Haroun Tazieff, de Katia et Maurice Krafft. Il ne renouvelle pas le genre, mais se distingue par la grande qualité artistique de ses photographies.

Toutefois, il présente les volcans tels qu'un explorateur isolé peut les voir. Cette vision limitée ne correspond pas à la volcanologie telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui. Les volcanologues actuels sont plus intéressés par les dépôts d'éruptions anciennes qu'à courir aux quatre coins du monde chaque fois qu'un volcan se réveille. Le nombre de dépôts disponibles est bien plus grand que celui des éruptions qu'ils peuvent espérer observer de leur vivant.

Les recherches volcanologiques nécessitent des moyens importants et mettent en jeu les parties cachées du système volcanique : la plomberie interne, qui canalise le magma jusqu'à la surface ; le réservoir qui est comme une usine chimique où le magma cristallise ; la source profonde de magma qui alimente le réservoir, puis se renouvelle régulièrement. La volcanologie, c'est aussi l'analyse des principes physiques qui régissent les différents régimes éruptifs et la quantification des phénomènes.

La fascination naturelle que nous éprouvons pour les volcans n'interdit pas de montrer qu'ils obéissent à des lois simples et en nombre limité. Observer et décrire les phénomènes ne suffit

plus ; il faut illustrer les principes physiques et essayer de montrer comment les volcans fonctionnent. Une éruption, qui est le résultat ponctuel d'une longue série de processus, ne se comprend que si on la replace dans l'histoire du volcan, c'est-à-dire si on détermine à quel stade de son évolution elle se déclenche. Un volcan naît et finit par mourir, et l'on ne peut le comprendre que si on l'imagine en train de changer. On doit le représenter à la bonne échelle, aussi bien dans le temps que dans l'espace. L'ensemble forme un «objet» que constitue une photographie restituée en image partielle et instantanée. Il reste ensuite à interpréter l'image, à gommer les aspects accessoires et à faire ressortir les traits significatifs. Pour voir le volcan dans son ensemble, on doit se placer à la bonne distance et dans la perspective adéquate. Je me limiterai à deux exemples.

Sur l'île d'Hawaii, au beau milieu de l'océan Pacifique, le volcan Kilauea est alimenté en magma par un conduit plus ou moins vertical, situé au droit de la caldeira qui marque son sommet. Le magma peut sortir directement par le sommet, mais aussi par des fissures s'ouvrant sur les flancs du volcan à plusieurs dizaines de kilomètres. Le magma suit donc parfois un cheminement souterrain quasi horizontal qui se révèle à la surface par de multiples lézardes «en échelon». Seule une photographie prise d'avion dans l'axe du «rift» peut illustrer ce fantastique réseau de conduites internes.

Un autre exemple est celui des éruptions pyréennes, comme celle qu'a connue le Vésuve en 79 de notre ère. Ces éruptions se développent dans l'atmosphère en un jet, puis en un panache convectif, jusqu'à des altitudes de plus de 30 kilomètres. À de telles altitudes, les cendres et les aérosols volcaniques sont pris par les vents stratosphériques et sont transportés sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Montrer un tel panache n'est possible que grâce à un satellite en orbite.

Quel serait le livre «idéal» que voudrait feuilleter un volcanologue ? Ce dernier devrait voir l'île d'Hawaii sortir du Pacifique et s'élever jusqu'à plus de 4 000 mètres d'altitude, de suivre les étapes principales de ses quelques centaines de milliers d'années d'histoire. Examiner les gigantesques cicatrices qui parcourent ses flancs, sous la mer, et témoignent de monstrueux glissements de terrain. Voir ses fissures et ses cratères se multiplier à la surface. Assister aux grandes catastrophes qui ont laissé les grandes caldeiras du sommet. Suivre le magma, de sa source, à des profondeurs de plusieurs dizaines de kilomètres, jusqu'au réservoir, puis jusqu'à la surface. Voir,

sous la surface, le magma hésiter entre la verticale et un long cheminement horizontal. Observer les métamorphoses successives du magma lors de son ascension, l'apparition de bulles de gaz lorsque le seuil de solubilité des composés volatils est atteint, la formation d'une mousse volcanique, enfin la fragmentation qui pulvérise le magma et libère la phase gazeuse. Tout cela est possible, mais pas sur un seul volcan ni pendant une éruption. C'est un puzzle que l'on peine à recoller à partir de pièces que l'on recueille en différents endroits du Globe, où l'érosion et le hasard géologique les ont préservés, d'abord, puis mis au jour. La volcanologie apprend à lire les roches et à rassembler ces informations éparpillées. C'est un travail éternel, d'un nouveau genre. Des structures volcaniques fossiles, figées depuis des millions d'années, peuvent se révéler tout aussi spectaculaires qu'une fontaine de lave incandescente quand on en comprend la signification.

Claude JAUPART

Physique

Granites et fumées

Étienne Guyon et Jean-Pierre Hulin. Éditions Odile Jacob, 1997.

Il est aisé de définir un milieu pur, de l'eau, l'huile ou un cristal de quartz, de mica, il est beaucoup plus complexe de décrire précisément une émulsion ou un granite, dont l'hétérogénéité varie selon la taille de l'échantillon observé. En effet, la mayonnaise est un produit, apparemment homogène, dont le goût et la consistance diffèrent de ceux des éléments constitutifs que sont l'œuf ou l'huile. Le mélange de ces deux derniers ingrédients n'est qu'apparent. À l'échelle microscopique, on observe d'immenses gouttes d'huile séparées par de minces interfaces. La composition hétérogène de la mayonnaise réapparaît, à l'échelle humaine, quand on chauffe : c'est la preuve que des phénomènes de ségrégation et de mélange sont régis par les mêmes lois, notamment pour ces objets fragiles, décrits avec passion par Pierre Gilles de Gennes.

Étienne Guyon et Jean-Pierre Hulin nous montrent, dans leur livre *Granites et fumées*, sous-titré «Un peu d'ordre dans le mélange», que le mélange est omniprésent et que sa maîtrise est particulièrement recherchée, pour sa propriété

magique de faire naître de nouveaux produits (au sens large du terme).

Les auteurs commencent leur étude du mélange par des notions philosophiques, en ouvrant le débat aux sciences humaines. Si le mélange a été longtemps opposé à la pureté, et continue de l'être dans de nombreuses cultures, la notion de mélange a permis de remplacer la dualité entre le pur et l'impur par la notion de pluralité, avec une variation continue d'états de mélange. Mêlant les descriptions scientifiques et sociologiques, les auteurs décrivent les phénomènes d'instabilité et de turbulence comme une succession de choix au hasard, de bifurcations qui écartent ou rapprochent irrémédiablement deux particules ou deux individus au cours de leurs rencontres tout aussi riches en réactions et créations de nouveaux ensembles (familles, entreprises...).

De toute évidence, É. Guyon et J.-P. Hulin ont une réflexion qui dépasse le cadre scientifique et qui devrait intéresser sociologues, philosophes (parfois en quête d'analogies scientifiques) et simples curieux. Ses quelques pédagogues se retrouvent dans les titres suggestifs des dix chapitres : Les nombreuses facettes du mélange, La longue histoire du mélange, Mélange et marche au hasard, Le mélange figé, Mélanger sans fatiguer, Convection et mélange, Turbulence et mélange, Le mélange non miscible, Grains et mélange, Réaction chimique et combustion.

Le premier chapitre nous emmène dans un tourbillon de situations industrielles, culinaires ou de laboratoire qui nous guide dans le labyrinthe des chapitres suivants. Le tourbillon peut, en effet, tout à la fois, promouvoir le mélange, comme dans la turbulence, ou, au contraire, séparer un écoulement intérieur au tourbillon du reste du liquide. Le labyrinthe est l'image même d'un écoulement dans un milieu poreux ou d'une marche au hasard, qui peuvent, selon le cas, produire le mélange le plus efficace ou l'interdire.

Ce livre nous conte aussi des histoires, telles celles des mélangeurs industriels, qui démontrent l'importance de la réflexion, de la ruse de l'ingénieur face à ce problème apparemment simple. Ainsi, de la «diffusion moléculaire qui mélange tout», mais dans un temps infini, aux mélangeurs statiques composés de «nombreuses lames qui découpent et dévient l'écoulement comme dans un milieu poreux», en passant par le «mélangeur Kénics», formé d'une suite de lames en hélices décalées, qui étirent et replient l'écoulement et, en terminant par le mélangeur chaotique, «composé de tubes tournés de 90 degrés d'une section à l'autre» (voir la figure), le lecteur

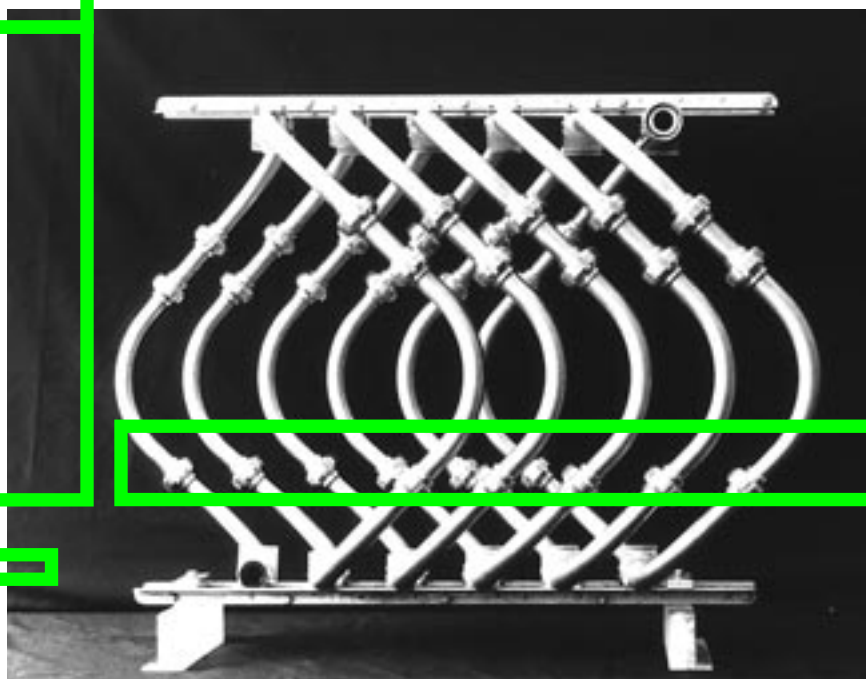
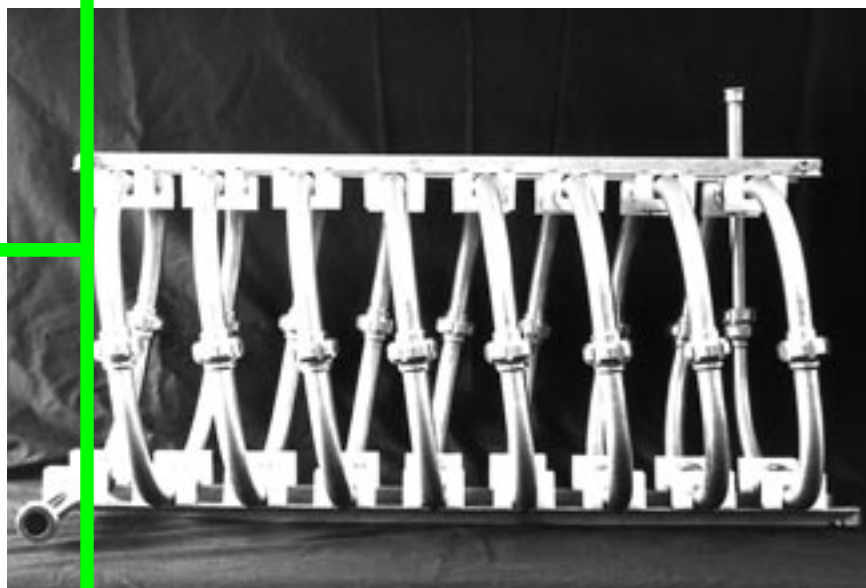
comprend le progrès apporté par les études fondamentales sur le chaos à des applications dont les résultats ne sont pas toujours intuitifs. L'efficacité de la configuration en alternance des coudes du mélangeur chaotique peut, en effet, être remarquable pour des fluides très visqueux et fragiles. La multitude d'exemples donnés par les auteurs, aux résultats parfois antagonistes, engendre une vision novatrice dans de nombreux domaines où le mélange et la ségrégation sont deux aspects d'un même ensemble de phénomènes.

Grâce à un effort d'illustration important et à une volonté de dépouiller l'ar-

gumentation de formules mathématiques, les auteurs permettent à un large public d'accéder aux recherches actuelles dans des domaines aussi variés que la diffusion moléculaire, la physique statistique, le chaos, la turbulence, le mélange de fluides non miscibles ou celui de grains solides et la chimie. Les outils mathématiques sont ainsi introduits à partir de la physique des phénomènes.

Ce livre constitue ainsi une lumineuse relecture de nombreux domaines de la physique moderne et une introduction efficace à ces domaines.

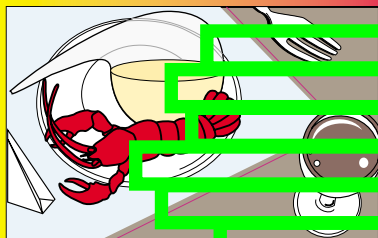
Hassan PEERHOSSAINI
et Pascal DUPONT



Deux systèmes mélangeurs : hélicoïdal (en haut) et chaotique (en bas). Après seulement dix coudes, deux liquides sont bien mélangés par le mélangeur chaotique, pas par le mélangeur hélicoïdal classique.

Illustrations de Hassan Peerhossaini

FRANCE INFO

et
POUR LA SCIENCEvous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile MonchicourtInfo
SciencesTous les jours
sur France Info
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 mars 1998.

FRANCE

info

Dictionnaire

Le Trésor, dictionnaire
des sciencesSous la direction de Michel Serres et
Nayla Farouki. Éditions Flammarion,
1997.

Les dictionnaires scientifiques sont à la mode : j'en ai compté trois nouveaux l'année dernière (à la rédaction desquels j'avoue avoir plus ou moins participé). À l'exemple d'un des plus célèbres, on sème désormais le savoir à tout vent. Le dernier d'entre eux vient de paraître, sous la direction de Michel Serres et de Nayla Farouki. En fait, il ne s'agit pas d'un simple dictionnaire des sciences, mais d'un Trésor, comme, en lettres dorées, nous en avertit la page de titre. La «quatrième de couverture» renchérit : «Ce dictionnaire des sciences est un trésor qui donne à chacun le privilège de comprendre la beauté du monde, il réunit la quintessence des idées de la science d'aujourd'hui, il rend accessible les notions les plus ardues, il suscite la curiosité et l'envie de savoir, il autorise l'appropriation de ce savoir.» Comment ne pas s'arrêter devant une devanture si brillamment illuminée ?

Il faut évidemment un monstreux toutet pour oser rendre compte en quelques lignes d'un ouvrage de plus de 1 000 pages, consciencieusement rédigé par une équipe de neuf collègues parmi les plus honorables et les plus reconnus, destinés à être dégustés à petites gorgées, au rythme des curiosités et des lacunes de tout un chacun. D'autant que «si de rares entrées furent rédigées par un spécialiste seul, l'immense majorité le fut par deux, trois, voire par tous les auteurs». Un critique isolé n'a donc droit qu'à un temps de parole limité : il l'utilisera avec la modestie qui convient.

Plongé au hasard dans quelques-uns des articles (anonymes) qui concernent la discipline qu'il connaît le moins mal, le chimiste que je suis en ressort rafraîchi et enrichi. Le souci du style, de l'image qui frappe et du point de vue original y est constamment présent. Un appel «à lire après ou avant», en tête de chaque article, permet de mieux le resituer dans un contexte général. Un spécialiste plus exigeant que moi notera toutefois qu'à l'article *cristaux liquides*, on ne parle pas de la découverte inattendue et importante des molécules mésomorphes en forme de disques.

À l'entrée *reconnaissance moléculaire*, il s'étonnera d'entendre affirmer que la «fabrication des circuits miniaturisés encore que l'électronique à l'échelle du nanomètre de la chimie supramoléculaire (la formulation sera sans doute plus d'actualité dans une prochaine édition).

Toutefois, les remarques mineures de ce genre, qu'on pourrait sans doute pouvoir multiplier, n'entament en rien la bonne impression que je retire de ce nouveau dictionnaire, pardon ! De ce Trésor.

Depuis Jean Le Rond d'Alembert et son discours préliminaire de l'*Encyclopédie*, en passant par Adolphe Wurtz et cet autre discours préliminaire du *Dictionnaire de chimie pure et appliquée*, sans oublier E. Littré et la préface de son *Dictionnaire de la langue française* etc., la tradition veut que les auteurs ou les responsables de ces grands inventaires des connaissances de leur temps ouvrent la marche en exposant leurs méthodes, leur philosophie et leurs ambitions. M. Serres répond présent à cet appel de l'histoire en nous offrant les xxxix pages d'une préface de son Trésor.

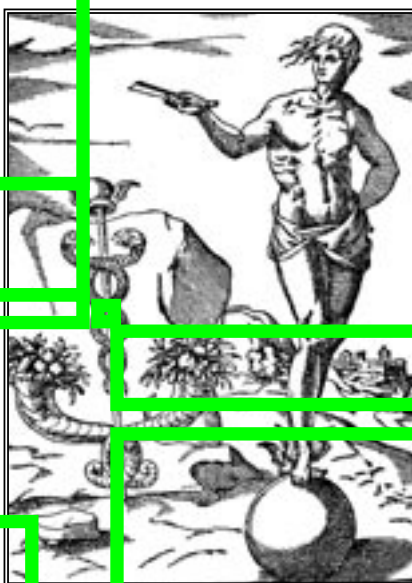
Oserais-je, pour citer le présentateur lui-même, relever que le bilan de ce gros ouvrage est «légèrement incliné» et qu'«une sorte de diagonale divise [...] secrètement [ses] pages, non pas tout à fait à l'axe droit que devrait tracer l'équilibre d'un bilan. D'un côté s'accumule le volume immense des notions assez stables reçues de siècles passés ou récentes renforcées par les critiques pertinentes que le temps y ajouta ; édifice puissant dont les fondations assurent encore notre raison et sans doute pour longtemps cet héritage a formé savants et non-savants parce qu'il se compose non seulement de résultats et de méthodes mais aussi d'une philosophie que nous avons reçue en même temps que nos langues et nos cultures, notre vision du monde et de la connaissance. De l'autre côté de la diagonale s'annoncent les inventions que notre génération produisit, fragiles parfois et destinées peut-être, à disparaître ou, au contraire, annonciatrices d'un temps si nouveau qu'il faudra en parler bientôt la colonne l'en face et qu'il devra redresser les perspectives de l'histoire des sciences pour assurer la compréhension du monde d'aujourd'hui et sa cohérence avec celui de naguère et jadis [etc., etc.].» Tout cela pour dire qu'on trouvera dans ce dictionnaire du «classique», du «moderne» et même du «postmoderne».

Suivent quatre chapitres, eux-mêmes divisés en 30 sous-chapitres,

qui visent à conférer à l'ensemble le mystérieux éclairage qui convient. Parmi leurs sous-titres, on citera, à titre d'exemple, *Abondance et rareté... Lire, ne pas lire ou lire autrement... Le vide élimine le paysage : l'Univers élimine le divers...* ou *Le singulier au singulier... L'ancienne et double vision du monde, pagus et pages...* Bref, à la lumière de cette préface-viatique, «pris par la main, le lecteur peut enfin comprendre les lignes de force de la pensée scientifique, aujourd'hui, enracinées qu'elles sont dans une histoire d'inné et de tâtonnements et de fulgurances». Une telle littérature ne se pastiche pas!

Rassurons-nous : les auteurs des articles de ce dictionnaire n'ont pas tous le même goût du langage éminent et futile.

Jean JACQUES



Mercurie debout sur le Globe terrestre. À côté du caducée qu'ont adopté comme insigne les professions de santé.

Pharmacie

Un pharmacien raconte

Paule Fougère. Éditions Buchet-Chastel, 1997.

Reconnaissons-le : nous sommes tous pharmacodépendants ! Quand nous sommes malades, nous guérissons (le plus souvent), mais presque toujours en ayant pris des médicaments. D'où une association qui crée une forme de conditionnement entre le médicament et la disparition de nos maux, le médecin ne dispose, en effet, que d'une arme, le médicament, et d'un rituel, la prescription ; ce qui fait du pharmacien son acolyte habituel. Or s'il existe une abondante littérature sur la médecine et les médecins, la pharmacie et les pharmaciens sont déshérités. Une absence qui serait chargée de sens ?

Ce que raconte ce pharmacien – une pharmacienne qui réserve le féminin à l'épouse du détenteur d'officine – vise à... remettre à ce déséquilibre. C'est un témoignage vivant, parfois même touchant, d'une lecture facile, sur une longue pratique d'officine et sur la bonne société des gens de lettres qu'elle a fréquentés à son tour, convaincu d'un continu mélange entre la substance réputée active (les enjeux et les étapes de la vie professionnelle) et l'excipient (la vie familiale et mondaine).

Hélas, bien peu d'humanisme authentique se dégage de ce mélange, pourtant nourri des bouleversements

des pratiques médicales, depuis les années 1940. Le discours est souvent convergent, qu'il s'agisse de la motivation initiale (le désir de combattre la mort), de l'estime limitée des connaissances à l'égard des préparateurs et des assistants, de la compassion restreinte pour les clients ou pour les réfugiés espagnols que, jeune étudiante, elle côtoie en 1933. On ne trouve pas non plus d'allusion à une quelconque concertation avec les médecins prescripteurs. Les pharmaciens ont du mal à sortir de «l'ombre de M. Homais»...

P. Fougère rappelle que c'est un même mot du grec ancien qui désigne à la fois le remède et le poison. En conséquence, elle détaille la dramatique histoire du Stélinon (92 décès), qui illustre bien cette dualité et qu'ont fait un peu oublier d'autres affaires moins anciennes, telles celle de la Thalidomide ou du Distilbène. Cependant elle utilise surtout cette relation d'un drame pour déplorer la tentative de remise en ordre de la profession qui s'en est suivie, dans les années 1960. Refus d'être payé à l'acte, comme les médecins, et volonté de maintenir la confusion entre profession libérale et commerciale, ainsi que le monopole de la parapharmacie. L'extension des «selfs» de cosmétiques et produits variés, qui ont transformé les pharmacies en bazars, ne semble pas lui poser de problème. On nous indique la part du fabricant, du grossiste, de la TVA dans le prix des médicaments, mais pas celle du détaillant... On saura pourtant qu'elle est soumise aux restrictions de la «marge lissée».

Une bonne place est faite à l'explosion de la psychopharmacologie et aux

«médicaments du bien-être», après le succès de la Chlorpromazine, dans les années 1950. En revanche, l'enthousiasme général pour les effets quasi miraculeux des antibiotiques ne semble pas avoir magiquement gagné la jeune pharmacienne de l'immédiat après-guerre, pas plus que les «splendeur et misères des cortisones». L'étrange voisinage entre drogues légales et illégales dans les officines les désignent pour des agressions répétées : l'auteur n'y a pas échappé, mais elle accuse d'abord «le laisser-aller qui succède aux guerres».

Notre te à l'égard de la pilule et de l'interruption volontaire de grossesse, elle accepte assez bien qu'on soit brusquement passé de la prohibition à la quasi-obligation des préservatifs, mais s'il faut les avoir parfumés... Au terme d'une vie professionnelle et personnelle réussie, insérée dans une vie familiale et bourgeoise accomplie, l'auteur garde une foi intacte en la médecine et en ses pratiques, jusqu'à un optimisme sans remise en cause dérangeant. Une lecture de détente genre «bonnes soirées».

Maurice PASDELOUP

Physique

Électrostatique et magnétostatique. Ampère, Coulomb, Maxwell et les autres

Michel Saint-Jean, Jean Matricon et Janine Bruneaux. Éditions Diderot Multimédia, 1997.

Un bon manuel de physique destinée aux premiers cycles universitaires, ainsi qu'aux préparations aux grandes écoles, doit répondre à deux exigences contradictoires. Tout d'abord, il doit, évidemment, commencer de la Physique, avec un grand «P». C'est-à-dire qu'il doit être pragmatique, fonder ses raisonnements sur le réel, laisser une part importante à l'expérimentation, montrer le cheminement des idées sans cacher les aspects intuitifs, etc.

D'autre part, il doit satisfaire sa clientèle, surtout constituée d'étudiants dont le but essentiel est de réussir leurs examens ou leurs concours. Ceux-ci, par souci d'efficacité, se tournent plutôt vers des manuels formels et emplis de calculs, car ils croient perdre leur temps

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Alleman, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiolliez. Diffusion et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Leconte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Antoine Andremont, Paloma Cabeza-Orcel, Elisabeth Crawford, Béatrice Debû, Paul Decaix, Philippe Ferrando, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Philippe Lecoq, Olivier, Guy Paulus, B. Perrin, J.-P. Reverseau.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Lawler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Frances Newburg, John Moeling, Anthony Degutis.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.
Télex : LIBELN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémion : 01 55 42 84 04.

SERVICE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 05.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence «pour la science» S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

avec ces discours qui leurs paraissent inutile. Bref, l'enseignement, en France, surtout à ce niveau, est encore victime de la classification de Magda Gerber, qui place les mathématiques au dessus de tout. Pour bien des étudiants, la physique apparaît comme une «sous-mathématique» une sorte d'application des mathématiques aux approximations douteuses. Cet état d'esprit est malheureusement encouragé par le système d'évaluation, qui favorise trop les raisonnements purement logiques et déductifs.

En France en année, on voit certains manuels de physique pour classes préparatoires devenir de plus en plus formels, de plus en plus abstraits, de plus en plus calculatoires. Certains livres de cours ressemblent même à des recueils d'exercices... dont les étudiants raffolent bien souvent. Du temps où j'étais en classe préparatoire, j'avais découvert un manuel de mécanique du point, petite merveille bourrée de remarques judicieuses et de raisonnements astucieux. Je l'ai retrouvé récemment chez un libraire, entièrement réécrit et considérablement enflé. De réédition en réédition, il a dû se conformer aux exigences du marché.

Comme bien des collègues, j'ai toujours été frappé par la différence d'esprit entre les manuels anglo-saxons, plus pragmatiques, et les documents français, plus formels. Malheureusement un étudiant qui préparerait un concours en ne se fondant que sur des manuels anglo-saxons aurait peu de chance de le réussir. Moi-même, en charge d'une préparation à l'agrégation de physique, je conseille aux étudiants de préparer leur concours en utilisant les livres français pour «bachoter» et de réserver les manuels anglo-saxons aux lectures vespérales, pour parfaire l'ouverture d'esprit.

Dans ce paysage, l'ouvrage de Michel Saint-Jean, Jean Matricon et Janine Bruneaux apparaît comme très original, notamment par la façon dont il résout le problème que je viens de présenter. Avec un corps du texte de facture «classique», il ressemble à bien d'autres ouvrages français, tout en restant assez sobre dans les développements mathématiques et en essayant de ne pas en rajouter du point de vue formel. En particulier, il évite toute présentation «exotique» qui pourrait

production, propriétés des milieux, pour déboucher en fin d'ouvrage sur les équations de Maxwell.

Je préfère nettement cette approche à celle qui consiste à poser comme des postulats les équations de Maxwell, puis à éliminer les termes de dérivée par rapport au temps pour traiter l'électrostatique et la magnétostatique. Dans une telle approche formelle, adoptée par certains manuels, les lois de l'induction apparaissent comme une conséquence des postulats (voire comme un exercice d'application) et perdent le caractère créateur qu'elles ont eu historiquement.

Plutôt que de s'encombrer d'un formalisme fastidieux, la consécration à la modernité se traduit par l'utilisation des moyens informatiques. En effet, l'ouvrage est vendu accompagné d'un logiciel sur CD-ROM destiné à tester, de façon interactive, les connaissances du lecteur. Il se présente ainsi comme un outil de travail pratique et efficace qui, j'en suis persuadé, séduira les étudiants et les aidera dans leurs études.

La préface ouverte de la «vraie physique» intervient à l'occasion d'encadrés historiques, ajoutés au corps du texte. Ce sont des bijoux. On y apprend comment l'apparence des grands concepts dut changer pour engendrer ces lois célèbres qui portent aujourd'hui leurs noms. Au-delà de l'anecdote, ces encadrés ont une vertu pédagogique : on découvre que même ces physiciens célèbres ont souvent douté et qu'ils ont eu des intuitions fausses avant d'arriver à mettre en place les concepts aujourd'hui enseignés.

Enfin, l'ouvrage est d'apparence agréable, et les figures sont nombreuses et claires. Des icônes, placées dans la marge indiquent les passages fondamentaux (principes, lois...), les phrases particulièrement importantes qui incitent le lecteur à une réflexion approfondie, ainsi que les fameux encadrés historiques dont je viens de parler.

Je souhaite du succès à cet ouvrage et à l'ensemble qui se présente comme le premier d'une série, et j'attends la parution des tomes suivants avec impatience, notamment pour y découvrir la suite des passionnantes aventures contées par Toth (Dieu égyptien du calcul de la science et des arts).

Rémi JULIEN

Les théories électrostatique et la magnétostatique sont fondées sur les lois de Coulomb et de Biot et Savart. Un cheminement progressif est ensuite adopté dans les deux cas : propriétés générales des champs, lois globales et locales, phénomènes de déplacement et d'in-

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de Pour la Science est donnée sur notre site Internet, à l'adresse :
<http://www.pourlascience.com>