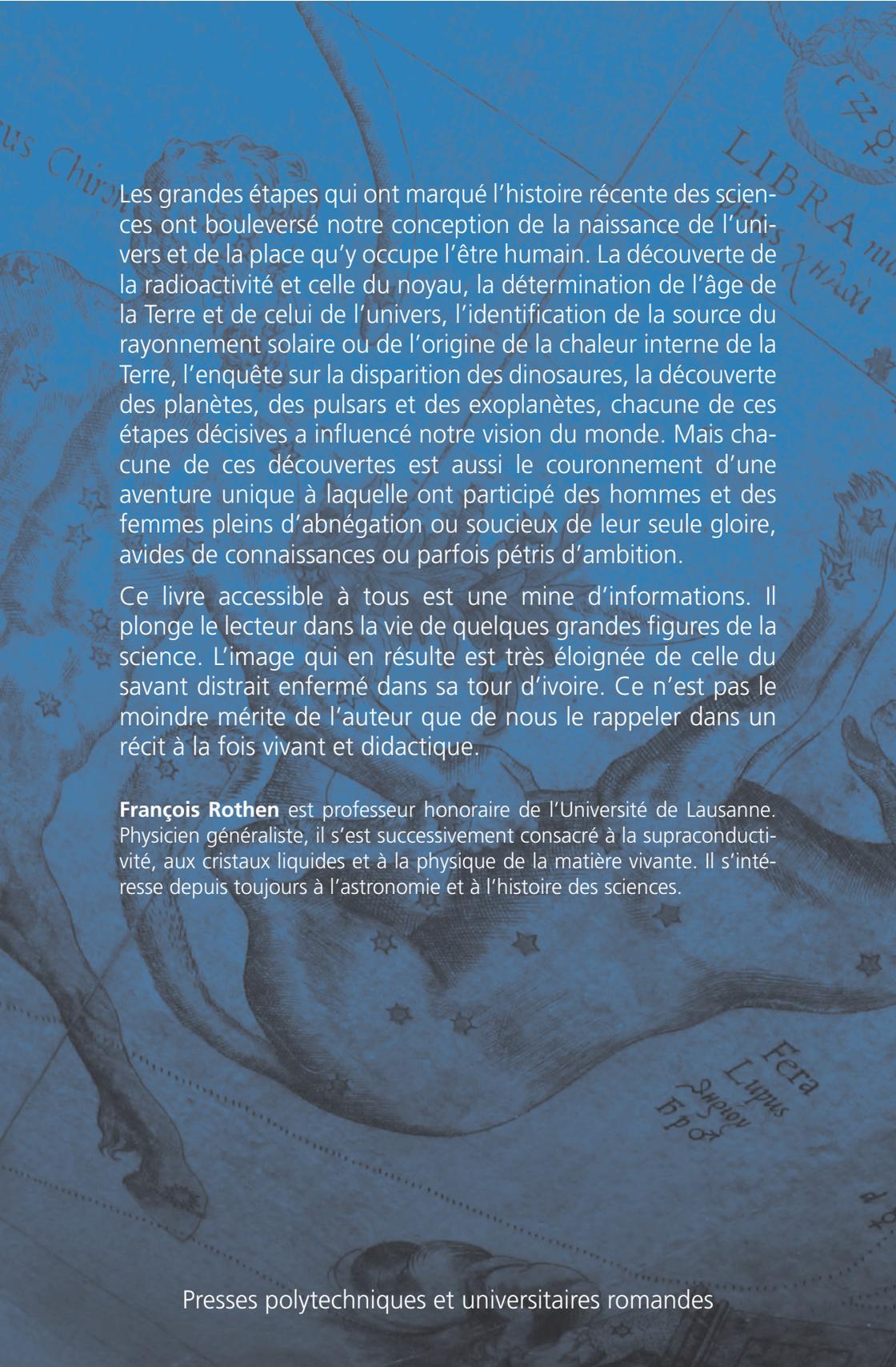


Et pourtant, elle tourne!

François Rothen



Les grandes étapes qui ont marqué l'histoire récente des sciences ont bouleversé notre conception de la naissance de l'univers et de la place qu'y occupe l'être humain. La découverte de la radioactivité et celle du noyau, la détermination de l'âge de la Terre et de celui de l'univers, l'identification de la source du rayonnement solaire ou de l'origine de la chaleur interne de la Terre, l'enquête sur la disparition des dinosaures, la découverte des planètes, des pulsars et des exoplanètes, chacune de ces étapes décisives a influencé notre vision du monde. Mais chacune de ces découvertes est aussi le couronnement d'une aventure unique à laquelle ont participé des hommes et des femmes pleins d'abnégation ou soucieux de leur seule gloire, avides de connaissances ou parfois pétris d'ambition.

Ce livre accessible à tous est une mine d'informations. Il plonge le lecteur dans la vie de quelques grandes figures de la science. L'image qui en résulte est très éloignée de celle du savant distrait enfermé dans sa tour d'ivoire. Ce n'est pas le moindre mérite de l'auteur que de nous le rappeler dans un récit à la fois vivant et didactique.

François Rothen est professeur honoraire de l'Université de Lausanne. Physicien généraliste, il s'est successivement consacré à la supraconductivité, aux cristaux liquides et à la physique de la matière vivante. Il s'intéresse depuis toujours à l'astronomie et à l'histoire des sciences.

Et pourtant,
elle tourne!

Et pourtant, **elle tourne!**

François Rothen

François Rothen a également publié
aux Presses polytechniques et universitaires romandes

Physique générale

La physique des sciences et de la nature

et avec Philippe A. Martin

Problèmes à N-corps et champs quantiques

Cours élémentaire

Illustrations: Marc Fontaine, Lausanne
Mise en page et couverture: Alexandre Pasche
Impression: LegoPrint S.p.a., Lavis (TN)

Les Presses polytechniques et universitaires romandes sont une fondation scientifique dont le but est principalement la diffusion des travaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ainsi que d'autres universités et écoles d'ingénieurs francophones. Le catalogue de leurs publications peut être obtenu par courrier aux Presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL – Centre Midi, CH-1015 Lausanne, par E-Mail à ppur@epfl.ch, par téléphone au (0)21 693 41 40, ou par fax au (0)21 693 40 27.

www.ppur.org

Première édition

ISBN 2-88074-603-5

© 2004, Presses polytechniques et universitaires romandes,

CH – 1015 Lausanne

Imprimé en Italie

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

*A mon ami Pawel Pieranski qui, comme Maria Sklodowska,
a quitté la Pologne pour faire carrière à Paris.*

«ET POURTANT, ELLE TOURNE!»

Contre toute vraisemblance, la tradition populaire attribue cette phrase à Galilée. Il l'aurait prononcée après s'être rétracté devant le tribunal de l'Inquisition. Ces quelques mots sont devenus le symbole de la rébellion de la science face à la religion.

Cette tradition est trompeuse. Au cours de l'épopée que constitue l'émergence de la science au sein du monde moderne, le procès de Galilée n'est qu'un épisode dénué d'importance. Si la confrontation entre science et religion a bien eu lieu, c'est dans des contextes autrement plus significatifs qu'elle a trouvé sa pleine expression.

Crédit photographique

La gravure que l'on distingue en filigrane sur la couverture de cet ouvrage provient d'un globe terrestre construit par Mercator, pseudonyme du mathématicien et géographe flamand Gerhard Kremer (1512-1594). Mercator a créé quantité de globes qui existent sous deux formes distinctes. Tout récemment, Jean-François Loude, professeur honoraire de l'Université de Lausanne, en a découvert et identifié deux exemplaires. Ils appartenaient à l'Institut d'Astronomie de cette même université.

SOMMAIRE

Avant-propos	ix
Prologue	xi
1 Au commencement	1
2 La radioactivité peut guérir et peut tuer	27
3 La chaleur interne de la Terre provient du cœur de la matière	47
4 L'horloge de la Terre	77
5 Que la lumière soit!	107
6 D'où proviennent les éléments de la vie?	133
7 La jeune femme et l'étoile	163
8 La météorite de Chicxulub	183
9 La pluralité des mondes	209
10 Sur les ailes de Pégase	243
Annexe 1: La notation exponentielle	277
Annexe 2: Le tableau périodique	278
Bibliographie	279
Index des noms propres	287

AVANT-PROPOS

Les références données dans cet ouvrage renvoient à des textes accessibles pour les lecteurs dépourvus de formation scientifique. Font exception à cette règle des articles ou des ouvrages qui ont marqué l'histoire des sciences ou témoigné d'une découverte importante. Il arrive parfois qu'une référence se rapporte à un ouvrage à caractère plus technique. Dans ce cas, elle sert à préciser l'origine d'une information essentielle.

Si les mathématiques sont absentes de ce texte, deux annexes figurent en fin d'ouvrage. La première, intitulée *La notation exponentielle*, permet au lecteur de passer sans danger de 3'000'000'000'000'000'000'000'000, une écriture parfaitement obscure, à $3 \cdot 10^{24}$, un symbolisme plus parlant pour l'intelligence bien que, dans les deux cas, notre intuition soit bafouée. Mais l'infiniment grand et l'infiniment petit font partie de la trousse d'urgence du savant: il ne peut se passer de ces monstres numériques. Le langage courant comme le jargon technique se sert de préfixes pour désigner des multiples ou des sous-multiples de dix: tout le monde connaît le kilomètre ou le millimètre, mais le micro- ou le nanomètre ne lui sont pas nécessairement familiers. Le lecteur trouvera dans cette même annexe la signification des préfixes les plus utilisés en physique.

Le tableau périodique des éléments, très abrégé, constitue la deuxième annexe. Il peut être utile à celui qui chercherait des points de repère parmi les différents éléments chimiques que l'on rencontre au hasard des chapitres.

Remerciements

La confection de cet ouvrage a bénéficié de l'aide de nombreux amis et collègues. J'aimerais d'abord remercier Olivier Babel et Jacques Neirynek d'avoir accepté de publier ce texte aux Presses polytechniques et universitaires romandes et de n'avoir jamais ménagé leurs remarques et encouragements. Marc Fontaine a bien voulu se charger des illustrations. Il l'a fait avec son talent qui est grand, avec une disponibilité constante et avec la volonté de traduire le mieux possible les intentions de l'auteur. Le résultat est là, remarquable. Josiane Moll a abattu un travail considérable et combien apprécié en recherchant dans toutes les bibliothèques possibles les sources d'information requises, souvent difficiles à dénicher quand les références étaient incomplètes. Japhet Bagilishya, Grégoire Galley, Michel Kessous et Patrick Stutz ont prodigué sans compter leur aide pour que la partie informatique de ce travail

se déroule sans encombre. Quant à ceux qui m'ont aidé dans mon entreprise, soit en relisant certains chapitres, soit, lors de discussions, en précisant certains points, je les remercie très vivement. Je pense notamment à Thierry Adatte, Wolfgang Bestgen, Yves Bouligand, Mikhail Chapochnikov, Mike Cosca, Giovanni Dietler, Jean Guex, Robert Huguenin, Jean-François Loude, Daniel Mange, Philippe Martin, Roland Martin, Michel Mayor, Jacques Neiryck, Pawel Pieranski, Nicolas Rivier, Jean-Willy Rossel, Claude-Alain Roten, Laure Rothen et Dieter Schwarzenbach. J'ai gardé pour la fin le travail considérable accompli par mon épouse Berna Rothen. Elle a relu à deux reprises le présent ouvrage. Elle ne s'est pas contentée de pourchasser impitoyablement coquilles, erreurs et impropriétés. Elle s'est aussi donné pour tâche de comprendre le texte du début jusqu'à la fin, non seulement par intérêt personnel, mais aussi et surtout pour pouvoir en signaler les passages obscurs. En me forçant à élucider tous ces points, elle est sans doute parvenue à améliorer la clarté de l'exposé.

PROLOGUE

En avril 1870, l'archéologue amateur Heinrich Schliemann commençait les fouilles de la colline d'Hissarlik, sur la côte ionienne. En dépit des sarcasmes des archéologues professionnels qui prenaient *l'Illiade* pour un mythe et Homère pour un auteur de contes de fées, Schliemann avait décidé de retrouver les traces de Troie. Accordant peu de poids aux opinions des spécialistes, Schliemann se contentait d'une lecture littérale de *l'Illiade* pour découvrir l'emplacement de l'antique Ilion. Schliemann avait raison. Dans le tumulus d'Hissarlik, il retrouva sept villes superposées. Mais il avait tort d'écarter les professionnels. Parmi les villes qu'il avait mises à jour, la Troie historique n'est pas celle qu'il avait cru identifier. Quant à la manière brutale dont il conduisit ses fouilles, c'est le modèle de ce qu'il ne faut pas faire en matière d'archéologie. Il n'en reste pas moins que, grâce à lui, la guerre de Troie a bien eu lieu.

Il n'y aura pas de second Schliemann pour mettre au jour les restes du Jardin d'Eden. Il n'a ni localisation géographique, ni réalité historique. Il n'en reste pas moins que les premiers versets de la Genèse relatent le mythe de la Création, un mythe tout aussi chargé de sens, de poésie et de beauté que celui que le poète grec a mis en vers. Il constitue la réponse que les érudits juifs, lors de la lente émergence du monothéisme, donnaient aux questions les plus profondes que peut se poser l'être humain, celles des origines. Que savons-nous du monde dans lequel nous vivons? Comment est-il apparu? D'où venons-nous? Sommes-nous seuls dans l'univers? Comment l'être humain peut-il déchiffrer le langage de la nature? Ces questions ont jalonné toute l'histoire de l'humanité et sans doute une partie de la préhistoire. L'être humain se reconnaît à la capacité de se poser de telles questions. Ce sont les religions qui y ont d'abord répondu en créant des mythes. Les philosophes ont peu à peu mêlé leurs voix à celles des prêtres. Aujourd'hui, c'est la science qui tente de répondre à ces grandes questions. Les chercheurs se servent plus souvent de microscopes et de télescopes que de pelles et de pioches et leurs compétences en physique et en chimie comptent plus que leurs connaissances bibliques. Grâce à eux, le récit de la création se reconstitue tous les jours. Il ne prendra jamais fin.

Ce sont les découvertes scientifiques qui nous aident à recomposer le livre des origines. Chacune d'elles a sa propre histoire qui s'apparente parfois à une enquête judiciaire telle que nous la présente la littérature policière. Les deux démarches sont pourtant distinctes.

Les maîtres du roman policier font tout pour préparer un coup de théâtre final qui dévoilera l'identité du coupable au lecteur stupéfait et enchanté

d'être tombé dans le panneau. Chacun d'eux a créé son propre détective, qu'il s'appelle Sherlock Holmes, Maigret, ou Hercule Poirot. D'un roman à l'autre, l'enquêteur ne change pas, ses méthodes sont toujours les mêmes. Holmes est passé maître dans l'utilisation d'indices si fins qu'ils échapperaient à son cher Watson, fût-il des mois entiers à leur recherche. Les personnalités de ces illustres détectives de papier sont si affirmées, leurs approches si stéréotypées que l'auteur de roman policier est contraint d'adapter la nature de l'énigme aux méthodes de son personnage.

La nature n'est pas avare en coups de théâtre, mais elle ne les dispense pas avec la même régularité que le romancier. Ils surgissent comme des coups de tonnerre dans un ciel serein. Dans l'histoire des sciences, les enquêtes ne conduisent pas à l'arrestation d'un criminel mais au déchiffrement d'un secret que la nature tenait enfoui dans son Grand Livre. Les portraits de ceux qui s'efforcent de l'élucider offrent la même diversité que ceux des grands détectives. Comme eux, ils multiplient les méthodes d'investigation. Mais ils ne peuvent plier la nature à leurs systèmes de recherche. Ce sont eux qui doivent s'adapter.

Dans cet ouvrage, on cherche à illustrer le travail du savant, ce beau terme du temps passé que le présent a remplacé par celui de chercheur, plus correct mais moins chargé de symboles. Le savant, à travers l'histoire de ses passions, de ses combats et de ses découvertes, donne vie et couleur à une science trop souvent dépeinte comme une activité désincarnée, réservée à une élite enfermée dans sa tour d'ivoire. Comme tous ses semblables, le savant est un être qui aime ou qui hait, qui souvent se querelle avec ses pairs, qui souffre de ses échecs ou savoure ses succès. Il vit avec plus ou moins de bonheur dans la société et parvient parfois à la modifier. Non pas en s'efforçant de la bouleverser d'un jour à l'autre, mais en permettant à ses contemporains ou à leurs descendants de voir le monde sous un jour nouveau.

Quand on parle des sciences de la nature, certaines ambiguïtés surgissent. Les rapports que la science entretient avec le progrès soulèvent notamment de nombreuses questions. Le progrès technique et la science vont de pair. Ils modèlent notre vie quotidienne et notre façon de voir les choses. Il est vain de prétendre que l'un précède l'autre comme il est absurde de se demander qui, de la poule ou de l'œuf, vient en premier. Ce point acquis, la science modifie notre vision du monde aussi profondément que notre mode de vie. Elle est alors *philosophie naturelle*, une terminologie qui s'est imposée plus solidement en anglais qu'en français. Comme le dit le mathématicien allemand Carl G. J. Jacobi en parlant des mathématiques, la science est *l'honneur de l'esprit humain*.

En changeant notre vision du monde, les révolutions scientifiques ne se distinguent guère des révolutions de société. A long terme, elles modifient notre vie quotidienne et nos relations avec nos semblables. Cette transformation est profonde et irréversible, si bien que ces révolutions suscitent de violentes oppositions. Dans cet ouvrage, on illustre quatre révolutions scientifiques par la narration des découvertes les plus significatives qui les ont jalonnées. Dans chaque cas, leurs acteurs bénéficient d'un éclairage tout particulier.

L'origine de la Terre et celle de l'univers

Dans l'Occident du début du XVII^e siècle, il est universellement reconnu que la Genèse biblique donne une image fidèle de la Création du monde et permet de la dater. Mais cette question appartient au domaine de la science qui, contre vents et marées, revendique ses droits. Trois siècles de recherches s'écoulaient avant qu'on ne parvienne à évaluer l'âge de la Terre avec une bonne précision. L'archevêque anglican d'Armagh pensait que la Création avait eu lieu le 23 octobre 4004 avant J.-C. alors que, selon la conception actuelle, l'âge de la Terre dépasse quatre milliards d'années. On conçoit que la transition ne pouvait se faire d'un coup. Géologues, biologistes et physiciens ont dû unir leurs forces pour parvenir à écrire une nouvelle histoire de la Terre et de l'univers. A côté de la Genèse biblique, ils ont écrit la nouvelle épopée du monde où nous vivons.

D'où venons-nous?

Les interrogations sur l'origine et l'avenir de l'humanité ne font pas partie des préoccupations quotidiennes des physiciens. Mais rien ne les empêche de franchir les limites de leur domaine et de s'impliquer dans l'une des croisades les plus prestigieuses auxquelles s'est livré l'être humain: D'où venons-nous? Que faisons-nous ici-bas?

Les problèmes associés à notre présence sur Terre sont encore loin de constituer une discipline homogène. Trois des découvertes dont il est question dans cet ouvrage n'ont apparemment aucun lien entre elles, si ce n'est qu'elles nous forcent à nous interroger sur nos origines. La première nous a donné la clé de la production du carbone à l'intérieur des étoiles, un élément sans lequel la vie ne pouvait apparaître. La seconde découverte constitue un vrai roman policier. Il s'agit de la reconstitution de la catastrophe planétaire créée par la chute de la météorite de Chicxulub, soupçonnée d'avoir provoqué l'extinction des dinosaures et d'être indirectement à l'origine de l'apparition de l'être humain. Quant à la troisième, ce sont les points forts d'une odyssée inaugurée dans l'Antiquité et qui a marqué toute l'histoire humaine. Il s'agit de la mise en évidence de nouvelles planètes grâce l'observation des perturbations que leur présence induit sur un corps céleste proche. Au XIX^e siècle, cette quête a permis la découverte de Neptune et, à la fin du siècle passé, celle de la première planète extrasolaire par Mayor et Queloz. L'existence de nouveaux systèmes planétaires ravive d'autres débats. Comment la vie est-elle apparue sur Terre? Existe-t-elle ailleurs que sur notre planète? Jusqu'ici, les réponses à ces questions appartiennent au domaine de la spéculation. Il n'en sera peut-être pas toujours ainsi.

Le rôle de la femme dans la science

Même les dictionnaires offrent des surprises. Ils reconnaissent deux genres au mot savant (féminin *savante*), quand il est employé comme adjectif. Mais

le substantif est exclusivement masculin: *Le Petit Robert* donne comme exemple: «Marie Curie fut un grand savant». Ce petit bijou de «sexisme» grammatical suffirait à expliquer que l'on évoque ici le rôle de la femme dans la science. Non pas abstraitement, mais au travers des carrières et des vies de deux *savants*, Marie Curie et Jocelyn Bell.

Dans la Genèse biblique, Eve, formée à partir d'une côte d'Adam, est subordonnée à l'homme. Les exemples de Marie Curie et Jocelyn Bell parlent de la lente évolution qui, un jour, fera de la femme l'égale de l'homme. Ils montrent que notre société n'a pas encore donné à Eve la place qui lui revient aux côtés d'Adam.

Comment lire cet ouvrage

Le présent ouvrage a été conçu pour raconter des histoires de savants et quelques épisodes de l'histoire des sciences. On a recherché l'exactitude sans prétendre à être exhaustif. Chemin faisant, on donne un bref exposé des domaines scientifiques que l'on rencontre. Il serait absurde de parler de la découverte de la radioactivité sans dire de quoi il s'agit et de parler de l'âge de la Terre sans donner au lecteur une idée de sa détermination. L'Histoire ne procède pas autrement. Or le lecteur qui n'a pas bénéficié d'une formation scientifique éprouve fréquemment un sentiment ambigu à l'égard de la science. A une certaine fascination se mêle de l'effroi ou même un réflexe de rejet ayant pour origine une expérience scolaire douloureuse, notamment en mathématiques. Dans ces conditions, on a tout fait pour rendre aussi claires et aussi simples que possible les courtes explications qui jalonnent cet ouvrage. On a résolument banni toute équation et toute «formule». Même si les sciences exactes ont les mathématiques pour langage, on a préféré parler des miracles qu'elle a accomplis en se servant de la langue de tous les jours. Selon Eric Temple Bell, l'auteur des *Grands Mathématiciens*, «Lagrange pensait qu'un mathématicien n'a pas entièrement compris son œuvre personnelle tant qu'il ne l'a pas rendue assez claire pour [pouvoir] l'expliquer au premier passant venu.» C'est là un idéal qu'il est difficile d'atteindre, aussi le lecteur ferait-il bien de suivre une recommandation d'un autre mathématicien, d'Alembert, qui, nous rapporte Bell, «conscient de ses propres difficultés aussi bien que de celles de ses lecteurs, [leur] conseillait de ne pas trop s'attarder sur tel point difficile [mais d'aller de l'avant]».

1 AU COMMENCEMENT

«Au commencement, Dieu créa les cieux et la Terre. Or, la terre était déserte et vide; les ténèbres couvraient la surface de l'abîme, et l'Esprit de Dieu planait sur les eaux.» [Genèse 1, 1-2]

Condamné pour avoir enseigné la théorie de l'évolution

En 1925, l'Américain John Thomas Scopes fut condamné à une amende pour avoir contrevenu à une décision du Parlement du Tennessee. La loi Butler, tel était son nom, stipulait qu'il était «illégal pour un professeur d'université, d'école normale et autres établissements publics de l'Etat [...], *d'enseigner une théorie qui nie le récit de la Création divine de l'homme*¹ telle qu'elle est révélée dans la Bible et enseigne au contraire que l'homme descendrait d'un ordre animal inférieur».

Qu'on n'imagine pas le procès de Scopes comme une réédition des bûchers de l'Inquisition. L'union américaine pour les droits civiques avait promis de fournir une assistance judiciaire à quiconque enfreindrait la loi Butler. Elle s'engageait à assumer les dépens qui en résulteraient. Scopes accepta de jouer les boucs émissaires. Il avait été engagé comme maître de sport et de physique dans un collège de la petite ville de Dayton, mais il avait dû remplacer au pied levé le maître de biologie, malade. Au lieu de donner un véritable cours sur la théorie de l'évolution, Scopes s'était contenté de distribuer aux élèves quelques pages d'un ouvrage qui en exposait les principes [1]. Dans cette affaire, il n'avait été qu'un provocateur, très serein au demeurant, mais la manœuvre des opposants à la loi Butler réussit parfaitement. Le procès eut un grand retentissement. C'est là tout ce que voulaient aussi bien l'union américaine des droits civiques que les habitants de Dayton, tout fiers que l'on parle de leur province éloignée.

Selon l'auteur de la référence [1], le géologue et historien des sciences Stephen Gould, «[le procureur] nia pratiquement que l'homme fût un mammifère». Il prit en exemple deux assassins fameux pour démontrer qu'il est dangereux de trop en savoir. Finalement, il finit quand même par reconnaître que les jours de la Genèse avaient pu compter plus de vingt-quatre heures... Cependant, Scopes ayant contrevenu à la loi, il devait être condamné et il le fut. Son amende s'éleva à cent dollars mais, le procès se déroulant sans jury, le juge ne pouvait infliger au prévenu une contravention aussi élevée. A la suite de ce vice de forme, la condamnation fut annulée [1]. Décidément, le procès se terminait en comédie burlesque. Et pourtant,

¹ C'est nous qui soulignons.

derrière la lecture littérale d'un texte sacré, qu'il soit d'inspiration divine ou laïque, se cache toujours le squelette ricanant de l'intolérance fanatique.

Aux Etats-Unis, on donne le nom de *fundamentalistes* aux croyants qui prennent à la lettre le texte de la Bible, et notamment les chapitres de la Genèse consacrés au récit de la Création. Ils ne sont plus qu'une minorité remuante². Aux XVI^e et XVII^e siècle, en revanche, la plupart des chrétiens capables de lire la Bible prenaient chaque verset au pied de la lettre. Nombreux ont été les érudits qui s'en sont servi pour reconstruire une chronologie universelle remontant à la Création. L'un d'eux s'est acquis une gloire particulière. Il s'agit de James Ussher.

Un archevêque moins bizarre qu'il n'y paraît

Archevêque anglican d'Armagh et primat de toute l'Irlande, James Ussher (1581-1656) nous plonge dans une perplexité amusée. Dans un fameux traité de chronologie, il fixe la Création au 23 octobre 4004 avant J.-C. Il précise qu'il était midi quand tout a commencé. Il est difficile de renoncer au plaisir de commenter ce travail, tant il est vrai que, même dans des domaines bien différents, la recherche s'expose aux mêmes pièges. Mais, avant de sourire de la naïveté de l'archevêque, on se doit de replacer cet ouvrage dans le contexte de son époque.

Pour ses contemporains, Ussher était un monument de culture et d'intelligence; calviniste rigoureux, il était un homme au grand cœur, excepté envers les «papistes», majoritaires en Irlande. Gould cite notamment une phrase d'Ussher à propos des catholiques: «[...] faire preuve à leur égard de tolérance ou consentir qu'ils exercent librement leur religion [...] est un grave péché» [2]. Pourtant, dans cette époque de guerres effroyables menées au nom de la religion, Ussher le calviniste cherchait à triompher plutôt par la force des arguments que par celle de l'épée. Bien que l'archevêque fût royaliste, Cromwell lui accorda des funérailles nationales à l'Abbaye de Westminster. L'œuvre la plus célèbre d'Ussher, *Les Annales*, constitue une chronologie de l'histoire mondiale, de la Création du monde à l'an 70 de notre ère, date de la prise de Jérusalem par Titus.

Aujourd'hui, l'établissement d'une chronologie universelle se déroulerait autrement. On commencerait par un récit plus ou moins parallèle des débuts des plus anciennes civilisations *historiques*, c'est-à-dire dotées d'une écriture que nous sommes capables de lire; c'est notamment le cas des civilisations égyptienne, mésopotamienne, chinoise ou crétoise. Mais on se heurterait tôt ou tard à un obstacle inévitable: à mesure que l'on remonte dans le temps, les dates deviennent de plus en plus incertaines et l'histoire se fond progressivement dans la légende. Ménès, le premier pharaon de la première dynastie, n'a pas d'existence historique. Le même flou se retrouve dans chacune des civilisations étudiées; nous sommes contraints d'avouer notre ignorance quant à la chronologie et à la réalité des faits trop anciens.

² La loi Butler fut abrogée en 1967.

A l'époque d'Ussher – et pour les fundamentalistes, c'est encore le cas aujourd'hui – la Bible constitue la parole de Dieu telle qu'elle a été révélée aux hommes. Il n'est pas question de l'interpréter: elle doit être prise à la lettre. La Bible comporte un récit de la Création ainsi que de nombreuses données concernant notamment les patriarches à la longévité démesurée. Celle de Mathusalem est proverbiale: l'Ancien Testament lui accorde 969 ans. Dans ces conditions, une chronologie universelle est à la portée d'un érudit qui mettrait en parallèle le récit biblique et l'histoire d'une autre civilisation. En effet, si la lecture du livre sacré permet de fixer une chronologie à peu près unique jusqu'au règne de Salomon, l'histoire de ses successeurs est entachée de lacunes et d'ambiguïtés. Autre difficulté, le récit de l'Ancien Testament prend fin environ quatre cents ans avant le début de l'ère chrétienne. Le recours à une chronologie issue de l'histoire d'une autre civilisation est inévitable.

Pour régler l'horloge hébraïque sur l'horloge «universelle» que fournissent les histoires grecque et romaine, Ussher utilise un événement enregistré aussi bien dans la chronologie biblique que dans la tradition gréco-romaine. Il s'agit de la mort de Nabuchodonosor, roi de Babylone. Nabuchodonosor prit Jérusalem en 587 et déporta une partie des Hébreux à Babylone. Il mourut en 563.

Que la reconstitution chronologique ne fût pas simple est une évidence. Elle était cependant accessible pour un historien comme Ussher qui ne doutait pas de la fiabilité des sources bibliques. Depuis le haut Moyen Age, une tradition s'était peu à peu établie selon laquelle il s'était écoulé exactement 4000 ans entre la Création et la naissance du Christ. Cette affirmation était à peu près confirmée par le calendrier juif, pour qui l'an 3671 coïncide avec l'an 1 de l'ère chrétienne. A l'époque d'Ussher, on «savait» que Jésus était né au plus tard 4 ans avant J.-C., même si une telle affirmation peut paraître contradictoire. Elle résulte d'une erreur historique et d'une lecture littérale de la Bible.

Au sixième siècle, le moine scythe Denys le Petit (environ 500-545) avait situé la naissance du Christ le 25 décembre de l'an 753 du calendrier romain, si bien que l'an 1 de l'ère chrétienne commence le 1^{er} janvier 754. Or cette date est incompatible avec une lecture littérale du Nouveau Testament. Jésus est nécessairement né avant la mort d'Hérode le Grand puisque celui-ci, averti par les rois mages de la naissance d'un futur roi des Juifs, projette de le mettre à mort en organisant le massacre des Innocents. Il veut faire disparaître dès sa naissance un rival qui pourrait un jour lui porter ombrage – la similitude avec la légende d'Œdipe est troublante. Les craintes d'Hérode sont inutiles puisqu'il meurt très vite, en l'an 749 du calendrier romain. Si l'on accepte que Jésus est né avant la mort d'Hérode, il devait avoir au moins quatre ans au début de notre ère que Denys fait commencer trop tard.

Une remarque encore, au risque de plonger le lecteur dans la confusion à laquelle n'échappent pas les rédacteurs de traités sur les calendriers. Pour les chronologistes, il n'y a pas eu d'année «zéro», si bien que l'année 754 du calendrier romain coïncide avec l'an 1 de l'ère chrétienne, tandis que l'année précédente s'identifie avec l'an 1 avant Jésus-Christ. Le zéro n'existe pas dans la numération romaine. Il est bien difficile d'échapper aux pièges du calendrier, surtout si l'on sait que, pour les astronomes, il existe bel et bien une année zéro...

Nous ne pouvons nous empêcher de froncer les sourcils en constatant qu'Ussher compte exactement 4000 ans entre la Création du Monde et la naissance du Christ. Souvenons-nous que les sources historiques et bibliques sont ambigus. Très souvent, pour fixer une durée ou une date, Ussher doit choisir entre deux ou même plusieurs interprétations. Il est évident qu'Ussher désirait arriver à ce chiffre rond et sacré de quatre mille, qui constituait pour lui une preuve de la qualité de son travail. Mais, du même coup, une coïncidence tant attendue le rend suspect à nos yeux. Car nous ne sommes pas au bout de nos surprises.

Selon la chronologie d'Ussher, le temple de Salomon a été achevé exactement 3000 ans après la Création. Ussher parvient à d'autres coïncidences mineures qui jettent incontestablement une ombre sur la probité de son travail. Selon le primat d'Irlande, il s'est passé 215 ans entre l'arrivée d'Abraham au pays de Canaan et le début de l'exil en Egypte, où les Israélites sont restés 430 ans, exactement deux fois plus longtemps. Et du début de la construction du Temple de Salomon à sa destruction par les Babyloniens, Ussher compte à nouveau 430 ans. Ce n'est pas fini. Ses œuvres complètes, publiées à Dublin au XIX^e siècle, remplissent 17 tomes. Or les Annales, qui sont consacrées à la chronologie, comportent exactement 2000 pages [3]. Dès lors que sa propre création tient en un chiffre rond de pages, l'archevêque se prendrait-il lui-même pour un petit Dieu?

Même si l'on oublie ce dernier détail, on se sent mal à l'aise. *Un chercheur honnête doit se défier aussi bien de ses préjugés ou de ses attentes que de certaines coïncidences trop belles pour être significatives.* Les vraies découvertes sont celles qui sont inattendues. Pour sa défense, Ussher pourra toujours affirmer qu'il a été guidé par la Providence dans ses calculs. Le jury appréciera, mais il voudra peut-être encore savoir comment Ussher, non content de déterminer l'année de la Création, en fixe le mois, le jour et l'heure. Comment sait-il donc que c'est le 23 octobre que l'horloge de l'univers s'est mise en marche?

Pour pouvoir répondre à cette question, on doit tout d'abord dire quelques mots des principaux calendriers auxquels Ussher devait recourir pour établir sa chronologie.

Les rythmes célestes et le calendrier

L'astronomie est l'une des sciences les plus anciennes. Le ciel est une horloge qui fournit des jalons pour la vie humaine comme pour celle des animaux et des plantes: le *jour* et l'*année* en constituent les points de repère les plus naturels. Le jour parce qu'il ponctue l'alternance de la clarté et de l'obscurité, l'année parce qu'elle souligne le retour des saisons, permettant ainsi à l'agriculteur de préparer les semailles et les moissons. Pour les habitants de l'hémisphère nord, le Soleil de l'été se lève au nord-est et se couche au nord-ouest. Il atteint le sommet de sa trajectoire diurne au milieu d'une journée de plus de douze heures. Le Soleil hivernal, qui s'est levé au sud-est, se couche rapidement au sud-ouest après être monté moins haut dans le ciel. Lors de l'équinoxe de printemps – en général le 21 mars – la durée du jour, qui a augmenté depuis le solstice d'hiver du 21 décembre, dépasse celle de la nuit.

Elle poursuit sa croissance et atteint sa valeur extrême le jour du solstice d'été, le plus souvent le 21 juin. Elle se met alors à décroître jusqu'au solstice d'hiver; au passage, l'équinoxe d'automne marque à nouveau l'égalité de durée entre le jour et la nuit (fig. 1.1).

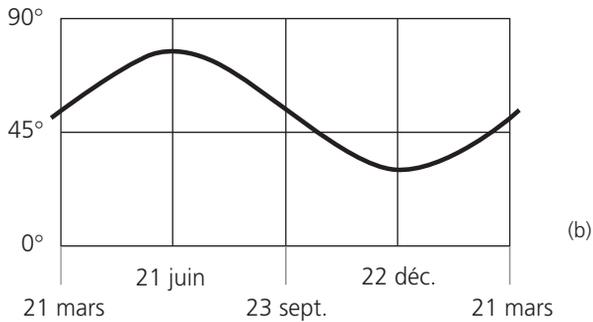
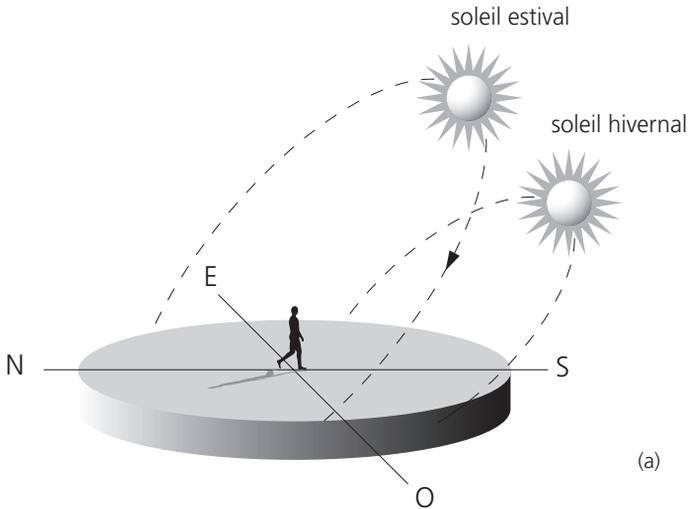


Fig. 1.1 Trajectoires diurnes respectives du Soleil en été et en hiver telles qu'elles apparaissent au nord du Tropique du Cancer (a). Lors de la trajectoire diurne du Soleil, la hauteur maximale atteinte varie régulièrement au cours de l'année. Le graphique présenté correspond à l'observation que peut faire un habitant de Lisbonne (b).

Les *constellations* et les étoiles qui les composent paraissent fixes les unes par rapport aux autres, à l'échelle humaine tout au moins. D'où le nom que le poète donne parfois à la *sphère céleste*, le «firmament», mot apparenté au latin «firmare», rendre solide, ferme. Quand le Soleil a disparu sous l'horizon,

les habitants des grandes plaines peuvent apercevoir chaque nuit un hémisphère de ce firmament, la *voûte céleste* qui, à l'image du Soleil et de la Lune, accomplit chaque nuit un *mouvement de rotation autour de l'Etoile polaire*. Ce mouvement n'est qu'apparent: il est dû à la rotation de la Terre autour de son axe.

Si, à l'instar des passagers des véhicules spatiaux, nous observions le ciel de l'extérieur de l'atmosphère, nous pourrions admirer simultanément un Soleil éclatant et les constellations se détachant sur un ciel parfaitement noir. Nous lirions directement la position de l'astre du jour sur une tapisserie céleste semée d'étoiles. Pour nous autres Terriens, à cause de l'éblouissement que provoque le Soleil en embrasant l'atmosphère, la tâche est un peu plus compliquée. Ce n'est que par la géométrie et le calcul que nous déterminons la position relative du Soleil et des étoiles qui disparaissent en alternance: «Celui qui osa le premier soutenir que pendant le jour le ciel est parsemé d'étoiles aussi bien que pendant la nuit, et que, si nous ne les y voyons pas le jour, c'est qu'elles sont éclipsées par la lumière du Soleil, celui-là fut certainement un homme plein de génie et de hardiesse.» [4]

C'est là que l'année entre en jeu et nous impose sa propre périodicité: l'aspect de la voûte céleste change de nuit en nuit. L'éternel retour du temps des frimas ou des canicules s'accompagne d'un ballet céleste silencieux qui ramène les mêmes constellations aux mêmes saisons. Orion et son baudrier illumine les nuits d'hiver mais reste invisible en été. Véga, l'étoile la plus brillante de la constellation de la Lyre, est proche du zénith pendant les nuits d'été. En hiver, il faut regarder au Nord, près de l'horizon, pour avoir une chance de l'apercevoir (fig. 1.2). L'Etoile polaire, elle, reste visible toute l'année, presque accrochée au *pôle céleste*, le point de la voûte autour duquel les étoiles décrivent chaque nuit un cercle silencieux (fig. 1.3).

Si notre vision nocturne de la voûte céleste se modifie au cours de l'année, c'est que, chaque jour, le Soleil prend quatre minutes de retard sur les étoiles: *le Soleil se déplace relativement aux étoiles fixes*. Là encore, ce mouvement n'est qu'apparent. Il est dû à la *révolution* de la Terre autour du Soleil. Si l'on inscrit son mouvement sur la voûte céleste, considérée comme fixe pour les besoins de la cause, le Soleil décrit *d'ouest en est* une lente et majestueuse trajectoire qu'il boucle en une année.

L'homme préhistorique n'a pas manqué de noter la coïncidence entre rythmes saisonniers et célestes. Les pyramides d'Egypte et le monument mégalithique de Stonehenge, en Angleterre, sont à peu près contemporains. Ils datent du troisième millénaire avant notre ère. Ces deux constructions révèlent l'intérêt que nos ancêtres portaient à l'astronomie. Pouvaient-ils dissocier astronomie et religion?

Parmi les quelques définitions de l'année en usage en astronomie, seule l'*année tropique* est importante pour les besoins de la vie humaine, car elle conditionne le rythme des saisons. Il s'agit de l'intervalle de temps moyen qui sépare deux passages successifs à l'équinoxe de printemps. Peu à peu s'est posée la question de sa durée exacte. Nous la connaissons aujourd'hui avec une grande précision: l'année tropique vaut 365,24220 jours. Les décimales qui interviennent dans sa définition ont été la source de bien des vicissitudes. Elles ont rendu malaisée la détermination de la valeur précise de l'année. Si

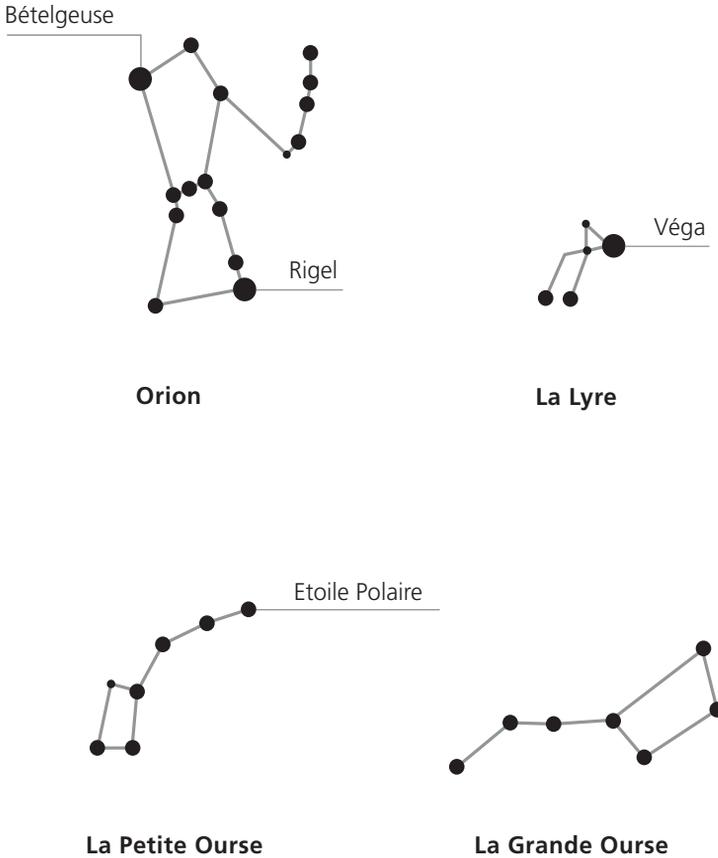


Fig. 1.2 Les constellations d'Orion, de la Lyre, de la Petite et de la Grande Ourse. Les points marquant les angles correspondent à des étoiles. Bételgeuse et Rigel (Orion), Véga (la Lyre) et l'Etoile Polaire (la Petite Ourse) sont représentées par des points bien marqués symbolisant leur éclat particulier.

l'année tropique comportait un nombre entier de jours, l'histoire des calendriers en serait grandement simplifiée.

Pendant des millénaires, l'année égyptienne ne comportait que 360 jours. Puis ce fut l'introduction du calendrier *vague* égyptien en 4236 avant notre ère. Il comportait 365 jours, ce qui impliquait qu'en cent ans, le décalage entre calendrier et rythme saisonnier atteignait environ 25 jours. On comprend mieux ce terme de «vague», à rapprocher de «vagabond».

Avant que César n'y mette bon ordre, le calendrier *romain* obéissait à des règles complexes. L'année romaine étant trop courte de dix jours au moins, on intercalait périodiquement un mois supplémentaire, *Mercedonius*, dont la durée était variable et fixée par le collège des pontifes. «[Ils] finirent par donner à ce mois une durée qui n'avait pour but que de favoriser leurs amis

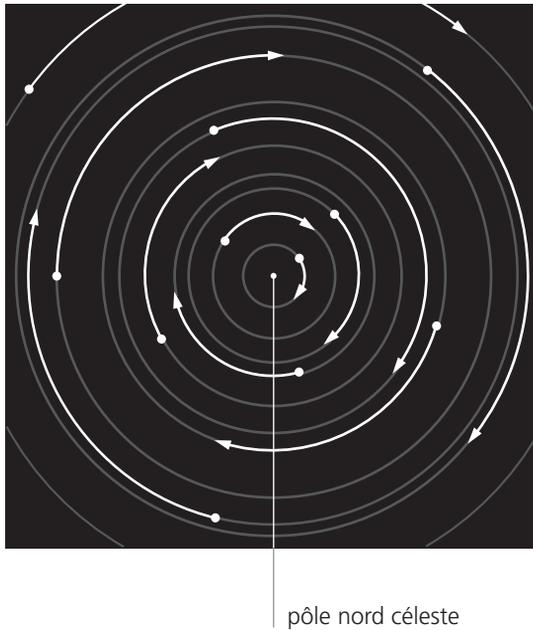


Fig. 1.3 Si l'on photographie de nuit la voûte céleste durant plusieurs heures, chaque étoile laisse sur la pellicule une trace en forme d'arc de cercle; l'ensemble de ces traces forme une série de cercles concentriques dont le pôle céleste constitue le centre. La figure représente schématiquement les trajectoires nocturnes des étoiles situées près du pôle, dont l'Etoile polaire est très proche. Chaque étoile ayant décrit un quart de tour, cela implique que l'observation a duré six heures.

politiques [...]. L'intercalation de Mercedonius était devenue une source de corruption [...]. » [5] Jules César décida de faire cesser cette joyeuse anarchie en instituant le calendrier *julien*. Pour ce faire, il fit appel à l'astronome Sosigène d'Alexandrie dont, hormis l'origine grecque et le lieu de naissance, l'Egypte, on ne sait rien.

Le nouveau calendrier entre en vigueur le 1^{er} janvier de l'an 46 avant J.-C. Pour les Romains, cette année porte le numéro d'ordre 708: César ne juge pas utile de modifier l'usage qui voulait que l'on comptât les années *ab Urbe condita*, autrement dit à partir de la fondation – légendaire – de Rome. Le calendrier julien s'appuie sur une valeur plus précise mais encore approchée de l'année tropique: Sosigène en fixe la durée à 365,25 jours. Dans le calendrier julien, l'année comporte 365 jours trois fois sur quatre. Tous les quatre ans, elle en compte 366 grâce à l'introduction d'un *jour bissextile* à chaque fois que le millésime est divisible par quatre. En comparaison du calendrier vague, le décalage entre calendrier et saisons se réduit, mais il atteint quand même huit jours par millénaire.

En 1582, le pape Grégoire XIII institue le calendrier *grégorien*, appelé à corriger la dérive du calendrier julien. En vigueur de nos jours, ce calendrier est

construit sur une année tropique longue de 365,2425 plutôt que de 365,24220 jours. La dérive devient négligeable. Si l'année tropique et la durée du jour restaient strictement constants, l'équinoxe de printemps tomberait le 18 mars en l'an 12000. Il aurait avancé de trois jours. Mais quand nos lointains descendants auront à s'en préoccuper, ils devront tenir compte d'autres facteurs propres à désolidariser le calendrier du rythme des saisons: ni la durée du jour ni celle de l'année tropique ne sont strictement constantes.

Bien que nécessaire, la réforme grégorienne se heurta en Europe à de nombreuses résistances, plus politiques que religieuses. Les protestants, notamment, ne l'adoptèrent qu'après des décennies d'hésitation alors que les Eglises orthodoxes ont attendu le XX^e siècle pour se rallier au calendrier grégorien. Quant à la Grande Bretagne du début du XVII^e siècle, elle restait fidèle au calendrier julien. La chronologie d'Ussher ne permet pas d'en douter.

Tantôt juif, tantôt anglican, le Dieu d'Ussher ne saurait être papiste

Lors de l'introduction du calendrier julien, Jules César avait fixé l'équinoxe de printemps au 25 mars, ce qui plaçait le solstice d'hiver au 25 décembre, date qui était alors celle d'une fête païenne. Dans les Eglises chrétiennes, elle a été remplacée depuis le IV^e siècle par la célébration de Noël. Au cours des siècles, le calendrier julien se mit à dériver lentement par rapport aux bornes milliaires des saisons que sont les solstices ou les équinoxes: l'*Escalade* de la Genève calviniste se fête au soir du 11 décembre, la date du calendrier julien qui, en 1602, correspondait au solstice d'hiver. La nuit du 11 au 12 décembre étant la plus longue de l'année, elle devait favoriser au mieux les desseins des Savoyards qui comptaient s'emparer de Genève par surprise. Dès 1582, sous l'impulsion du pape Grégoire XIII, cette dérive avait été corrigée en pays catholique. On décida que le vendredi 15 octobre suivrait immédiatement le jeudi 4 octobre. En 325, le concile de Nicée avait fixé l'équinoxe de printemps au 21 mars. La réforme de Grégoire XIII confirma ce choix.

Le Dieu d'Ussher était anglican avant tout. Il ne pouvait utiliser le calendrier grégorien, création du pape, mais devait s'en tenir au calendrier julien, encore en vigueur dans les pays réformés. Conformément à la citation bien connue, si Dieu a créé l'homme à Son image, celui-ci le Lui a bien rendu... L'Angleterre s'est fait tirer les oreilles avant d'adopter la réforme grégorienne en 1752, soit près de cent ans après la mort d'Ussher.

Si l'on remonte dans le passé à partir du début de notre ère tout en suivant un calendrier julien fictif, la situation s'inverse: les équinoxes et les solstices apparaissent toujours plus tardivement au cours de l'année. Or, sans doute en accord avec le Très Haut, Ussher décide que la Création eut lieu lors de l'équinoxe d'automne, début de l'année dans le calendrier juif. A cause de la dérive du calendrier julien, Ussher constate que, en 4004 avant J.-C., l'équinoxe d'automne serait tombé autour du 21 octobre. Il se persuade aussi que le premier jour de la Création ne pouvait être qu'un dimanche. Le récit de la Genèse est sans ambiguïté: le septième jour de la Création, Dieu se reposa et institua le jour du sabbat qui tombe le samedi (*sabbato* en italien). Avant d'être farouchement antipapiste, le Dieu d'Ussher avait donc été juif!

Dans ces conditions, le primat anglican peut affirmer que la Création eut lieu le 23 octobre 4004 avant J.-C., le premier dimanche après l'équinoxe d'automne. Nous lui laissons la responsabilité de son choix. Il précise encore l'heure de la Création – midi – qui correspond, dans son idée, à la création de la lumière, sans laquelle on ne peut parler de jour ni, a fortiori, de calendrier. En passant, on peut s'interroger sur le sort de la Nouvelle Zélande pour qui la Création du monde eut lieu en pleine nuit, à l'équinoxe de printemps. La Terre plate des Anciens avait du bon.

Avant de quitter l'archevêque d'Armagh, il est bon de noter qu'à son époque et jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, les chronologies bibliques foisonnaient. On pourrait tout aussi bien rire de ses concurrents, et notamment de Kepler et de Newton. «Dans le monde anglo-saxon moderne [...] Ussher tire sa célébrité désormais douteuse de ce que sa conclusion fut insérée en 1701 comme une note marginale dans la Bible dite du roi James [...].» [6] De nos jours, seuls les fondamentalistes prennent la Bible au pied de la lettre. Le récit de la Création que rapporte la Genèse est considéré aujourd'hui comme le mythe fondateur de la civilisation et de la religion juive, non comme un traité d'histoire. Pour beaucoup de théologiens, cette affirmation s'étend à toute la Bible, Nouveau Testament compris: le message religieux y a plus d'importance que l'exactitude des faits qui y sont rapportés. Cette conception moins littérale des Textes sacrés n'est pas nouvelle: les Lumières avaient porté un coup sensible à la lecture naïve de la Bible, mais c'est le début du XIX^e siècle qui voit réellement naître une approche scientifique de la chronologie de la Terre.

Les sciences de la Terre sont aussi anciennes que l'humanité, mais ce n'est que vers la fin du XVIII^e siècle qu'elles vont peu à peu contester la lecture littérale du récit biblique de la Création. Deux démarches parallèles vont conduire à des attitudes opposées. On verra dans un chapitre ultérieur que, aujourd'hui encore, elles prennent pour prétexte le problème de la disparition des dinosaures pour s'affronter et étaler leur désaccord. La première tendance met l'accent sur les discontinuités que l'on relève dans les couches géologiques. Elle les interprète comme les traces des catastrophes qui ont jalonné le passé de la Terre. Elle est née au début du XIX^e siècle et son champion se nomme Cuvier, le «découvreur de mondes disparus» [7]. La seconde affirme en revanche que l'histoire de la Terre ne procède jamais par à-coups. Elle se regroupe sous la bannière de Lyell.

Cuvier recrée les espèces disparues

Au XVI^e siècle, un *fossile* désigne tout objet singulier que l'on peut trouver dans la terre [8]. Ce mot vient probablement du latin «fodere», creuser, et regroupe d'abord aussi bien les cristaux et les haches de pierre que les restes pétrifiés d'organismes vivants. Ces fossiles d'origine organique étaient connus dans l'Antiquité mais, dès cette époque, leur provenance et leur nature étaient l'objet d'hypothèses variées. Pour Hérodote (484-425 av. J.-C.), les coquilles pétrifiées d'Egypte suggéraient que la Méditerranée s'étendait autrefois vers l'Ethiopie. C'était faire preuve d'un grand courage intellectuel d'admettre que les frontières entre mers et continents aient pu varier à ce point

dans le passé, d'autant que les fossiles se rencontrent souvent dans les montagnes. Nombreux étaient ceux qui se refusaient à une hypothèse aussi contraire à notre expérience quotidienne. Ils se lançaient alors dans des explications qui ne nous surprennent que si nous perdons de vue la difficulté du problème posé. Deux exemples suffisent pour en témoigner.

Après la découverte d'ivoire fossile, certains imaginaient l'existence de mines d'ivoire et pensaient que les os pouvaient naître spontanément de la terre. Quant aux formes complexes que constituent les fossiles au sein des roches, l'origine des forces capables de les susciter restait mystérieuse. Un jésuite, Athanase Kircher (1602-1680), illustre merveilleusement les vertus de la langue de bois qui fleurit dans le monde préscientifique. Il attribue la forme des fossiles à un «spiritus plasticus» et leur nature pierreuse à une «vertu lapidifiante» [9]. On ne peut s'empêcher de penser au langage des apothicaires qui entourent Argan dans *Le Malade Imaginaire* de Molière, un contemporain de Kircher. Faute de comprendre les phénomènes, on leur donnait un nom, ce qui permettait de les classer.

Finalement, à la fin du XVIII^e siècle, chacun, ou presque, a fini par se convaincre de l'origine organique des fossiles. Mais un nouveau problème apparaît: certains d'entre eux paraissent bien difficiles à ramener à des organismes connus. Pour ceux qui prennent la Bible au pied de la lettre, le problème est grave, la disparition de certains groupes zoologiques étant en contradiction patente avec le récit du Déluge universel. La Genèse nous apprend que Noé avait pris la précaution de sauver sept couples de chaque espèce terrestre ou volatile en leur réservant une place dans l'Arche. Pour ceux qui s'accrochent à l'enseignement biblique, il reste d'ailleurs un moyen d'expliquer les extinctions: les espèces prétendument disparues se terrent sans doute dans des régions reculées. Quant aux organismes marins comme les ammonites ou certains poissons, ils se cachent dans les profondeurs océaniques. Au reste, leur cas n'est pas si grave. Durant le Déluge, les habitants des mers s'étaient débrouillés tout seuls.

C'est alors que paraît Cuvier.

Si la vie de Georges Cuvier (1769-1832) n'est pas riche en anecdotes et en épisodes aventureux, son intelligence, sa mémoire et sa puissance de travail sont exceptionnelles. Pour ses contemporains, il est le prototype du génie, le «Napoléon de l'intelligence». Protestant, il naît à Montbéliard, alors possession francophone du duc de Wurtemberg, si bien que ses dons lui donnent accès à l'Académie Caroline de Stuttgart, un établissement technique supérieur destiné à former des fonctionnaires. Comme il s'intéresse dès sa jeunesse à l'histoire naturelle, qu'il est très bon élève et qu'il soigne admirablement ses relations sociales, il fera carrière à la fois au Muséum d'Histoire Naturelle et dans l'administration, notamment au Conseil d'Etat.

C'est comme *paléontologue* que Cuvier se rend célèbre, même si le terme n'est attesté qu'en 1830, deux ans avant la mort de Cuvier. Il ne l'a probablement jamais utilisé. Cuvier domine l'époque bénie où foisonnent les découvertes de nouvelles espèces fossiles. En simplifiant un peu, on peut dire qu'il est le premier à avoir apporté la preuve que certaines espèces de vertébrés ont disparu de la surface de notre globe. Parmi ses premiers succès, on peut citer

l'identification du mastodonte, du mégathérium – un mammifère géant proche des paresseux – et du ptérodactyle – un reptile volant. On ne parle pas encore de *dinosaures*, un terme que Cuvier n'a pas connu: il est apparu en 1840 du grec «deinos» (terrible) et «sauros» (lézard). Pour ses contemporains, Cuvier est une sorte de magicien qui, à partir d'un seul os ou d'une seule dent, est capable de reconstituer un squelette et même la silhouette de son propriétaire. Il s'agit là d'une exagération, bien sûr, mais les connaissances de Cuvier en anatomie comparée en font le plus grand paléontologue de son temps et peut-être de tous les temps.

Quelle est la cause des multiples extinctions qui se révèlent à mesure que l'on récolte os et dents fossilisés? C'est sur ce point que va naître une polémique qui dure encore aujourd'hui.

Cuvier note d'abord que les fossiles rencontrés dans une couche géologique permettent de la caractériser et, souvent, en présence de deux couches, de déterminer laquelle est la plus ancienne. Il note par exemple que certaines couches ne contiennent que des fossiles d'invertébrés ou de poissons. Comme elles se situent généralement au-dessous de celles qui recèlent des os de mammifères, elles se sont déposées les premières et doivent être plus anciennes. Il est à noter que, sur le terrain, les choses ne sont pas si simples. De très nombreuses couches géologiques, porteuses ou non de fossiles, sont absentes ici mais présentes ailleurs. La règle selon laquelle «le plus profond est le plus ancien» est souvent malmenée, notamment dans les terres volcaniques ou montagneuses. Depuis le début du XIX^e siècle, des géologues parcourent le monde pour établir un peu partout des cartes permettant de préciser la situation stratigraphique locale. Grâce à leur labeur, les fossiles permettent de définir un *ordre chronologique* mais, à eux seuls, ils n'auraient rien pu nous dire sur l'âge des couches où on les trouve.

Avec le géologue Alexandre Brongniart, Cuvier met en évidence un phénomène très intéressant: l'alternance de dépôts marins et d'eau douce, caractérisés à tour de rôle par leur faune particulière. Il l'interprète de manière très naturelle: l'histoire de la Terre est entrecoupée d'événements très violents qui, à chaque fois, modifient complètement la distribution des mers et des terres et provoquent les extinctions observées. Le plus récent de ces événements catastrophiques dont les archives géologiques gardent la trace ne serait autre que le Déluge universel.

Le mot terrible est lâché. Pour de nombreux auteurs, Cuvier fait appel à la paléontologie afin de justifier la lecture littérale de la Bible. On l'accuse même d'avoir été le héraut de «créations successives» qui intervenaient chaque fois qu'une catastrophe avait détruit toute la vie sur Terre [7, 9]. Il est vrai que Cuvier croyait à la divine providence et qu'il haïssait aussi bien les idées révolutionnaires que la Révolution elle-même, durant laquelle «la populace faisait la loi» [10]. Il était aussi docile à l'égard des puissants qu'autoritaire envers ses subordonnés. On ne peut cependant l'accuser d'en être resté à la chronologie biblique: il termine son *Discours préliminaire aux Recherches sur les ossements fossiles de quadrupèdes* par cette phrase: «Et l'homme, à qui il n'a été accordé qu'un instant sur la terre, aurait la gloire de refaire l'histoire des milliers de siècles qui ont précédé son existence, et des milliers d'êtres qui n'ont pas été ses contemporains.» Il est difficile de faire coïncider ces mots avec le récit littéral de la Création.

Aujourd'hui, on reconnaît en Cuvier un géant de la science et le fondateur du *catastrophisme*, la doctrine qui, en géologie, met l'accent sur l'importance des catastrophes dans l'histoire de la Terre. Mais comme Cuvier a effectivement rangé le Déluge parmi les catastrophes qui ont jalonné l'histoire de la Terre, ses successeurs ont établi une corrélation très forte entre catastrophisme et lecture littérale de la Bible. C'est une des raisons qui font que, aujourd'hui encore, la notion de catastrophe a gardé pour les géologues une odeur de fagot. Dans l'esprit de nombre d'entre eux, les discontinuités visibles dans les archives fossiles ne sont pas les traces d'événements subits. Elles ne proviennent que d'une accélération passagère de certains phénomènes graduels (éruptions volcaniques massives, modifications du climat, abaissement ou élévation du niveau de la mer). Le catastrophisme est pourtant compatible avec une vision scientifique de la géologie. Aujourd'hui, sa cote ne cesse de remonter, même si son rejet presque irrationnel est encore monnaie courante. Cette opposition peut s'expliquer par l'influence considérable que Charles Lyell, un autre grand géologue du XIX^e siècle, eut sur ses contemporains et ses successeurs.

Lyell boute les catastrophes hors de la géologie

Si l'on omet de le replacer dans son époque, Ussher passe à nos yeux pour un fou de Dieu. Or le XIX^e siècle voit l'avènement du britannique Charles Lyell (1797-1875), souvent considéré comme le père de la géologie scientifique. Dans ses *Principles of Geology*, parus de 1830 à 1833, il établit fermement les bases de la méthodologie des sciences de la Terre [11]. Par un effet de contraste, on pourrait en faire un scientifique acharné, un de ces êtres qui prétendent résoudre tous les problèmes philosophiques par la science. Alors qu'Ussher voit l'origine de l'univers dans un événement unique, la Création divine, Lyell élimine de l'histoire de la Terre tout processus subit. De cette manière, il s'oppose aussi bien à Cuvier qu'à Ussher. Ussher limite l'âge de l'univers à 6000 ans; Lyell accorde à l'histoire de notre planète une durée immense, qu'il ne peut ni ne se soucie de préciser: même si la Terre a eu une naissance, toute trace en a été perdue.

Quantité de transformations géologiques se produisent sous nos yeux. L'érosion, les inondations, les éruptions volcaniques et les tremblements de terre modifient les reliefs mais, à l'échelle de la Terre entière, la géographie ne change qu'insensiblement. Emportés par les cours d'eau, les produits de l'érosion s'accumulent dans les mers. Ils en accroissent la salinité et constituent peu à peu des sédiments. Comment douter que ces phénomènes se sont également produits dans le passé? Comment ne pas pressentir les durées immenses qu'il a fallu pour niveler des massifs montagneux, pour saler la totalité des océans ou pour hisser des sédiments du fond des mers au sommet des montagnes? Les fossiles marins que l'on découvre à trois mille mètres de hauteur en témoignent.

C'est là le message de Lyell: l'observation du présent est la clé de la compréhension du passé. Par référence au catastrophisme de Cuvier, Lyell est considéré comme le fondateur du gradualisme, ou *principe d'uniformité*³.

Lyell applique cette méthode de réflexion à l'étude de la Terre et même à l'*orogénèse*, l'édification des massifs montagneux, ce qui heurte au premier abord notre intuition. Il est patent que les séismes peuvent soulever ou enfoncer le sol de plusieurs centimètres, voire plus. Si la Terre est assez âgée pour que chaque événement, si rare soit-il, se reproduise un grand nombre de fois, une chaîne montagneuse peut se soulever, quitte à disparaître peu à peu sous l'effet de l'érosion. Il est à noter que, pour qu'une chaîne de montagne puisse réellement apparaître, il est nécessaire que les séismes contribuent plus souvent à l'élévation qu'à l'abaissement du sol. C'est ce qui s'est passé il y a 25 millions d'années avec l'Himalaya, quand l'Inde est venue s'encastrier dans l'Asie. Ce soulèvement se poursuit de nos jours.

L'étude des processus géologiques qui ont cours sous nos yeux milite en faveur du gradualisme: nous n'observons pas de bouleversements à l'échelle planétaire, tout au plus à l'échelle locale. Le mérite de Lyell est grand car, pour citer Gould: «Aujourd'hui comme hier, la lecture au premier degré des traces du passé géologique ne nous révèle qu'une succession discontinue de brutales transitions, à tout le moins dans des aires géographiques limitées. [...] La plupart du temps, les *strates* ou couches géologiques marines bien caractérisées gisent directement au-dessus de couches terrestres, et nous ne trouvons aucun signe d'une transition graduelle entre les unes et les autres. Le monde des dinosaures ne s'efface pas petit à petit devant l'environnement des mammifères.» [12] Ces discontinuités criantes, Lyell les interprétait comme le résultat de la disparition de certaines couches géologiques, à l'image d'une Histoire de France qui passerait sans transition du récit du procès de Jeanne d'Arc à celui de condamnation du capitaine Dreyfus. Même non averti, un lecteur se rendrait rapidement compte qu'un certain nombre de pages font défaut...

Les conceptions de Lyell entraînent une conséquence immédiate et scandaleuse pour les fidèles d'Ussher: pour promouvoir l'uniformité, *il faut accorder à l'histoire de la Terre du temps, beaucoup de temps*, une durée incommensurable vis-à-vis des six mille malheureuses années que le primat d'Armagh accordait à l'histoire de la Terre. L'immense mérite de Lyell a été de comprendre que les phénomènes géologiques, tous mineurs à l'échelle humaine, ont des conséquences importantes pourvu qu'on leur en donne le temps.

Lyell abolit la flèche du temps

Pour défendre ses conceptions, Lyell avait besoin de durées immenses. En cela, il s'opposait à Ussher et aux autres fondamentalistes. Nous ne pouvons que l'approuver. Mais il va encore beaucoup plus loin et, là, nous refusons de le suivre. Il se fait l'avocat de ce qu'on appelle volontiers le temps cyclique, ce qui entraîne à peu près l'abolition de la *flèche du temps*.

L'histoire humaine est une évolution. Certains événements changent à jamais l'avenir, ils ne peuvent influencer le passé: la découverte de l'écriture ne pouvait que précéder celle de l'imprimerie; celle de l'Amérique par Christophe

³ On parle aussi d'*uniformitarisme* ou d'*actualisme*.

Colomb devait se produire avant l'introduction de la pomme de terre en Europe. Même si nous avons oublié les dates, nous savons ordonner la chronologie. Il en est de même en paléontologie: les poissons sont présents très tôt, bientôt suivis par les reptiles. Ce n'est que beaucoup plus tard qu'apparaissent les oiseaux et les mammifères, qui ne connaissent un véritable épanouissement qu'après la disparition des dinosaures.

Lyell n'accepte pas cet ordre chronologique qui, peu ou prou, affaiblit son principe d'uniformité. On ne trouve pas d'oiseaux dans les strates les plus anciennes? C'est que les oiseaux se fossilisent rarement. Les mammifères y sont également absents? C'est qu'on a mal cherché. Son attitude est celle d'un archéologue qui chercherait des tombeaux de pharaons en Australie et des amphithéâtres romains en Chine, sous le prétexte que ce qui s'est passé autour de la Méditerranéenne s'est nécessairement produit ailleurs. Pour Lyell, le passé avait la même coloration que le présent et il en sera de même dans l'avenir. L'histoire n'est qu'un *éternel retour*. Puisque le futur peut être permuté sans dommage avec le passé, le temps a perdu le sens de son écoulement ou, comme on dit volontiers, sa «flèche». Gould cite un passage étonnant de Lyell: «Alors pourrait réapparaître ces genres d'animaux dont les roches anciennes de nos continents ont conservé la mémoire. L'énorme iguanodon pourrait revenir dans les forêts, l'ichtyosaure dans la mer et le ptérodactyle voler de nouveau dans l'ombre des bocages de cyathacées.» [12]

Pour mieux écraser la mythologie créationniste, Lyell abolit la marche de l'histoire. Ses convictions philosophiques prennent le pas sur l'observation, contrairement à Cuvier qui se méfiait des spéculations. Lyell n'admet qu'une exception à son principe d'uniformité, mais elle est de taille: notre espèce n'est apparue qu'une fois et une seule. Ce qui constitue une incongruité par rapport à l'ensemble de son œuvre. Que celui qui est exempt de contradictions lui jette le premier fossile.

Darwin, théologien par dépit, naturaliste par vocation

Charles Darwin (1809-1882) est l'une des plus grandes figures de la science. Issu de Shrewsbury dans le Shropshire, comté qui jouxte le Pays de Galles, il était à la fois un naturaliste hors pair et un théoricien de la biologie qui a passé la plus grande partie de sa vie à méditer sur les mécanismes de l'évolution.

Les parents qui ont des cancre pour rejetons citent volontiers le nom de ceux qui, mauvais élèves dans leur jeunesse, ont brillamment réussi par la suite. Quand il s'agit de savants renommés, ces histoires ont bien des chances d'être apocryphes, ou considérablement déformées. Or Darwin est le héros de l'une de ces légendes. On raconte que, lorsqu'il eut seize ans, son père Robert le retira de l'école de Shrewsbury en affirmant: «Tu ne t'intéresses qu'aux fusils, aux chiens et à la chasse aux mulots. Tu ne sauras jamais rien faire, sinon honte à tous les tiens!» Puis il l'envoya à l'Université d'Edimbourg étudier la médecine aux côtés de son frère aîné. En réalité, l'enseignement prodigué à Shrewsbury, strictement limité aux «humanités», ennuyait profondément le jeune Darwin. On en veut pour preuve l'anecdote suivante. Vers la fin de ses

années d'école, Charles et son frère passaient de longues heures dans un petit laboratoire de chimie qu'ils avaient installés eux-mêmes. Le directeur de l'école, apprenant la chose, réprimanda publiquement Charles sous le prétexte qu'il perdait son temps sur des sujets sans intérêt. Quant à la phrase prononcée par Robert Darwin, elle est attestée par Charles lui-même, mais la «victime» ne lui accorde aucune importance et la cite comme le seul cas où ce père qu'il révérait s'était départi de son calme et de sa gentillesse. Charles Darwin en fait longuement l'éloge dans son autobiographie. Pour lui, la décision de l'éloigner de l'école de Shrewsbury était judicieuse. [13]

L'anecdote est instructive. Elle ne constitue qu'un exemple de plus de ces légendes qui naissent lorsqu'un historien ou un biographe consulte trop rapidement ses sources. Ces historiettes sont ensuite recopiées sans qu'on en vérifie l'authenticité. Cette fable comporte une moralité. Puisque Charles se passionnait pour les sciences naturelles et la chasse et qu'il n'était médiocre que dans les disciplines classiques, il n'était pas un cancre. Il était un élève mal orienté. Mais n'est-ce pas le cas de bien des cancre?

A Edimbourg, les opérations se pratiquent sans anesthésie, si bien que l'étude de la médecine rebute Darwin. Il se résout finalement à aborder des études de théologie à Cambridge, études qu'il termine en se passionnant pour les œuvres d'Euclide et pour celles du théologien Paley, dont il sera question plus loin. Il se lie avec le grand botaniste John Stevens Henslow puis, à la fin de ses études, s'initie à la géologie. Finalement, avant d'être ordonné prêtre anglican, il profite d'une occasion qui changera le cours de sa vie: l'Amirauté lui propose un poste de naturaliste sur le *Beagle*, un navire chargé d'une mission océanographique sur les côtes atlantique et pacifique d'Amérique du Sud. Cette exploration achevée, le *Beagle* accomplit un tour du monde en visitant successivement les Galapagos, Tahiti, la Nouvelle Zélande, l'Australie, l'Océan Indien, le Cap puis, après avoir bouclé la boucle à Bahia, rentre en Angleterre. Parti en décembre 1831, le *Beagle* est de retour en octobre 1836. Darwin n'a cessé de collectionner des roches, des spécimens d'animaux rares ou inconnus, des fossiles et des plantes qu'il envoie à chaque escale en Angleterre. Il est devenu un homme de science accompli et renommé. Heureusement pour la science et pour ses paroissiens virtuels, il n'est plus question qu'il devienne pasteur. Il épouse sa cousine germaine avec laquelle il sera heureux et aura beaucoup d'enfants. Et c'est tout...

Enfin presque: les choses ne sont jamais si simples.

A partir de 1842, les Darwin s'installent au sud de Londres. Là, dans une propriété de campagne, Charles écrit un certain nombre d'ouvrages de grande valeur. L'un d'entre eux, *Les récifs de corail, leur structure et leur distribution* [14], prouve qu'il n'est pas seulement naturaliste, mais également géologue. Dans ce texte, il propose un nouveau mécanisme de formation des récifs, mécanisme encore accepté aujourd'hui. Mais l'œuvre magistrale de Darwin, quant à sa gestation et à ses répercussions, évoque irrésistiblement les *Principia Mathematica* de Newton. Il s'agit de *L'Origine des espèces* [15], parue en 1859.

L'Origine propose un mécanisme crédible de l'évolution. Dans l'histoire des sciences et dans celle des idées, elle constitue un monument. Dès 1837, une année après son retour, Darwin avait composé ses premiers textes sur

l'évolution, mais il avait attendu près de vingt-cinq ans avant de publier ses idées. S'il finit par se décider, c'est que, tout d'un coup, le temps presse. En 1858, il reçoit un texte du naturaliste Alfred Wallace (1823-1913). Il y trouve l'esquisse d'une théorie de l'évolution similaire à la sienne. En novembre 1858, afin de sauvegarder les droits de priorité de chacun, Darwin et Wallace présentent leurs idées à la même séance de la Linnean Society of London. *L'Origine des espèces* paraît l'année suivante.

Si Darwin a tant tardé à exposer ses idées sur l'évolution, c'est sans doute qu'il s'inquiétait de l'accueil qu'elles recevraient de la part de la jeune société victorienne. Ses proches ont souligné à quel point il respectait l'autorité et l'opinion d'autrui tout en dénigrant ses propres contributions. Il était sans cesse malade, et la description des symptômes qui l' affectaient font penser à des troubles psychosomatiques, bien que, sur ce point, les opinions soient partagées. En un mot, il ne présente pas le profil psychologique du révolutionnaire qu'il est devenu malgré lui. Ayant bénéficié du magnifique laboratoire que le *Beagle* lui avait offert, il eut le courage d'aller au bout des idées et des réflexions suscitées par ses découvertes. De presque tous les grands savants, on peut dire que, s'ils n'avaient pas été là, leurs découvertes auraient été faites tôt ou tard par un autre. Mais chacun d'eux leur imprime sa démarche et son style inimitables. La théorie de l'évolution existerait sans Darwin mais, dans l'histoire des idées, sa coloration serait différente.

Dans la France du début du XIX^e siècle, le terme d'*évolutionnisme* était inusité. On parlait plutôt de *transformisme*, une idée que Cuvier rejetait totalement. Il s'agit d'une conception selon laquelle les espèces se transforment progressivement, si bien qu'il n'y a rien d'étonnant à ce que la grande majorité d'entre elles ne se retrouvent plus que dans les archives géologiques. On parle de *l'évolution des espèces* ou, plus simplement, de *l'évolution*. Cette idée n'était pas neuve à l'époque de Darwin (elle avait notamment été défendue par Lamarck en France et par Erasmus Darwin, le grand-père de Charles en Angleterre), mais elle heurtait les conceptions religieuses – il n'y a pas de place pour elle dans la Genèse ni dans l'histoire du monde selon Ussher.

Cuvier avait toujours été opposé au transformisme. Non pas qu'il fût arrêté par des convictions religieuses qu'il n'avait vraisemblablement pas, mais pour une raison qui témoigne de son aversion pour les spéculations. Il remarque notamment que, entre les grands groupes zoologiques, les étapes intermédiaires se rencontrent bien rarement dans les archives fossiles. Le premier reste d'*archéoptérix*, une forme intermédiaire entre reptiles et oiseaux, n'a été découvert qu'en 1861, longtemps après la mort de Cuvier.

Si Darwin a fini par l'emporter, c'est qu'il est le premier à avoir suggéré un mécanisme crédible propre à expliquer l'évolution. Ce moteur, il le voit dans la *sélection naturelle*.

La sélection naturelle

Dans *L'Origine des espèces*, Darwin rappelle tout d'abord les effets remarquables de la sélection artificielle à laquelle procèdent les éleveurs, notamment chez les pigeons et les chiens. Un éleveur de limiers a tendance à conser-

ver les chiots qui lui paraissent les plus aptes à la chasse. Il les sélectionne aussi pour la reproduction. Il est favorisé dans son dessein par la diversité de la population canine dont il s'occupe, et par le fait qu'un couple reproducteur a toujours un grand nombre de rejetons.

Ce n'est qu'en 1865 que le moine morave Gregor Mendel (1822-1884) publie les lois de l'hérédité qui portent son nom, mais son travail restera longtemps ignoré. Les lois de Mendel ne seront redécouvertes par la communauté scientifique qu'en 1900, seize ans après sa mort et dix-huit ans après celle de Darwin. Cependant si, en 1859, Darwin ni personne ne connaît en détail les mécanismes de l'hérédité, l'éleveur en a une idée confuse, truffée de préjugés et d'idées reçues. Il choisit comme reproducteurs les chiens les plus largement pourvus des qualités qu'il désire sélectionner.

Darwin remarque que, dans la nature, les choses se passent de manière analogue. La diversité, sans laquelle la sélection n'aurait aucun effet, y est toujours présente: elle est due aux mutations, un phénomène qui n'avait pas été identifié du temps de Darwin, et encore moins étudié. Dans toute espèce, chaque reproducteur possède un très grand nombre de descendants potentiels, mais d'innombrables obstacles font que l'effectif d'une espèce varie relativement peu d'une génération à l'autre. Les maladies, les accidents, les prédateurs ou la pénurie des ressources à disposition sont de sérieux facteurs limitatifs qui menacent chaque individu dans son combat pour la vie. Comme dans le cas de la sélection artificielle, la diversité et l'hérédité jouent chacune leur rôle et les plus aptes sont statistiquement favorisés.

Ces remarques mettent en évidence l'analogie entre les sélections naturelle et artificielle. Ce que l'on voit plus mal, en revanche, c'est le mécanisme de la *spéciation*, le mécanisme contrôlant l'apparition de nouvelles espèces. Grâce aux éleveurs, les chiens manifestent une diversité stupéfiante, mais ils ne constituent qu'une seule et unique espèce, l'*espèce canine*, divisée en un nombre considérable de variétés (dans le langage courant, on parle de *raças*). En effet, à quelques problèmes purement mécaniques près qui se manifestent quand la taille des deux reproducteurs est trop différente, tout couple canin peut avoir des descendants féconds. Cette situation montre que tous les chiens appartiennent à la même *espèce biologique*, une définition qui est largement suffisante pour notre propos.

En revanche, le mécanisme de l'apparition d'espèces nouvelles est complexe et leur histoire difficile à reconstruire après coup. Le cas des *pinsons de Darwin* constitue une heureuse exception. Aux îles Galapagos, il a fourni au naturaliste, presque en direct, un exemple spectaculaire de spéciation.

Les Galapagos forment un archipel équatorial situé à plusieurs centaines de kilomètres de la côte pacifique de l'Amérique du Sud. On admet aujourd'hui que, à l'échelle géologique, il n'est apparu que récemment. Darwin y recueille des exemplaires de treize formes distinctes de pinsons qu'il fera expertiser par un ornithologue à son retour en Angleterre. Tous ces oiseaux se ressemblent: ils ont la taille d'un moineau, ils sont ternes, leurs plumages et leurs comportements ne diffèrent guère entre eux. Seuls leur bec (par la forme ou la taille), leur alimentation (graines ou insectes) et leur habitat (au sol ou dans les arbres) permettent de les distinguer. L'un de ces pinsons, pourtant, émerge du lot: comme un pic, il court le long des troncs et se nourrit d'insec-

tes qu'il trouve dans d'étroites cavités du bois. A une différence près: faute de posséder la langue effilée du pic, il se sert d'un rameau ou d'une épine de cactus qu'il enfonce dans l'anfractuosité afin de se saisir de l'insecte qui pourrait en sortir.

Darwin lui-même ne sait trop si ces différents pinsons constituent des variétés d'une même espèce ou si chaque forme distincte correspond à une espèce particulière. Aujourd'hui, on penche pour la deuxième hypothèse. Il est vraisemblable que, dans le passé, une ou plusieurs volées de pinsons issues du continent ont essaimé sur l'archipel. Ne rencontrant pas d'espèces concurrentes sur les Galapagos, elles ont pu donner naissance à treize espèces aux habitats et alimentations distincts. Suivant le vocabulaire à l'honneur aujourd'hui, les *niches*   occuper étaient nombreuses, une situation favorisant des processus de spéciation répétés.

De nos jours, seuls certains fondamentalistes ou «créationnistes» mettent en question la réalité de l'évolution. Mais personne ne peut affirmer non plus que l'évolutionnisme soit une théorie complète. On n'en comprend pas tous les mécanismes. Il faut espérer que l'avenir permettra de combler un certain nombre de lacunes dans nos connaissances. On pourra peut-être alors évaluer plus précisément à quelle vitesse l'évolution progresse. Ce mouvement n'est certainement pas uniforme et varie de cas en cas. Il dépend d'un nombre considérable de facteurs, si bien que la détermination du taux de progression et de la chronologie de l'évolution est très complexe. Sur un point, en tout cas, Darwin rejoignait Lyell: l'évolution nécessite une durée immense.

Avant d'en venir à Kelvin et aux contraintes qu'il va imposer à cette durée, il vaut la peine de dire un mot des répercussions du travail de Darwin sur les conceptions religieuses de son temps.

Révolutionnaire malgré lui

L'autobiographie de Darwin était destinée à ses enfants. Elle fut publiée en 1887 par son fils Francis dans une version expurgée qui éliminait notamment les passages où Charles exposait ses vues sur la religion. Nora Barlow, petite-fille de Charles, a rétabli l'intégralité du texte dans une édition de 1958 [13].

Charles Darwin raconte que, à bord du *Beagle*, il était un croyant convaincu. Sans qu'il le dise explicitement, on sent que, comme Ussher, il prenait la Bible au pied de la lettre. Une telle attitude ne pouvait résister longtemps à un esprit méditatif, enclin à la réflexion et la critique. Les miracles, notamment, font pour lui problème, ainsi que la coexistence de tant de religions diverses. Désireux de garder sa foi intacte, il fait des rêves éveillés au cours desquels il imagine la découverte de documents inconnus datant du premier siècle après Jésus-Christ et apportant une confirmation éclatante de la véracité de l'Evangile. Pourtant, ne voyant guère quel aurait pu être la nature de telles preuves, Darwin finit par abandonner sa foi et devenir d iste, puis agnostique. Il est choqué par le caractère vindicatif du Dieu de l'Ancien Testament. Il ajoute: «[...] je peux difficilement admettre que quelqu'un puisse souhaiter que le christianisme soit vrai; car, si c'était le cas, la lettre semble

clairement indiquer que les hommes qui ne croient pas, dont mon père, mon frère et presque tous mes meilleurs amis, seront punis éternellement.» [13]

On ne peut s'empêcher d'ajouter le bon et généreux Charles Darwin à la liste des hommes qui ne pourraient connaître les abominations de l'Enfer sans nous choquer profondément. N'écrit-il pas naïvement dans son *Autobiographie*: «Je les aime [les romans d'imagination] tous, à condition qu'ils ne finissent pas mal [...]. A mon goût, un roman n'est pas réussi s'il ne s'y trouve aucun personnage que l'on puisse aimer entièrement [...]» [13]

Si les femmes sont absentes de la liste de Darwin, c'est que, dans sa famille, et plus généralement à son époque, presque toutes les femmes étaient croyantes. C'était en tout cas vrai d'Emma Wedgwood, l'épouse de Charles qui, une fois veuve, dissuada son fils Francis de publier les sentiments de Charles vis-à-vis de la foi chrétienne.

Chose remarquable, c'est de l'œuvre de Darwin que les darwinistes tirent un antidote contre un vieil argument de Paley, argument que Darwin lui-même avait fait sien lors de son séjour à Cambridge.

Le théologien William Paley (1743-1805) est célèbre dans les pays anglosaxons pour sa *Théologie naturelle*, un ouvrage invoquant la finalité patente de la nature, preuve selon Paley de l'existence de Dieu. Richard Dawkins, dans *L'horloger aveugle* [16], en cite un passage fameux: «[...] Supposons que j'eusse trouvé une montre par terre, et qu'on s'inquiétât de savoir comment la montre pût se trouver en cet endroit; [...] il fallait que la montre eût un créateur; [...] il avait dû exister [...] en un lieu quelconque, un ou des artisans, qui l'avaient façonnée en vue de l'exigence à laquelle nous constatons qu'elle répond effectivement; qui en appréhendaient l'assemblage, et qui en avaient conçu l'image.»

Paley, bien sûr, pense à l'homme et à la perfection de sa facture. Il ne doute pas qu'elle ne réponde à un dessein du Créateur. Comme la montre a été conçue et assemblée par un horloger, l'être humain a été conçu et créé par Dieu. Darwin n'accepte plus cette argumentation. Suivant l'expression de Dawkins, l'horloger de l'homme est un *horloger aveugle*: il s'agit de la *sélection naturelle* qui ignore toute finalité. La perfection de la créature ne doit pas nous abuser sur l'identité de l'horloger. Il ne nous reste qu'à nous interroger sur la nature des lois qui ont permis à la sélection naturelle de s'exprimer.

L'œuvre de Darwin a joué un rôle important dans l'histoire des idées parce que, bien plus que celle de Galilée, elle est incompatible avec la lecture littérale de la Bible. Le rapprochement n'est pas innocent: pour que le pape Jean-Paul II reconnaisse les erreurs de l'Eglise envers Galilée, il faudra attendre le 31 octobre 1996, cinq jours avant que l'univers eût fêté les 6000 ans de sa création – le compte est bon car, si le calendrier julien avait été encore en vigueur, l'encyclique aurait été datée du 18 octobre 1996. Quant à l'évolution, c'est au travers de l'encyclique *Humani Generis*, parue en 1950, que le pape Pie XII «[...] n'interdit pas que, en conformité avec l'état actuel des sciences humaines et de la théologie sacrée, des hommes⁴ experts dans les deux domaines mènent des recherches et des discussions sur la théorie de l'évolution [...]».

⁴ C'est nous qui soulignons.

On ne pourra accuser l'Église d'évoluer trop rapidement.

Lors de la parution de *L'Origine des espèces*, l'église anglicane se remet plus rapidement du choc. A sa mort, Darwin est enseveli aux côtés de Newton, dans l'abbaye de Westminster, avec l'éloge des prélats. Il a été l'un des grands révolutionnaires de l'histoire des idées. Rien, pourtant, ne semblait le destiner à ce rôle. Il n'avait pour lui que sa passion de la nature, son intelligence, son besoin de comprendre et son honnêteté. C'est la raison pour laquelle son œuvre ne disparaîtra jamais.

La physique défie les sciences de la Terre

En physique, les notions de chaleur et d'énergie n'ont été comprises qu'au cours du XIX^e siècle. Nous savons aujourd'hui que l'énergie se conserve, que le mouvement perpétuel envisagé comme un moteur n'utilisant pas de carburant n'est qu'une utopie.

Dès lors que l'énergie se conserve, on peut en faire un bilan quantitatif. Cette remarque concerne notamment l'énergie solaire. Elle a beau être à l'origine de la pluie et de la neige, des tempêtes et des orages, elle ne saurait être la cause des éruptions volcaniques et des séismes et le moteur de la surrection des chaînes de montagnes. Le bilan énergétique l'interdit. En d'autres termes, *l'activité tellurique que Lyell lisait dans le passé de la Terre n'est pas concevable sans une source plus active que l'énergie solaire*, ce qui pose du même coup la question de l'âge de la Terre: toute source d'énergie finit par s'épuiser même si, *à l'échelle de notre civilisation, les énergies géothermique et solaire sont inépuisables*. C'est la raison pour laquelle on la qualifie de source d'énergie renouvelable.

Selon l'idée que l'on se faisait de la nature de l'énergie issue des entrailles de la Terre, elle devait s'épuiser plus ou moins rapidement. Déterminer l'origine de cette source énergétique revenait à fixer une borne à l'âge de la Terre et entrer ainsi en conflit avec Lyell qui, ignorant cette contrainte, ne se gênait pas pour renvoyer sa naissance dans un passé infiniment reculé. Lord Kelvin ne s'est pas privé de le faire. Les géologues en ont gardé un souvenir cuisant et durable [17].

L'arrogance de William Thomson

Le physicien William Thomson (1824-1907) mérite pleinement le qualificatif d'enfant prodige. Né à Belfast, il passe son enfance en Irlande. Dès l'âge de dix ans, il suit les cours de l'Université de Glasgow. A dix-sept ans, il entre à Cambridge et, à 22 ans, il est nommé professeur de philosophie naturelle à Glasgow. Pour tous ceux qui l'ont connu, il est un modèle de confiance en soi – certains parleraient d'arrogance. Ce qui paie toujours: il devient Sir William en 1866, puis Lord Kelvin en 1892, nom sous lequel la communauté scientifique le connaît, les Thomson et les Thompson foisonnant en histoire des sciences. Au risque de commettre maints anachronismes dans la suite du récit, on le désignera par la suite sous le nom de Kelvin.

On ne peut le contester, Kelvin était un grand physicien, un travailleur infatigable qui a laissé un nom aussi bien en thermodynamique qu'en électricité. Au milieu des années 1850, il a risqué sa vie à plusieurs reprises comme consultant et animateur lors de la pose d'un câble sous-marin destiné à la télégraphie entre l'Europe et l'Amérique. Cette aventure, achevée avec succès en 1865, lui valut son premier anoblissement et des revenus importants qui lui permettront d'acquérir une baronnie. Trois anecdotes parmi bien d'autres feront mieux comprendre la personnalité de Kelvin.

Au moment où, à Cambridge, on proclame les résultats des examens qui couronnent la fin de ses études, Kelvin, sûr d'avoir remporté la palme, fait venir son serviteur (décidément, les temps ont changé depuis l'ère victorienne): «Descendez à la salle du Sénat et voyez qui est le *Second Wrangler*⁵!» A son retour, le messager a probablement un petit sourire quand il annonce: «C'est vous, Sir!»

En 1895, Kelvin déclare: «Les machines volantes plus lourdes que l'air sont impossibles.» La véracité de la troisième anecdote n'est pas certifiée, mais elle est si parfaitement dans l'esprit du personnage qu'elle mérite d'être citée. Lors d'une conférence donnée en 1900 à un parterre de physiciens britanniques, il aurait affirmé: «Il n'y a plus rien de nouveau à découvrir en physique. Il ne nous reste plus qu'à affiner nos méthodes de mesure». Ces deux déclarations sont caractéristiques d'un savant qui prend de l'âge mais n'en acquiert pas pour autant la sagesse. Des affirmations de ce type ne sont pas rares chez Kelvin, de sorte que les mauvaises langues ont prétendu que, si Kelvin était incapable de se tromper dans la première partie de sa carrière, tout ce qu'il a dit par la suite était faux. On tremble à l'idée que cette évolution ne soit pas réservée au seul Kelvin.

Son nom a été donné à l'*échelle absolue* des températures qui a pour *origine*, ou *zéro*, la température la plus basse possible, le «zéro absolu». A la pression d'une atmosphère, la glace fond à 273 K (*Kelvin*) et l'eau bout à 373 K: les échelles Kelvin et Celsius sont décalées l'une par rapport à l'autre. C'est dire que Kelvin a participé au développement de la thermodynamique et étudié le transport de la chaleur. Il a le sentiment que ces deux disciplines ne devraient pas être ignorées de la géologie. Il veut montrer qu'elles condamnent le gradualisme de Lyell.

Kelvin part en guerre contre Lyell

Le volcanisme prouve qu'il règne une température élevée à l'intérieur de la Terre. Quand on s'enfonce dans un puits de mine, la température augmente de 2 ou 3 degrés Celsius chaque fois que l'on gagne 100 mètres, ce qui donne une première indication sur les conditions qui règnent en profondeur. Au centre de la Terre, la température est de l'ordre de 4000 à 4500°C.

Au début du XIX^e siècle, on ne connaissait pas la véritable nature de la chaleur, souvent considérée comme une substance que l'on ne parvenait pas

⁵ Dans l'argot de Cambridge, le numéro deux par ordre d'excellence.

à isoler. Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), préfet de l'Isère sous le Consulat et l'Empire, égyptologue et protecteur de Champollion, ne s'en soucie pas: il établit les lois de la conduction de la chaleur dans les solides. Elles décrivent de quelle manière la température évolue dans une cuiller métallique plongée dans une tasse de café brûlant ou à l'intérieur d'une dinde placée dans un four préalablement chauffé. Finalement, vers 1850, la thermodynamique se met en place, et Kelvin participe à l'entreprise. Les physiciens prennent conscience du fait que la chaleur n'est pas une substance, mais une forme de l'énergie.

Pour réfuter la doctrine de Lyell, Kelvin se charge de démontrer deux points. Tout d'abord, dans le passé, les conditions à la surface de la Terre devaient différer de celles que l'on observe aujourd'hui. Deuxièmement, la Terre est beaucoup plus récente que ne le prétend Lyell. Kelvin porte son attaque sur deux fronts. Il commence par affirmer que le Soleil est en train de se refroidir, faute de carburant.

Pour allumer une lampe électrique, nous enclenchons un courant qui permet à l'ampoule de s'échauffer rapidement, puis de maintenir sa température et sa luminosité inchangées. Le courant fournit constamment à la lampe une énergie destinée à remplacer celle qu'elle dissipe sous forme de lumière et de chaleur. Quand nous coupons le courant, nous supprimons la source d'énergie de la lampe qui cesse de fonctionner parce qu'elle se refroidit.

Toutes proportions gardées, affirme Kelvin, le Soleil en fait de même. Il s'est formé par la condensation d'un nuage de gaz et de poussières. Une fois que, dans le nuage initial, une région plus dense est apparue, elle a attiré peu à peu le gaz voisin grâce aux effets de la pesanteur. A mesure que la boule grossissait, sa pression interne augmentait. Plus le gaz a été comprimé, plus il s'est échauffé. Une fois le noyau du futur Soleil formé, sa température était très élevée: la phase de contraction correspond au passage du courant dans la lampe électrique. Puis, le Soleil ayant atteint son volume et sa masse actuels, Kelvin suppose à tort qu'il est devenu une masse liquide incandescente. Il en conclut que sa source d'énergie, la pesanteur, s'étant définitivement tarie, tout s'est passé comme si l'on coupait le courant: notre étoile a commencé à se refroidir.

En réalité, Kelvin ignore aussi bien les détails de la formation du Soleil que sa composition – essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium. Il se contente d'affirmer que, lors d'une phase de contraction, *la pesanteur est la seule source d'énergie connue capable d'alimenter le rayonnement solaire*. Ce qui lui permet de fixer une limite très approximative à l'âge du Soleil, à savoir 100 millions d'années, et aussi d'attaquer le gradualisme: si le Soleil se refroidit, comment imaginer que, ici-bas, les conditions climatiques soient restées les mêmes? [18] Pauvres habitants de la Terre qui, ayant failli geler à l'époque de Kelvin, risquent aujourd'hui de bouillir sous les menaces de l'effet de serre!

Puis Kelvin porte une deuxième attaque au gradualisme. Il évoque l'intérieur de notre globe où règne une température élevée. Kelvin lui attribue une origine analogue à celle qui fait de notre Soleil un astre très chaud. Compte tenu du fait qu'il n'a pas toutes les cartes en main, son raisonnement est parfaitement acceptable. Quitte à simplifier outrageusement, on peut dire que les planètes se sont formées, comme le Soleil, par agrégation de matière,

à cela près que la Terre, trop peu massive, n'a pas su retenir les gaz légers que sont l'hydrogène et l'hélium. Il en est de même de Mercure, de Vénus, de Mars et de la Lune. Notre planète est essentiellement rocheuse et métallique (elle contient des quantités importantes de fer de nickel). En ce qui concerne la température, l'analogie avec la formation du Soleil est valable: au moment de sa formation, notre planète devait être un véritable enfer.

Poursuivant son parallèle avec le Soleil, Kelvin affirme que la Terre, elle aussi, doit se refroidir, faute de carburant: dans des conditions très générales, respectées sur Terre, la chaleur passe d'un corps chaud à un corps froid. Elle se dirige donc de l'intérieur de la Terre vers sa surface, d'où elle se dissipe dans l'espace. Ce type de refroidissement, tout le monde le connaît. Les nuits d'hiver, quand les étoiles constellent la voûte céleste, le sol se recouvre de givre à mesure que la chaleur se disperse dans l'atmosphère. Elle prend la forme d'un rayonnement infrarouge invisible pour notre œil. En revanche, si une couverture nuageuse cache aussi bien la Lune que les étoiles, les nuages forment une barrière réfléchissante pour la chaleur rayonnée par le sol. Le bilan énergétique est différent et le sol se refroidit moins vite.

Kelvin en conclut que, par le passé, l'intérieur de la Terre devait être plus chaud et, en surface, les éruptions volcaniques plus nombreuses, les vents plus violents, l'érosion et la sédimentation plus rapides. De cette façon, Kelvin condamne une seconde fois le gradualisme qui proclame que les processus se sont toujours déroulés d'un même pas à la surface de notre globe.

Kelvin va plus loin. Il se sert de la théorie de Fourier pour décrire le processus de refroidissement de la Terre et l'âge de la Terre. En 1866, il écrit un article intitulé *Brève réfutation de la doctrine de l'uniformité en géologie*, dans lequel il évalue l'âge de la Terre [19]. Une publication à sa manière. En quelques lignes, les calculs, très abrégés, étant relégués dans un appendice, Kelvin règle son compte à l'uniformitarisme de Lyell – et aussi, on le verra plus bas, à Darwin et à la théorie de l'évolution. Pour faire ses calculs, Kelvin a besoin de données numériques. Il imagine d'abord que, à l'origine, la Terre était liquide, sa température était uniforme et comprise entre 7000 et 10 000 degrés Fahrenheit (environ 3850 et 5550°C). Il s'agit-là d'une évaluation de la température de fusion des roches aux pressions qui règnent aux grandes profondeurs. Faute de mieux, Kelvin admet encore que, si l'on oublie les effets de la température et de la pression, variables avec la distance au centre de la Terre, les roches qui constituent notre planète ont partout les mêmes propriétés.

L'article de Kelvin est d'une brièveté sans égale si l'on songe qu'il devait porter un coup mortel à une théorie admise par la grande majorité des géologues. Comme l'affirme Stephen Gould [20], pourtant plein de respect à l'égard de ce travail: «Si je devais désigner le titre d'article scientifique le plus arrogant de l'histoire, mon vote irait sans hésitation au célèbre article écrit en 1866 par Lord Kelvin.» Gould se réfère ici à la brièveté de l'article de Kelvin qui ne comporte qu'une page A4, calculs compris. Mais le texte incriminé repose sur une publication plus ancienne et plus détaillée [21], si bien que l'arrogance de Kelvin est moins manifeste que ne le prétend Gould.

Kelvin assigne à la Terre un âge approximatif de 100 millions d'années, mais il est conscient des incertitudes associées à son évaluation. Certains de ses contemporains, reprenant l'estimation de cette valeur, la ramènent à envi-

ron 20 millions d'années. Ses résultats inquiètent les partisans du gradualisme, et notamment Darwin. Avant de revenir sur les conséquences de l'article de Kelvin, il convient de faire quelques remarques.

Kelvin n'était pas le premier à évaluer de cette manière l'âge de la Terre. En 1820, Fourier avait voulu le déterminer en utilisant les mêmes méthodes que Kelvin – finalement, c'est lui qui les avait mises au point! Bien que Fourier eût obtenu une valeur proche de celle de Kelvin, il avait renoncé à la publier, la trouvant bien trop grande [18]. L'avantage de Kelvin sur Fourier a été de vivre à un moment où le gradualisme régnait et où un âge de l'ordre de 100 millions d'années, au lieu d'être ridiculement grand, surprenait par sa modestie. Pour un savant comme pour un artiste, il ne faut naître ni trop tôt ni trop tard.

En définitive, le travail de Kelvin était raisonnable et utile. Comme il le dit explicitement lorsqu'il s'interroge sur la formation du Soleil, ses conclusions sont valables «à moins que de nouvelles sources de chaleur, inconnues de nous à ce jour, fermentent dans le grand entrepôt de la Création» [18]. Il a parfaitement raison.

Kelvin menace-t-il l'évolution darwinienne?

Sans datation précise des roches fossilifères, il est impossible d'évaluer la durée immense de l'évolution darwinienne. Il a fallu que la vie apparaisse sur Terre, que les unicellulaires s'adaptent à des milieux très hostiles et deviennent de plus en plus complexes, que des êtres multicellulaires se manifestent puis se diversifient, que les plantes et les animaux se différencient, que les insectes envahissent la surface du globe, que les vertébrés se développent, que les mammifères puis les primates voient le jour et qu'enfin nos semblables colonisent la planète bleue. Mais comment mettre un nombre vis-à-vis d'une telle longueur de temps?

Darwin ne pouvait y parvenir, mais les conclusions de Kelvin n'étaient pas faites pour lui plaire. Elles imposaient une contrainte très restrictive à la durée de l'évolution, surtout si l'on admettait que, plus on remontait dans le passé, plus la Terre s'échauffait, ce qui la rendait moins habitable. On peut comprendre les craintes de Darwin.

Si l'on en croit Bonaparte, il s'est écoulé quatre mille ans depuis que Chéops entreprit de bâtir son fameux mausolée: «Soldats, du haut de ces pyramides, quarante siècles vous contemplant!». Si tant est qu'il ait réellement prononcé cette phrase, Bonaparte n'exagérait pas, bien au contraire, puisque ce pharaon a régné de 2551 à 2528 et que sa pyramide a plus de 4500 ans. Or, depuis l'époque de Chéops, ni les animaux sauvages ni les êtres humains n'ont changé de manière appréciable. Seuls les animaux domestiques comme les chiens ou les ruminants se sont modifiés, mais exclusivement sous l'effet de la sélection artificielle dirigée par l'homme. Quant aux chats, qui aiment leur indépendance et détestent se faire manipuler, ils sont presque identiques à ceux qui rôdaient autour du chantier des pyramides de Gizeh.

Or vingt millions d'années, c'est une durée cinq mille fois plus longue que le temps qui nous sépare de Chéops. Peut-on vraiment y loger toute la durée d'une évolution capable de passer de certaines souches de bactéries au

papillon et à l'être humain? C'est ce que devait se demander Darwin à la lecture des articles de Kelvin et de ses partisans. Il devait aussi se demander comment la vie avait pu naître sur une Terre bien plus chaude qu'aujourd'hui.

Comme la physique, la géologie de la fin du XIX^e siècle se trouvait dans une impasse, mais ni l'une ni l'autre n'en étaient réellement conscientes. Et pour les deux disciplines, le salut allait venir des découvertes de la physique moderne.

2 LA RADIOACTIVITÉ PEUT GUÉRIR ET PEUT TUER

«L'Éternel Dieu dit: Il n'est pas bon que l'homme soit seul; je lui ferai une aide semblable à lui.»
[Genèse 2, 18]

L'importance de la découverte de la radioactivité

La radioactivité a été découverte par hasard. Quatre savants, Becquerel, Pierre et Marie Curie et Rutherford se sont illustrés dans les premières années de son histoire. A eux quatre, ils ont reçu cinq prix Nobel puisque Marie Curie a été couronnée deux fois. La radioactivité a suscité un vif intérêt et des espoirs très grands. En raison des possibles applications médicales de ses recherches, Marie Curie n'a jamais voulu voir dans cette découverte qu'un bienfait pour l'humanité. Mais, à mesure que le temps passait, la radioactivité a inspiré des craintes à la hauteur des espoirs que l'on avait placés en elle. Marie Curie elle-même est morte d'avoir été exposée sans protection et des années durant à des radiations dont elle avait voulu ignorer les dangers. Dans l'esprit du public, l'image de la radioactivité a basculé après les explosions d'Hiroshima et de Nagasaki. De nos jours, les centrales nucléaires qui traitent les matériaux radioactifs sont devenues les cibles préférées des écologistes.

Ce chapitre est consacré à l'histoire de la découverte de la radioactivité. Par souci de simplification, l'accent y est mis sur les quatre lauréats du prix Nobel mentionnés plus haut. Parmi ces quatre noms, celui de Marie Curie est l'objet d'un développement tout particulier parce que, dans l'histoire des sciences, les femmes méritent qu'on s'arrête longuement sur leur cas. L'histoire de Marie ne peut se dissocier de celle de Pierre. Le couple Curie est très célèbre, et même trop célèbre, parce que la légende a gommé la véritable histoire des deux savants. Dans l'imagerie d'Epinal, Marie est une figure de sainte laïque et de *savante* que les malheurs n'ont pas épargnée. La forme même de la phrase qui précède est un aspect du handicap sérieux que Marie Curie dut affronter puisque le substantif «savant» n'existe pas au féminin. Toute l'ambiguïté du statut de la femme de science est là.

La vraie histoire des Curie est beaucoup plus complexe et beaucoup plus tortueuse que ce que leurs hagiographes ont voulu nous faire croire. Ils ont transformé Marie, cette «femme honorable» [22], en Cendrillon.

Lumière et ondes radio, infrarouges et ultraviolets: une question de fréquence

Celui par qui tout est arrivé est français. Il s'appelle Henri Becquerel (1852-1908). Il appartient à une de ces remarquables dynasties scientifiques qui alimentent la polémique sur les parts respectives de l'inné et de l'acquis dans le domaine de l'esprit humain – les anglo-saxons parlent à ce propos de débat *nature-nurture*. Cette importante question qui pourrait, qui devrait être scientifique, est victime de préjugés de nature socio-politique et de la vogue du politiquement correct. On ne pourra lui donner de réponse valable tant que l'idéologie mènera le jeu, ce qui est toujours le cas quand il s'agit de la structure et du fonctionnement de la société.

Pour en revenir à la dynastie Becquerel, le grand-père, Antoine, était un physicien connu, professeur au Museum d'Histoire Naturelle et membre de l'Académie des Sciences. Son fils Edmond lui succéda dans ces deux charges. On peut en dire autant d'Henri, fils d'Edmond, qui eut l'honneur supplémentaire de partager avec Pierre et Marie Curie le prix Nobel 1903 pour la découverte de la radioactivité. Mais c'était un spécialiste de la fluorescence et c'est au cours d'une expérience portant sur son domaine favori qu'il allait faire la découverte qui l'a rendu illustre. La compréhension de ce phénomène passe par celle des ondes électromagnétiques et de leur fréquence.

La lumière est émise par d'innombrables sources naturelles: le Soleil et la Lune, les étoiles, la foudre ou les vers luisants. Elle résulte aussi de l'activité de l'homme. Nos ancêtres ont commencé par domestiquer le feu avant que nous ne découvrions l'électricité et ses multiples applications. Depuis le XIX^e siècle, on sait que la lumière présente une analogie superficielle avec les ondes sonores, si bien que le physicien parle des *ondes lumineuses*. Mais ce qui les rapproche n'est rien en comparaison de ce qui les sépare. Contrairement au son, les ondes lumineuses se propagent dans le vide où leur vitesse atteint 300 000 km/sec. Elles sont presque un million de fois plus véloces que le son dans l'atmosphère. Si on laisse de côté leur mobilité, on ne peut omettre leur *fréquence*, une caractéristique que partagent tous les types d'ondes.

S'interroger sur la fréquence annuelle des heures de soleil sur le lac Léman, c'est compter le nombre moyen d'heures d'insolation que l'on y observe tout au long de l'année; à Lausanne, il s'élève environ à 2000 heures par an. On peut aussi se demander combien d'orages éclatent en moyenne au mois de juillet. Dans les deux exemples cités, la réponse est donnée par un nombre – celui des heures de soleil ou celui des orages – divisé par une durée bien déterminée. Si l'intervalle de temps pendant lequel la mesure a été faite n'est pas précisé, le nombre obtenu et la fréquence que l'on en déduirait n'ont pas de sens. Il arrive qu'un phénomène observé soit *strictement périodique*. La Terre tourne autour de son axe en vingt-quatre heures. On connaît un corps céleste qui accomplit la même performance 641 fois par seconde, ce que l'on traduit en disant que sa fréquence de rotation est de 641 *hertz*¹.

La lumière est un phénomène vibratoire provoqué par l'oscillation des électrons appartenant en général aux atomes ou aux molécules. C'est la

¹ Comme le mètre est une unité de longueur, le hertz est une unité de fréquence.

fréquence d'oscillation des charges électriques qui détermine celle des ondes émises. Les électrons se rencontrent n'importe où, et notamment dans les instruments que nous fabriquons, si bien que la fréquence qui caractérise les ondes émises de cette façon ne souffre pas de limitation. On leur donne le nom d'*ondes électromagnétiques*.

Notre œil n'est sensible aux ondes électromagnétiques que lorsque leur fréquence appartient à la *bande du visible*. Notre cerveau, informé par le nerf optique, traduit la valeur de la fréquence par l'entremise d'une notion psychologique remarquable, la *couleur*. Du violet au rouge en passant par le bleu, le vert, le jaune et l'orangé, la fréquence décroît régulièrement: elle passe de $7,5 \cdot 10^{14}$ hertz (violet extrême) à $4,3 \cdot 10^{14}$ hertz (rouge extrême)²: *la fréquence de la lumière visible se compte en centaines de milliers de milliards de hertz*.

On l'a compris: la lumière ne constitue qu'un exemple d'ondes électromagnétiques. Rien ne les empêche d'exister à d'autres fréquences. Pour les fréquences proches mais plus élevées que celles du visible, on distingue les *ultraviolets* (UV) dont la couche d'ozone de la haute atmosphère nous protège. Les UV sont susceptibles de provoquer des brûlures de peau et, plus généralement, de décomposer de nombreuses molécules. Pour les abeilles, la bande du visible est décalée vers les hautes fréquences: elles ne perçoivent pas le rouge mais sont sensibles à certains UV, si bien que, sur des fleurs qui nous paraissent uniformément blanches, elles distinguent des motifs «colorés en UV» qui balisent pour elles le chemin du nectar. Il s'agit là d'une aide bienvenue car, dotées d'*yeux à facettes*, les abeilles ont la vue très basse.

Si la fréquence s'élève encore, on parvient dans le domaine des *rayons X*, découverts en 1895 par Wilhelm Konrad Roentgen (1845-1923). Il s'agit là d'un rayonnement très pénétrant capable de se propager dans les milieux organiques, ce qui explique leurs applications médicales. La profondeur de pénétration dépend de la nature du tissu traversé; ce taux est particulièrement faible en présence d'un os. Les *rayons gamma*, enfin, correspondent aux fréquences les plus élevées que l'on connaisse: on aura l'occasion d'en parler plus loin.

Lorsque l'on aborde les fréquences inférieures à celles du visible, on rencontre d'abord les *infrarouges* (IR) qui créent en nous une sensation de chaleur quand nous y sommes exposés. Lorsque la fréquence diminue encore, on passe aux *micro-ondes* dont les applications culinaires sont peu prisées des gastronomes. Quant aux *ondes radio*, elles sont utilisées pour la transmission des informations, que ce soit par la radio, la télévision ou le radar. Les charges électriques qui les produisent oscillent dans des antennes prévues à cet effet. On représente le *spectre* des ondes électromagnétiques en les distribuant selon leur fréquence (fig. 2.1).

² 10^{14} est un exemple de *notation exponentielle*. Le lecteur qui ne serait pas familier avec cette notation peut se reporter à l'annexe 1.

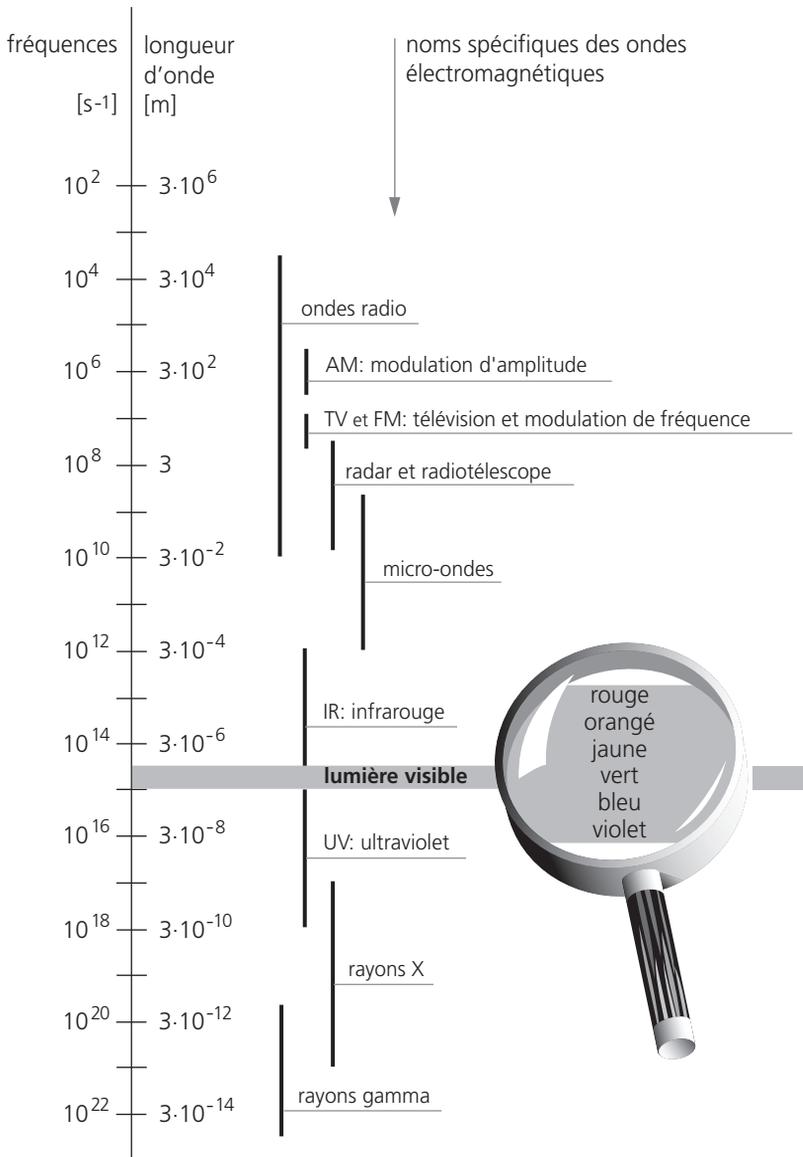


Fig. 2.1 Le spectre des ondes électromagnétiques: leur spécificité est reportée en fonction de leur fréquence dans le vide. Il n'y a pas de limite fixe entre catégories distinctes, excepté aux bornes de la bande réservée à la lumière visible, où l'on passe brusquement de l'infrarouge invisible au rouge et du violet à l'ultraviolet invisible. Au lieu de la fréquence, la longueur d'onde est utilisée pour caractériser les ondes électromagnétiques. Elle est donnée par le rapport entre la vitesse et la fréquence de l'onde.

Un phénomène spectaculaire: la fluorescence

Certains corps deviennent lumineux s'ils sont soumis à un rayonnement ultraviolet (UV): il s'agit là d'un cas spectaculaire de *fluorescence*. Le Soleil émet des UV, mais il n'est pas le seul dans ce cas. Pourvu que sa température soit assez élevée, n'importe quel corps est une source d'UV. Ce sont eux qui sont responsables de nos coups de soleil; l'atmosphère nous assure une protection qui croît en proportion de son épaisseur. Notre œil étant insensible aux UV, la fluorescence qu'ils produisent est particulièrement spectaculaire. A l'aide de filtres, on peut supprimer toutes les composantes d'un faisceau lumineux qui impressionnent notre rétine pour n'en laisser passer que les UV. On les dirige alors sur un composé chimique fluorescent dans une salle qui, pour notre œil, est obscure (fig. 2.2). Seule la cible irradie d'une lumière à la fois douce et froide, analogue à celle que dispense au printemps le ballet silencieux des lucioles. Suivant la fréquence de la source et la nature du composé, la lumière émise voit sa couleur varier.

Une fois que l'irradiation s'interrompt, l'émission fluorescente cesse instantanément. Si elle se poursuit tout en s'atténuant, on parle alors de *phosphorescence*, mais nous n'avons pas à nous préoccuper ici de la différence entre les deux phénomènes. A l'époque qui nous intéresse, Becquerel est considéré comme le spécialiste de la phosphorescence comme celui de la fluorescence.

Les rayons uraniques

Faute d'avoir été interprétée correctement à sa naissance, la radioactivité n'a pas été baptisée par celui qui l'a découverte. Elle est le fruit illégitime mais vigoureux d'une conception erronée de la fluorescence.

En février 1896, Henri Becquerel met en route les expériences qui vont l'amener malgré lui à la découverte du phénomène. Il bénéficie d'un premier hasard. Bien qu'il soit spécialiste de la fluorescence, il n'apprécie pas à sa juste valeur une de ses caractéristiques immuables selon laquelle *la fréquence émise par le composé irradié est inférieure à celle de la source de l'irradiation*. Cette règle peut être masquée par des phénomènes parasites: il ne faut pas s'étonner que Becquerel ne l'ait pas prise en compte lors de ses expériences cruciales. Quelle qu'en soit la raison, il décide de tester certains matériaux fluorescents exposés au soleil: il espère qu'ils vont émettre des rayons X. Un coup d'œil à la figure 2.1 montre que l'entreprise est vouée à l'échec: la fréquence des rayons X dépasse à tel point celle de la bande du visible qu'un objet exposé à la lumière est incapable d'émettre des rayons X par fluorescence. Maintenant que nous connaissons les dangers des rayons X, on ne peut que s'en féliciter.

Roentgen l'avait relevé lors de sa première publication: le rayonnement X impressionne la plaque photographique. Becquerel décide d'utiliser cette propriété pour déceler leur présence éventuelle. Il soumet une journée entière des lamelles de cristal à la lumière solaire en espérant que ce traitement va provoquer des rayons X. Leur présence doit être révélée par des plaques

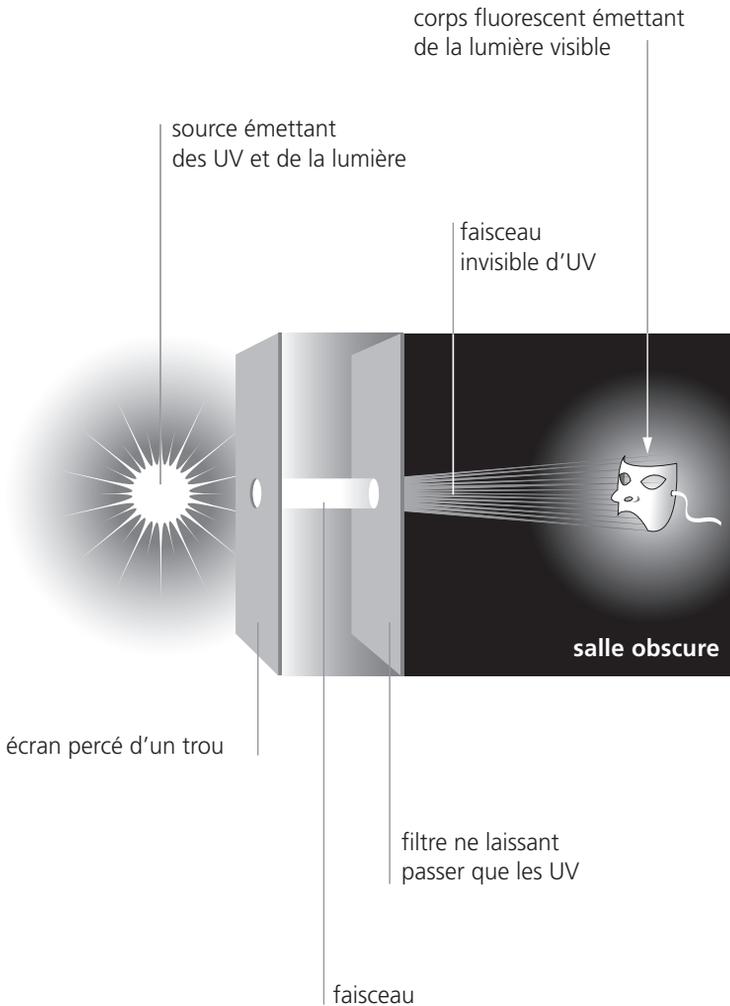


Fig. 2.2 Un composé fluorescent irradie lorsqu'il est soumis à un rayonnement ultraviolet.

photographiques directement placées derrière le cristal. Ces plaques sont enveloppées de papier noir. Il faut s'assurer que la couche sensible a été impressionnée, non par le soleil, mais par les rayons X recherchés. Au cas où les plaques se voileraient effectivement, Becquerel veut encore une autre preuve que les rayons X en sont la cause. Il dispose un réticule de fils métalliques entre les cristaux et les plaques: le rayonnement cherché traverse le papier noir mais non le métal.

Becquerel se met au travail au début de l'année 1896. Parmi les matériaux fluorescents qui s'offrent à lui, il choisit d'abord des sels de calcium qui ne donnent pas les résultats escomptés. En revanche, un composé cristallin de

sulfate d'uranium semble voiler la plaque photographique après exposition au soleil³. Mais le plus intéressant est encore à venir. Becquerel bénéficie d'un hasard favorable:

«Les 26 et 27 février, le soleil n'apparut que par intermittence. J'arrêtai toutes mes expériences et laissai les plaques dans le tiroir d'un meuble, avec les sels d'uranium en place. Le soleil n'apparut pas les jours suivants et je développai les plaques le 3 mars, m'attendant à ne trouver que de très faibles images. Les images des fils apparurent au contraire très nettement...» [23] Les fils auxquels Becquerel fait allusion sont des éléments du réticule métallique.

Ce qui frappe, dans cette anecdote, c'est que la méticulosité de Becquerel lui permet de tirer parti de circonstances inattendues. Puisque ce cristal n'a été exposé que quelques instants au soleil plutôt qu'une journée entière, Becquerel pourrait s'épargner la peine de développer les plaques. Il lui suffirait d'attendre que le beau temps revienne pour reprendre le même échantillon. Il est en droit de penser que les plaques sont vierges. Tout au contraire, Becquerel profite de l'occasion pour faire un test: il développe les plaques. Or la couche sensible a été impressionnée et, sur l'image ainsi obtenue, il distingue nettement les fils! Seul le métal a arrêté la radiation pénétrante encore inconnue mais dont le pouvoir de pénétration rappelle celui des rayons X. Puisque le soleil a fait défaut, Becquerel remarque correctement que la fluorescence du composé étudié ne semble pas être à l'origine du phénomène.

Becquerel commence alors une série d'expériences avec un éventail de composés différents. Le résultat est clair: tous les composés d'uranium – et eux seulement – impressionnent les plaques photographiques, qu'ils soient fluorescents ou non, maintenus à l'obscurité ou non. Becquerel attribue à juste titre le rayonnement observé à la présence de l'uranium en tant qu'élément dans la substance étudiée, et l'on parlera pendant quelques années de *rayons uraniques*.

Dans les semaines qui suivent sa découverte, Becquerel note que, après le passage des rayons uraniques dans l'air, des charges électriques apparaissent dans l'air. Il note aussi que le phénomène découvert est permanent. Les rayons uraniques restent toujours aussi intenses, même si l'on observe un même composé des mois ou même des années durant. Il s'agit là d'une caractéristique étonnante. Becquerel ne voit pas d'où vient l'énergie nécessaire à leur production.

Sur un point, cependant, Becquerel se trompe. Dans un premier temps, il croit pouvoir affirmer que, comme la lumière, les rayons uraniques obéissent à la loi de la réflexion comme à celle de la réfraction. Il faudra attendre une année ou deux pour que ces observations soient clarifiées.

La radioactivité doit son nom aux Curie

C'est en 1897 qu'entrent en scène Marie Sklodowska Curie (1867-1934) et son mari Pierre Curie (1859-1906).

³ Le lecteur intéressé trouvera un *tableau périodique* des éléments chimiques à l'annexe 2.

Maria Sklodowska naît à Varsovie dans une famille d'enseignants. Comme elle est femme, le pouvoir tsariste l'exclut d'office des études universitaires. Après avoir obtenu l'équivalent du baccalauréat, Maria gagne sa vie comme répétitrice dans une riche famille polonaise. A la barbe de la police tsariste, elle s'efforce également de transmettre quelques connaissances à ceux qui n'ont pas pu bénéficier d'une instruction suffisante. Elle y voit le moteur indispensable du progrès social. Elle a conclu un pacte avec Bronia, une de ses sœurs aînées partie étudier la médecine à Paris. Maria envoie régulièrement de l'argent à Bronia qui, ses études terminées, est prête à l'accueillir à Paris afin qu'elle puisse à son tour faire des études scientifiques à la Sorbonne. Entre temps, une idylle se noue entre Maria et Casimir, le fils aîné de la famille où elle enseigne. Ils font des projets de mariage. Là encore, Maria est victime d'une mesure d'exclusion, d'origine sociale cette fois. Quand bien même la famille de Casimir a d'abord traité sa jeune gouvernante avec respect et amitié, les choses changent. Un fils de famille fortunée n'épouse pas une simple gouvernante. Pendant quatre ans, jusqu'au départ de Maria pour Paris, l'amoureux tente en vain de fléchir ses parents. L'histoire ne rapporte pas la réaction de Casimir, futur professeur de mathématiques à l'Ecole Polytechnique de Varsovie, lorsque la gouvernante reçoit le prix Nobel.

C'est en 1891 que Maria Sklodowska arrive à Paris. Trois ans plus tard, à la veille de ses 27 ans, elle est licenciée ès sciences physiques et mathématiques de l'Université de Paris. Elle vient de faire la connaissance de Pierre Curie, physicien reconnu – au moins en dehors de la France. Avec Jacques, son frère aîné, Pierre Curie a découvert la *piézo-électricité*: la surface de certains cristaux se charge électriquement au moment où on les comprime. L'inverse est vrai. Quand ils sont soumis à des forces électriques périodiques, ces cristaux se mettent à osciller avec une fréquence très stable. Dans les montres actuelles, les quartz piézo-électriques remplacent les ressorts des anciennes montres mécaniques. Au lieu de remonter périodiquement sa montre, on se contente aujourd'hui de la munir d'une pile électrique.

Pourtant, à trente cinq ans, Pierre n'en est guère qu'au début de sa carrière. Chef de travaux à l'Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI), il achève un travail de doctorat au cours duquel il a découvert la *loi de Curie*, bien connue des spécialistes du magnétisme. Il publie également un travail de pionnier sur les rapports subtils qu'entretiennent la symétrie d'un milieu et les phénomènes physiques qui s'y déroulent. Curie est un physicien au plein sens du terme, mais sa carrière se heurte à des obstacles redoutables. Il est modeste, rêveur et ne sait pas se battre. Pourtant, grâce à l'intervention de Kelvin, Pierre Curie devient en 1894 professeur à l'ESPCI. Kelvin fait preuve ici de perspicacité, malgré ce que les méchantes langues avaient dit à son propos.

Entre Marie et Pierre naît une romance qui se termine par un mariage. Tenter d'en savoir plus ne serait pas facile, les documents qui subsistent ne le permettant pas. Leur discrétion n'a pas empêché la légende de s'emparer de leur idylle, tantôt la glorifiant, tantôt la déchirant.

En 1897, juste après la découverte des rayons uraniques, Marie Curie décide avec son mari d'approfondir le sujet en le choisissant comme thème de doctorat. Dès avril 1898, elle publie d'importants résultats. Elle confirme

d'abord les résultats antérieurs de Becquerel et découvre qu'un autre élément, le *thorium*, émet le même type de rayonnement que l'uranium. En ce qui concerne l'uranium, elle affirme que plus un composé contient de cet élément, plus il est actif. Cette affirmation est encore vague et sera précisée par la suite. Mais sa découverte la plus importante concerne deux minerais d'uranium dont l'activité est considérable. Il s'agit notamment de la *pechblende*, qui jouera un rôle important dans la vie de Marie. Elle en conclut que l'activité anormale du minerai est due à la présence d'un élément plus actif que l'uranium.

Dès lors, Pierre abandonne ses travaux pour collaborer directement avec sa femme. Cette même année 1898, les Curie découvrent un élément inconnu, qu'ils nomment *polonium*, et, à fin décembre, en collaboration avec le chimiste Gustave Bémont (1857-1932), le *radium*, qui allait faire leur renommée et celle de la science française pendant des décennies. Enfin ils baptisent du nom de *radioactivité* ce phénomène qui dépasse les sels uraniques.

Il ne suffit pas d'entrevoir le radium. Il faut encore en déterminer les propriétés physico-chimiques. On ne peut le faire qu'à la condition d'obtenir, à l'état pur, du radium métallique ou, à défaut, un composé parfaitement déterminé de cet élément. La quête de ce nouveau Saint-Graal va orner leur légende de toutes les enluminures nécessaires. Les Curie ne sont pas chimistes. C'est Bémont qui leur prodigue l'indispensable initiation à la chimie analytique en prenant part au travail commun. Les analyses se font dans un hangar abandonné, dépourvu de cheminées d'évacuation des gaz et ouvert à la pluie et au froid. Marie note un jour que la température n'y dépasse pas 6,25 °C. Les travaux de chimie analytique sont extrêmement longs et pénibles. Dans le minerai, le radium n'est présent qu'en quantité infime. Entre temps, André Debierne (1874-1949), ami et collaborateur des Curie, fera encore la découverte de l'*actinium*, mais celle-ci ne peut être comparée à celle du radium qui fera connaître la radioactivité au grand public.

Les Curie ne sont pas les seuls à s'intéresser à la radioactivité

Pendant que les Curie travaillent dans leur hangar, d'autres chercheurs s'intéressent à la radioactivité et obtiennent des résultats majeurs. Il est nécessaire de signaler ici quelques-unes de leurs découvertes. Un grand nombre d'entre elles seront réalisées par Rutherford, dont la vie et la carrière seront largement retracées dans un autre chapitre.

En 1898, Rutherford confirme un résultat de Becquerel. Comme les rayons X, la radioactivité constitue un *rayonnement ionisant*. Sur son passage, ce rayonnement arrache des *électrons* à certains atomes ou fragmente des molécules. Dans la mesure où les débris ainsi créés se chargent électriquement, ils deviennent des *ions*, ce qui facilite leur détection. Rutherford découvre également que ce rayonnement n'est pas homogène. Il nomme *rayonnement alpha* et *rayonnement bêta* ses deux composantes. Becquerel remarque que le rayonnement bêta est dévié par un aimant, ce qui implique qu'il est constitué de particules chargées dont on peut directement mesurer le rapport

entre charge électrique et masse. Il a le sentiment que le rayonnement bêta s'identifie à une émission d'électrons, ce qui sera vérifié quelques années plus tard. De son côté, Rutherford se rend compte que le rayonnement alpha est constitué d'ions d'hélium. Pour qu'il puisse confirmer définitivement cette hypothèse, il lui faudra attendre 1911, date à laquelle il parvient à élucider la structure de l'atome.

Les radioactivités alpha et bêta n'épuisent pas la liste des types de radioactivité connus. En 1900, le Français Paul Villard (1860-1934) met en évidence une nouvelle sorte de radioactivité caractérisée par l'émission d'un *rayonnement gamma*, une radiation très pénétrante qui n'est pas déviée lorsque l'on dispose des aimants sur son passage. Sa nature n'est définitivement établie qu'en 1914: il s'agit d'un rayonnement électromagnétique de fréquence encore plus élevée que celle des rayons X.

Le radium

Les raisons qui font du radium le prototype de l'élément radioactif sont multiples. L'une d'elles est particulièrement frappante. Marie Curie, qui consacre le plus clair de son temps aux analyses chimiques des substances traitées, constate que certaines d'entre elles irradient: le rayonnement radioactif émis à l'intérieur d'un composé de radium le rend lui-même luminescent. C'est là un phénomène spectaculaire, sans doute magique aux yeux de Marie Curie. Il a longtemps été utilisé pour la construction de cadrans lumineux: mélangé au bromure de radium, le sulfure de zinc devient luminescent. Cependant, les Curie n'imaginent pas que l'exposition aux radiations peut être dangereuse. La luminescence ne l'est pas, alors que sa cause, la radioactivité elle-même, peut être mortelle.

D'autres raisons font du radium une substance exceptionnelle: sa rareté et son activité considérable qui autorise l'espoir d'importantes applications médicales, tout au moins dans les premières années qui suivent sa découverte. En ce qui concerne la rareté du radium, il convient de noter que, pour extraire quelques milligrammes de radium de la pechblende, il faut en traiter des tonnes. Françoise Giroud résume très bien la situation: «Pour extraire l'uranium de la pechblende, il y a alors des usines. Pour en extraire le radium, il y a une femme dans un hangar.» [22] Mais quelle femme!

La radioactivité devient très rapidement un sujet important de la physique. Fin 1898, Marie Curie, revenant sur sa publication d'avril, fait un pas important: elle affirme que la radioactivité est une propriété atomique: les composés qu'elle a étudiés sont des composés ou des mélanges de composés d'uranium, mais seuls les atomes d'uranium présents contribuent aux propriétés radioactives de l'ensemble. En 1902, Rutherford et Soddy feront le pas décisif en écrivant que les corps radioactifs contiennent une certaine proportion d'atomes instables dont une fraction constante se désintègre dans l'unité de temps.

En 1900, Pierre Curie reçoit un message de l'Université de Genève. On lui offre une chaire de physique, la direction d'un laboratoire où Marie jouira

d'une situation officielle. Les conditions financières sont très séduisantes. Pierre hésite, accepte, refuse, hésite à nouveau, accepte encore pour tergiverser une nouvelle fois, refuser quand même, accepter derechef et finir par refuser. Parce qu'il est pitoyablement dépourvu de confiance en soi, il se ridiculise complètement sans se soucier de l'embarras dans lequel il plonge l'Université de Genève. Et pourtant cet épisode finit par être avantageux pour Pierre. Comme cela arrive fréquemment en pareil cas, la Sorbonne, qui n'avait pas voulu de Pierre deux ans plus tôt, décide de le garder en France. Sans pour cela lui attribuer une chaire: il est nommé «chargé de cours complémentaire». Aujourd'hui, on parlerait d'une nomination au titre de professeur associé ou assistant. Au même moment, Marie est chargée des conférences de physique à l'École Normale Supérieure de Jeunes Filles de Sèvres.

Le 25 juin 1903, Marie soutient une thèse de doctorat qu'elle n'a pu achever plus tôt. Elle est accablée de travail entre ses recherches, son enseignement et ses deux filles, Irène, future prix Nobel de chimie, et Eve, qui deviendra journaliste et biographe de sa mère. La même année, Pierre, pressenti, refuse la Légion d'Honneur. Il préférerait disposer d'un laboratoire. Marie, quant à elle, s'interdit de breveter la méthode d'extraction et de purification du radium qu'elle a mise au point. Elle renonce ainsi à une source considérable de profit qui aurait fait d'elle une multimillionnaire. L'idéalisme républicain de Marie est ici à son apogée. La notion de compromis est complètement étrangère à sa personnalité. Elle est entrée en science comme d'autres entrent au couvent. Elle en porte toujours les couleurs: le gris dans la vie quotidienne, le noir quand elle «s'habille».

Fin 1903, la nouvelle éclate comme une bombe: le prix Nobel de physique est décerné à Henri Becquerel et à Pierre et Marie Curie. Pierre n'est qu'un professeur subalterne et Marie vient de soutenir sa thèse de doctorat! Le gouvernement français se sent obligé de faire quelque chose pour son couple de lauréats. Il crée une chaire de physique générale en faveur de Pierre et un poste de chef de travaux pour Marie. Mais il n'octroie un laboratoire qu'au prix de marchandages et de tergiversations assez pénibles. De nos jours, cette situation est presque inimaginable, tout au moins en ce qui concerne les hommes.

Pour Marie, c'est le début de la gloire. Elle va le payer cher. Ce sont d'abord les journalistes qui harcèlent les Curie. Ce sont ensuite les invitations qui pleuvent mais qu'ils déclinent systématiquement. Ils sont les héros d'un sketch de cabaret et la cible privilégiée des dessinateurs de presse. Marie doit même refuser que l'on donne son nom à un cheval de course. Décidément, la vie de prêtresse de la science recèle des surprises. Autre sujet de préoccupation: les deux Curie souffrent d'une fatigue persistante dont ils ne comprennent pas l'origine. Ils ignorent qu'ils ont absorbé en quelques années une dose considérable de cette radioactivité qui les a rendus célèbres mais ruine leur santé.

Peu à peu Marie se familiarise avec les dégâts collatéraux de la gloire. Les Curie s'ouvrent avec prudence à la société de leur temps, ne limitant plus leurs fréquentations au seul cercle de leurs collègues les plus proches. Seule la présence des fâcheux exaspère Marie. Elle repousse aussi toute tentative de familiarité. Les manifestations de tendresse la plongent dans le désarroi.

Le veuvage

Le 19 avril 1906, Pierre Curie passe sous les roues d'un camion tiré par deux chevaux. Il meurt sur le coup.

Si l'on s'intéresse au statut social de Marie Curie, son long veuvage constitue une période bien différente de ce qu'avait été sa jeunesse. Dans la mémoire collective, les années qu'elle a passées en Pologne, puis les quinze ans qu'ont duré ses études et ses grandes découvertes s'apparentent à un conte de fées. Même la mort tragique de Pierre s'inscrit parfaitement dans la légende. Or, à partir de là, les choses vont changer très vite. On quitte le récit édifiant pour le film noir. Pourtant Marie Curie n'a pas changé. C'est son image ambiguë de femme de science adulée bien malgré elle qui ne coïncide pas avec sa vraie personnalité: «Elle avait perdu l'éclat de la jeunesse, mais flambait, dès qu'elle s'animait, de cette étrange beauté émaciée, brûlante d'intelligence, qui subjuguait ceux qui avaient l'honneur, chichement accordé, de la rencontrer. A moins que, glaciale, elle ne leur apparût au contraire insupportable et dénuée d'attraits.» [22] Il ne faut pas perdre de vue que, à son insu, Marie était constamment épuisée du fait des radiations nocives auxquelles elle s'exposait sans cesse.

Au début du mois de mai 1906, la chaire de physique générale créée pour Pierre est attribuée à Marie Curie, nommée chargée de cours. Pour la première fois, elle reçoit un salaire de l'université. Depuis la création de la Sorbonne, elle est la première femme à avoir le droit d'y enseigner. Elle sera nommée professeur en 1908.

Sa leçon inaugurale à la Sorbonne appartient encore à la légende édifiante, même si l'on y distingue déjà des grincements. Le 5 novembre 1906, il y a exactement quinze ans que la jeune étudiante est arrivée de sa Pologne natale pour suivre son premier cours de physique. Mais quand elle prend la parole à la Sorbonne pour sa première leçon, son audience n'est pas seulement composée d'étudiants. L'amphithéâtre est garni de journalistes et d'un public mondain dont le cadet des soucis est de comprendre ce qu'elle va dire. Au sein des représentants du Tout Paris, on remarque notamment la comtesse Greffulhe – l'un des modèles de Madame de Guermantes de *A la recherche du temps perdu*. Lorsque l'ovation se tait, Marie Curie reprend le cours de Pierre au point où il l'a laissé. Elle ne fait aucune concession aux mondanités.

La manière dont Marie Curie éduque ses enfants appartient également à la légende. Elle se refuse de les envoyer dans l'enseignement public. Elle organise une sorte d'école privée que fréquentent les enfants de ses collègues. Ce sont les parents qui enseignent. Comme ils sont professeurs à la Sorbonne ou au Collège de France, on comprend que les élèves en aient gardé un souvenir ébloui, quand bien même l'expérience ne dure que deux ans.

L'année 1911, en revanche, appartient au roman noir.

Marie pose d'abord sa candidature à l'Académie des Sciences à laquelle Pierre appartenait depuis 1905, l'année précédant sa mort. Les échos dans la presse sont favorables et l'Académie ne voit pas d'objection de principe à l'élection d'une femme. Mais elle compte en son sein des membres qui ne

l'admettent pas. Comme Marie est notamment en concurrence avec Edouard Branly (1844-1940), ils vont tout miser sur lui. Ses études sur la conductivité des empilements de sphères métalliques a eu des applications importantes pour la construction des récepteurs radio. Branly est âgé de soixante-six ans; il est catholique bon teint (il enseigne à l'Institut Catholique de Paris), il a tout pour plaire à la droite nationaliste encore meurtrie par l'affaire Dreyfus.

L'Intransigeant, journal nationaliste et antisémite, entame brusquement une campagne haineuse contre Marie Curie, coupable d'être polonaise et d'avoir épousé un bon Français auquel revenait tout le mérite du prix Nobel. Pour compléter le tableau, on soupçonne Marie de cacher quelque part un ancêtre juif. Le jour de l'élection à l'Académie, le président crie aux huissiers: «Laissez entrer tout le monde, les femmes exceptées!» Il est écouté. Marie Curie est battue.

Bien entendu, ce n'est pas sa défaite qui doit nous indigner. Pourquoi l'Académie des Sciences serait-elle à l'abri des errements qui ont rendu célèbre l'Académie Française? Celle-ci ne cessera jamais de susciter les moqueries quand on compare la liste de ses membres avec celles des grands écrivains qui n'en firent jamais partie. Qu'on se rappelle les vers de *Cyrano de Bergerac* où Rostand s'amuse à citer quelques immortels dont aucun d'entre nous n'a gardé le souvenir:

Voici Boudu, Boissat et Cureau de la Chambre;
Porchères, Colomby, Bourzeys, Bourdon, Arbaud...

Tous ces noms dont pas un ne mourra, que c'est beau! [24]

L'échec de Marie Curie à l'Académie des Sciences est d'autant moins choquant que Branly est un nom que l'histoire a conservé. Mais c'est la campagne de presse dont Marie Curie a fait l'objet qui est scandaleuse. A-t-elle été écartée comme étrangère ou comme femme? On a beau se dire que les mœurs journalistiques du début du XX^e siècle étaient proprement ignominieuses, on ne peut que rester perplexe vis-à-vis d'un tel déchaînement de xénophobie. Cet épisode fâcheux n'est cependant qu'un hors-d'œuvre face à l'orgie de haine qui va suivre.

L'affaire Langevin

Paul Langevin (1872-1946) est l'un des physiciens français marquants du début du XX^e siècle. Professeur au Collège de France, il est le fondateur de la «théorie statistique du magnétisme». En d'autres termes, il s'est efforcé de trouver une explication microscopique aux phénomènes *magnétiques*, du grec *magnês lithos*, pierre de Magnésie (ville d'Asie Mineure) où l'on trouvait sans doute quantité de minerais aimantés.

Lorsque l'on approche deux aimants l'un de l'autre, il y a attraction ou répulsion: les pôles de signes opposés tendent à se rejoindre, et c'est l'inverse pour les pôles de même signe. Les aimants ne sont pas quelconques: très souvent, ce sont des morceaux de fer. Lorsque l'on enveloppe un aimant d'un bobinage convenable dans lequel on fait passer un courant, l'effet se ren-

force. On a créé un *électroaimant*. Or, tant qu'elle est soumise à un électroaimant assez puissant, n'importe quelle substance acquiert elle-même des propriétés magnétiques, souvent très faibles. Elle va être attirée ou repoussée par les pôles de l'aimant. Par ailleurs, les manifestations du magnétisme changent avec la température: à 770°C, le fer perd son aimantation. Les recherches de Langevin sur l'origine atomique du magnétisme ont permis de jeter un premier pont entre magnétisme et température.

À côté de ses activités de recherche, Langevin est connu comme un vulgarisateur talentueux de la théorie de la relativité d'Einstein. Sur le plan personnel, il plaît aux femmes et n'est guère économe; son mariage bat de l'aile. Sa femme, bien trop occupée de l'éducation de leur marmaille, n'a ni le loisir ni la formation nécessaire pour pouvoir s'intéresser à son activité scientifique. Elle remarque surtout ses dépenses inconsidérées et le harcèle pour qu'il abandonne une carrière universitaire brillante pour un poste mieux payé dans l'industrie. Le couple Langevin constitue un exemple parfait de décalage culturel.

Marie Curie est devenue veuve à trente-huit ans. En 1910, elle vient de franchir le cap de la quarantaine. Elle est amoureuse de Paul Langevin, de cinq ans son cadet, dont tous connaissent les déboires conjugaux. Quotidiennement, Marie vient le rejoindre dans un appartement loué au Quartier Latin. L'année suivante, Jeanne, la femme de Langevin, introduit en justice une demande en séparation de corps. Le scandale éclate quand la presse de caniveau puis celle d'extrême-droite s'emparent de l'affaire. Ce qui frappe, à la lecture de l'article du *Journal* qui a déclenché toute l'affaire [22], ce n'est pas tant son ignominie que l'hypocrisie qui en ruisselle.

On est alors en pleine Belle Époque; les péripéties du scandale sont là pour nous le rappeler. On cambriole Langevin et l'on publie des lettres de Marie à son bien-aimé. À la suite de cette publication, Marie et ses deux filles sont dans un tel état que le grand mathématicien Emile Borel recueille la famille chez lui. Chez lui, cela veut dire dans son appartement de fonction de l'École Normale Supérieure dont il est le directeur scientifique. Quand il l'apprend, le ministre de l'Instruction met Emile Borel en demeure de renvoyer Mme Curie, cette étrangère qui «déconsidère l'université». Langevin, en revanche, peut quitter sa femme et ses quatre enfants sans que sa conduite ne porte atteinte à l'image du monde académique. Courageusement, Borel refuse l'ultimatum. Les autorités universitaires parlent de retirer à Marie Curie son poste à la Sorbonne. La presse de droite se déchaîne: «Le 8 décembre viendra devant la 9^e chambre correctionnelle le procès Langevin-Curie. On y verra toute la Sorbonne rastaquouère contre une femme française, une mère française, contre le foyer français.» [25] Les duels sont encore à l'ordre du jour, si bien que Langevin provoque le journaliste qui a publié les lettres de Marie. Aucune balle, heureusement, n'est échangée.

L'année 1911 réserve une nouvelle surprise: le prix Nobel de chimie est décerné à Marie Curie pour sa découverte du radium. De toute l'histoire du prix, seuls Marie Curie et John Bardeen ont été lauréats de deux prix Nobel scientifiques: le physicien américain John Bardeen (1908-1991) a partagé le prix de physique en 1956 et 1972, respectivement pour la mise au point du *transistor* et pour la découverte des causes de la *supraconductivité*, la propriété qu'ont certaines substances portées à basse température de transporter

l'électricité sans qu'il soit nécessaire de les connecter à une pile ou à un générateur.

Il vaut la peine de se pencher sur l'histoire des deux prix de Marie Curie car, dans cette affaire comme dans celle de la découverte des pulsars, narrée dans un chapitre ultérieur, le sexe de la lauréate ne peut être ignoré. Dans la recherche scientifique, les femmes ne jouent pas dans la même catégorie que les hommes.

Les femmes et la science: un long chemin semé d'épines

Il faut garder un point à l'esprit. Lorsque le prix Nobel de physique est attribué aux Curie, puis quand Marie survit à son mari, quand elle se présente à l'Académie des sciences, quand elle est prise dans les remous du scandale Langevin-Curie, et même après la mort de Marie, la presse, les romans et le théâtre s'emparent de son histoire et en présentent à chaque fois un aspect différent. Leur objectif consiste essentiellement à plaire à leurs lecteurs et spectateurs ou à défendre une position idéologique qui n'a que faire des états d'âme de leur victime. Il s'agit là d'un sort courant pour les êtres dont le destin sort de l'ordinaire. Cette imagerie n'a pas épargné les plus grands acteurs de l'histoire et leur a rarement été fidèle.

Hypatie d'Alexandrie (370 environ-415), était mathématicienne, astronome et philosophe, adepte du néoplatonisme. Elle a peut-être été la seule femme de l'Antiquité versée dans les sciences exactes – la seule ou la dernière car il semble que les Pythagoriciens et Platon n'aient pas écarté les femmes du savoir. Hypatie était célèbre pour sa beauté – on le dit rarement d'un homme de science. Elle mourut assassinée dans la rue, mise en pièces par la populace chrétienne d'Alexandrie qui lui reprochait ses convictions philosophiques. Depuis Hypatie, Marie Curie est la première représentante des sciences de la nature, la première femme docteur ès sciences et la première femme à avoir enseigné à la Sorbonne. Elle ne pouvait échapper à la triste rançon de la gloire.

Les quelques mathématiciennes de valeur que l'histoire a retenues durant les quinze cents ans qui séparent Hypathie de Marie Curie ne changent rien à l'affaire. Elles aussi ont dû lutter parce qu'elles étaient femmes. Parce que les femmes n'y étaient pas admises, Sophie Germain (1776-1831) suivit l'enseignement de l'Ecole Polytechnique par correspondance. Sous un nom masculin d'emprunt, elle correspondit avec l'un des plus grands mathématiciens de l'histoire, Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Quant à Sofia Kovalevskaja (1850-1891), elle suivait des cours privés auprès du mathématicien allemand Karl Weierstrass (1815-1897). Or, bien qu'elle en fût la meilleure élève, elle ne reçut pas l'autorisation de suivre ses cours à l'Université de Berlin.

En ce qui concerne plus particulièrement les deux prix Nobel de Marie Curie, il vaut la peine d'analyser les péripéties de leurs attributions respectives.

Pour qu'un chercheur puisse obtenir un prix Nobel scientifique, des personnalités reconnues du monde de la science doivent proposer son nom auprès de l'Académie Royale des Sciences de Suède. Celle-ci fait alors son choix parmi les candidatures valables. En 1903, l'Académie Française des Sciences envoie à l'Académie suédoise une lettre collective proposant que le

prix Nobel aille à Henri Becquerel et Pierre Curie pour leur travail sur la radioactivité. Marie Curie n'est pas mentionnée. Dans *Pierre Curie*, Anna Hurwic relève l'étrangeté de cette proposition [26].

Les deux années précédentes, les membres les plus éminents de cette même Académie avaient proposé Becquerel et les époux Curie. A ce moment-là, Marie n'était pas exclue. Autre bizarrerie, la lettre de candidature de 1903 est mal composée, pleine de ratures et comporte un nombre considérable d'inexactitudes, sinon de mensonges grossiers. Le style en est déplorable et fait plus penser à un article de la presse populaire qu'à une rédaction d'Académiciens. En revanche, les signatures de cette lettre, au nombre de vingt, sont incontestablement authentiques. Personne ne connaît le fin mot de l'énigme ni l'auteur de cette machination, si machination il y a eu. Mais la suite de l'histoire ne permet pas d'en douter.

Le mathématicien suédois Gosta Mittag-Leffler (1846-1927), ardent défenseur de la cause des femmes, ami et protecteur de Sofia Kovalevskaja, écrit à Pierre pour l'avertir que Becquerel et lui-même ont de grandes chances de recevoir le prix Nobel 1903. Curie répond aussitôt qu'il tient à ce que sa femme soit associée à cette récompense prestigieuse. Une phrase de sa lettre est souvent citée. Il écrit: «[...] ne croyez-vous pas que ce serait plus joli au point de vue artistique de nous laisser ainsi associés?» On note en passant que le style de Pierre Curie manque passablement de fluidité. Dans son enfance, bien qu'il fût studieux et aimât lire, il ne pouvait s'adapter au rythme scolaire – c'est tout au moins ce que pensaient ses parents. Pierre étudia à la maison avec sa mère, son frère aîné et divers précepteurs. Bien formé en géométrie et en sciences naturelles, il avait de grosses lacunes dans les branches classiques. Pour en avoir le cœur net, Mittag-Leffler demande son avis au mathématicien et physicien Henri Poincaré (1854-1912), le «dernier savant universel». Celui-ci n'hésite pas: le prix doit revenir à Becquerel et aux époux Curie. Ainsi fut fait. Or Poincaré est l'un des vingt signataires de l'étrange lettre de l'Académie. Qui a voulu écarter Marie? On n'en saura probablement jamais rien. L'Académie suédoise est tenue au secret pendant cinquante années, si bien que la probable forfaiture n'a été connue que des décennies plus tard. S'il en était de même dans les commissariats de police, tous les crimes resteraient impunis.

La remise d'un prix Nobel s'accompagne toujours d'une *laudatio*, un texte très court expliquant les raisons qui ont déterminé le choix des lauréats de l'année. La remise du prix Nobel de physique 1903 ne mentionne pas le radium malgré la fascination qu'il exerçait alors. Ce métal était incroyablement rare et cher et l'on croyait qu'il allait avoir d'importantes applications en médecine. Certains affirmaient que «le radium provoquait la génération spontanée» et qu'«il pouvait être à l'origine de la vie».

L'explication de cette omission doit être cherchée dans l'attitude des chimistes membres de l'Académie suédoise. Ceux-ci n'étaient pas opposés à la remise d'un prix pour la découverte d'un élément aux propriétés aussi extraordinaires que celles du radium. Bien au contraire. Plutôt que de brader une pareille découverte dans le coin d'une *laudatio* destinée à un prix de physique, ils voulaient la garder en réserve pour une autre occasion. Dans *Nobel Prize Women in Science*, Sharon McGrayne fait une remarque importante: «L'attribution du prix Nobel de physique à Marie Curie fut le point de

départ de deux stars: Marie et les prix Nobel scientifiques qui, jusqu'alors, étaient dédaignés par la presse. [...] Marie Curie fit tant pour leur popularité que la presse ne devait plus jamais les passer sous silence. [...] Paradoxalement, le public réagit surtout à la découverte du radium. [...] La radioactivité est un phénomène compliqué, alors que le radium est fascinant.» [27]

En 1911, les chimistes eurent leur revanche. Marie et le radium obtinrent le prix Nobel de chimie; cette fois, Marie ne partageait le prix avec personne. Sans doute ne l'obtiendrait-elle plus aujourd'hui. La découverte d'un élément radioactif nouveau n'est plus considérée comme aussi importante que jadis et la fascination qu'exerçait le radium est bien retombée. Mais il serait injuste de prétendre que Marie ne méritait pas ce deuxième prix ou qu'elle n'a fait que récolter ce que son mari avait semé. Simplement, alors que la découverte de la radioactivité nous paraît toujours aussi prestigieuse, les vues ont changé quant à l'importance de celle du radium. Comme en littérature ou dans les arts, c'est l'épreuve du temps qui est décisive.

Il n'empêche que l'attribution du second prix devait encore donner lieu à quelques péripéties douloureuses. Selon Nanny Fröman, le chimiste Svante Arrhénius (1859-1927), prix Nobel 1903 et membre de l'Académie suédoise, écrit à Marie pour lui demander de renoncer au prix, tout au moins tant que les accusations formulées contre elle et Langevin n'auront pas été définitivement levées [28]. Marie, en pleine dépression à la suite des harcèlements dont elle a été l'objet, a pourtant le courage de refuser l'ultimatum: elle ne peut «accepter le principe selon lequel le jugement porté sur un travail scientifique puisse être influencé quand la diffamation et la calomnie salissent la vie privée d'un chercheur».

Marie va à Stockholm recevoir son prix et, lors de la conférence que l'on attend de chaque lauréat, elle insiste soigneusement sur ses propres contributions à la découverte du radium: comme une litanie reviennent les *je* et les *moi*. Non qu'elle veuille ternir la mémoire de Pierre, mais c'est sa manière à elle d'affirmer son identité scientifique. Rentrée à Paris, elle s'effondre complètement. Il faudra attendre la Guerre mondiale pour que le scandale de sa liaison s'estompe complètement. Dès que les hostilités éclatent, Marie Curie prend conscience que les installations de radiologie manquent cruellement dans les hôpitaux militaires. Elle organise un service mobile de radiologie qui prend une telle importance que, pendant la période 1917-1918, plus d'un million de soldats en auront bénéficié.

Le radium peut guérir et peut tuer

Le mot de radium a longtemps eu une résonance magique pour la science française. De 1920 à 1963, la principale revue française de physique s'intitulait *Le Journal de Physique et le Radium*. En 1909, l'Institut Pasteur et l'Université de Paris ont décidé la fondation d'un Institut du Radium qui porte le nom d'Institut Curie depuis 1978. Dans le public, c'est parfois le délire, comme en témoigne une annonce publiée par un charlatan inconnu:

La plus merveilleuse découverte du siècle
 LOTION AU RADIUM Rezall
 Pour la conservation de la chevelure
 Plus de chute de cheveux
 Plus de cheveux gris. [22]

L'Institut du Radium est constitué de la réunion du laboratoire de Marie Curie et d'un laboratoire de l'Institut Pasteur. Le premier étudie la physique des radiations émises par les corps radioactifs, alors que le second se consacre à l'étude de leurs effets biologiques. Il se préoccupe également de mettre au point une forme de *radiothérapie*, l'application médicale de la radioactivité. Les radiations d'un corps fortement radioactif comme le radium sont capables de brûler les tissus et les cellules comme le démontrent des articles scientifiques parus respectivement en 1900 et 1901 [29]. Très tôt, les doigts des Curie ont gardé des traces inquiétantes de ces effets: «[...] nous avons eu sur les mains, pendant les recherches faites avec les produits très actifs, des actions diverses. Les mains ont une tendance générale à la desquamation: les extrémités des doigts [...] deviennent dures et parfois très douloureuses.» [30] Au lieu de s'inquiéter de ces symptômes, on ne pense qu'aux applications médicales de ces radiations bactéricides et susceptibles de détruire les tumeurs. Le mythe du progrès fait encore des ravages.

Après la guerre, ce sera pour Marie un combat incessant que d'améliorer les moyens de l'Institut du Radium. La situation financière de la France est désastreuse et la science française a énormément souffert du conflit. Célèbre aux Etats-Unis, Marie est invitée à y accomplir deux voyages au cours desquels elle reçoit deux grammes de radium, l'un pour son institut, l'autre pour la Pologne. L'extraction du minerai magique est devenue beaucoup trop onéreuse pour que l'Institut du radium puisse disposer librement de l'élément que les Curie avaient découvert et qu'ils n'avaient pas voulu breveter.

Marie est devenue une célébrité mondiale et, en France, l'affaire Langevin est oubliée. Nanny Fröman le confirme: «Après avoir été traînée dans la boue dix ans auparavant, elle est devenue la Jeanne d'Arc moderne.» Il n'en reste pas moins que, jusqu'à Hiroshima, elle restera l'être humain ayant absorbé la dose de radiation la plus importante de toute l'histoire. Sur ce point, ses collaborateurs ne sont pas en reste. Malgré tous les signaux d'alarme, Marie Curie nie le danger. On meurt fréquemment d'anémie ou de leucémie dans son entourage.

Il en est de même ailleurs. Un dentiste américain découvre en 1924 le danger immense que courent les ouvrières qui garnissent de radium les cadrans de montres afin de les rendre luminescents. Le cancer les menace car elles ont pris l'habitude de lécher leur pinceau pour le tailler en pointe. En 1897, les Américains font une première enquête à l'échelle nationale sur la nocivité des rayons X. En 1904, Pierre Curie et ses collaborateurs enferment des souris et des hamsters dans une enceinte contenant du radon, un gaz très radioactif mais inerte du point de vue de la chimie. Selon la dose utilisée, les rongeurs meurent au bout de 4 à 9 heures [29].

Marie n'entend rien, ne voit rien. Dans son laboratoire, les précautions prises lors des manipulations de substances radioactives ou de rayons X sont

ridicules tant elles sont inefficaces: «Marie se conduira jusqu'à la fin de sa vie à l'égard du radium comme une mère à qui l'on voudrait faire accroire que son fils glorieux et bien-aimé est aussi, à ses heures, un assassin.» [22] La radioactivité peut tuer les tissus tumoraux, mais il est interdit de s'arrêter à l'idée qu'elle peut léser les tissus sains. Marie Curie a pourtant souffert dans sa propre chair des méfaits de son enfant chéri: ses reins sont atteints, elle souffre d'une cataracte qui l'empêche de lire autrement qu'avec une loupe. Malgré une constitution de fer, elle ne cesse de décliner.

Le 4 juillet 1934, Marie Sklodowska-Curie meurt d'anémie pernicieuse foudroyante.

Les femmes et la science

L'histoire de Marie Curie témoigne de toutes les difficultés que peut rencontrer une femme lorsqu'elle embrasse une carrière scientifique. Dans sa patrie, elle a été exclue des études supérieures parce que femme. En France, pays de la liberté, elle a pu entrer dans les amphithéâtres de la Sorbonne. Mais, du fait de son sexe, elle a dû lutter durant toute sa carrière contre des oppositions farouches. Bien malgré elle, elle a déchaîné les calomnies et les insultes d'une presse ignoble acharnée à dénoncer d'abord la femme et accessoirement l'étrangère et la juive – qu'elle n'était pas, ce qui ne change rien à l'affaire. Pour compléter la liste, on n'aurait garde d'oublier que la pauvreté a empêché Marie de se marier en Pologne selon son cœur. L'épouse de Casimir aurait-elle été plus heureuse que celle de Pierre?

La question est oiseuse: personne n'en connaît la réponse. Par ailleurs, les exclusions et les interdictions s'abritent trop souvent derrière des arguments similaires. Qui n'a jamais entendu ses parents lui signifier un interdit accompagné d'un «c'est pour ton bien que nous agissons ainsi»? Marie Curie n'a certainement pas été heureuse au sens des contes de fées – ils se marièrent, ils furent heureux et eurent beaucoup d'enfants. Mais il est bien douteux que, arrivée au terme de son existence, elle ait pu regretter cette douloureuse aventure qui fut la sienne.

Seuls le cercle de ses proches amis et, dans une moindre mesure, l'Académie Royale de Suède lui sont toujours restés fidèles. Ses amis l'ont soutenue avec un grand courage. Certains diront qu'elle était hautaine, froide et même inabordable. Elle ne l'était pas pour ses proches ou ses collaborateurs. Et quand même elle l'aurait été! Face aux obstacles qu'elle a affrontés, pouvait-elle manquer de personnalité? Pouvait-elle adopter le profil que ses contemporains attendaient du sexe faible? Que tous ceux qui, aujourd'hui encore, ici et surtout ailleurs, veulent réduire la femme au vilain rôle de poupée docile s'inspirent au plus près de leur conscience de l'exemple de Marie Curie. Qu'ils admettent une fois pour toutes que leur combat retardateur est un combat inique. Ils sont condamnés à le perdre. Ne soyons pas trop optimistes: l'évolution des mœurs est lente et les idéologies ont la vie dure.

3 LA CHALEUR INTERNE DE LA TERRE PROVIENT DU CŒUR DE LA MATIÈRE

«Puis Dieu dit: Que les eaux qui sont au-dessous des cieux se rassemblent en un seul lieu, et que le continent apparaisse. Et il en fut ainsi. Dieu appela le continent Terre; et il nomma Mer l'amas des eaux. Et Dieu vit que cela était bien.» [Genèse 1, 9-10]

1905

Au début du XX^e siècle, deux soleils se lèvent au ciel de la physique. Ils portent les noms de Rutherford et d'Einstein.

En révélant la vraie nature de la radioactivité, Rutherford donne la clé de l'histoire de la Terre en réconciliant les idées de Kelvin avec celles des géologues et des héritiers de Darwin. Pour sa part, Einstein révèle une source d'énergie encore inconnue. Inépuisable à notre échelle, bientôt asservie par l'humanité à laquelle elle va créer de graves problèmes, cette énergie nouvelle est à l'origine de la radioactivité. Elle façonne notre planète comme le fait l'énergie qui nous vient du Soleil. L'année 1905 sert de trait d'union entre ces deux hommes, même s'ils ne se connaissent pas encore. Ils ne se rencontreront que plus tard à l'occasion de divers congrès, mais leurs personnalités offrent un contraste très marqué et leurs destins resteront toujours séparés.

En 1905, précisément, Rutherford tient une conférence devant la Royal Institution. Il y présente ses vues sur la radioactivité. A son sens, ce nouveau phénomène met un terme à la controverse que Kelvin avait déclenchée à propos de l'âge de la Terre. Mais Rutherford n'est pas dans son assiette, car il aperçoit Kelvin dans la salle. A son profond soulagement, il constate que le «vieil hibou¹» est profondément endormi. Au moment où Rutherford va présenter l'argument crucial qui démolit les vues de Kelvin, celui-ci se redresse, ouvre un œil, transperce le conférencier du regard et se replonge dans son sommeil [20, 31]. Rutherford peut continuer sans être dérangé.

De nos jours, plus personne ne doute de la validité de l'argument qui faillit sortir Kelvin de son somme. Pour comprendre le message de Rutherford, il faut revenir aux recherches suscitées par l'avènement de la radioactivité.

La radioactivité défie-t-elle les lois de la physique?

Dès la découverte du phénomène, Becquerel et les Curie ont buté sur une difficulté importante. Comment se fait-il que la radioactivité des échantillons observés ne diminue pas avec le temps? Pour comprendre leur perplexité, il

¹ Rutherford est un peu plus poli. Il traite Kelvin d'«old bird».

convient de réaliser un point essentiel: toute émission s'accompagne d'une perte d'énergie de l'émetteur. Or *l'énergie obéit à un principe de conservation*: elle ne se perd ni ne se crée. Elle ne peut que se transformer.

Une station radio ne peut fonctionner sans que les ondes émises emportent une certaine énergie. Cette perte doit être compensée par un apport d'énergie électrique. Une bûche qui brûle dans l'âtre répand autour d'elle lumière et chaleur. Contrairement à l'émetteur, elle ne dispose pas d'alimentation électrique. Une fois réduite en cendres, elle se refroidit inexorablement. L'énergie chimique qu'elle contenait est épuisée; elle s'est intégralement transformée en énergie thermique qui se manifeste par une élévation de la température du salon: *l'énergie est conservée*.

La vie quotidienne semble receler une exception à cette règle impérative: les émissions sonores paraissent ne rien coûter. Sinon, comment expliquer que les bavards ne soient pas plus maigres que les êtres taciturnes ou qu'un dictateur puisse tenir des discours de sept heures sans s'astreindre à un entraînement sportif? Mais le paradoxe n'est qu'apparent: l'effort associé à l'émission d'une onde sonore est trop faible pour que notre bilan énergétique en soit affecté de manière sensible.

Dans ces conditions, pour les pionniers du domaine, la radioactivité apparaît comme une violation choquante de la conservation de l'énergie. Une substance radioactive semble se comporter comme une bûche de Noël qui brûlerait sans se consumer, qui chaufferait l'âtre sans se réduire en cendres. Avant que Rutherford ne trouve le fin mot de l'énigme, chacun y va de son explication, plausible ou non. Certaines de ces explications projettent une lumière intéressante sur la méthode scientifique.

Marie Curie fait fi du principe de parcimonie

En 1898, à l'occasion de la découverte de la radioactivité du thorium, Marie Curie suggère que l'espace est parcouru en tous sens par un rayonnement inconnu et très pénétrant. Seuls certains éléments lourds comme l'uranium et le thorium seraient capables de l'absorber et de s'alimenter ainsi à cette mystérieuse source d'énergie.

La communauté scientifique n'apprécie guère les explications qui font appel à un objet hypothétique pour résoudre une difficulté. Elle l'écarte en vertu du *principe de parcimonie*, ou principe du *rasoir d'Occam*, du nom du franciscain Guillaume d'Ockham (1270-1320). Il stipule que

Toutes choses étant égales,
l'explication la plus simple est toujours la meilleure.

Le principe de parcimonie ne peut être suivi aveuglément. En marquant des priorités, il constitue cependant un des piliers de la méthode scientifique. En témoigne la *théorie héliocentrique* de Copernic [32].

Au chapitre 1, nous avons brièvement présenté la complexité du mouvement des corps célestes. De jour, le Soleil décrit sous nos yeux une trajectoire

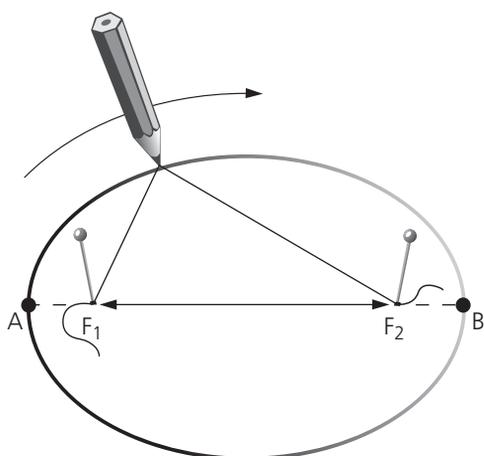
qui se modifie d'une saison à l'autre. Durant la nuit, la voûte céleste décrit une rotation silencieuse autour de l'Etoile polaire et les corps célestes qui ponctuent le ciel nocturne décrivent un lent ballet annuel. Quant à la Lune et aux quelques planètes que connaissaient les anciens, elles se déplacent progressivement sur la tapisserie stellaire. Le mouvement des planètes est particulièrement complexe: il leur arrive parfois de revenir sur leur pas, puis de reprendre leur progression.

Les Anciens pensaient que les corps célestes se déplaçaient autour de la Terre, immobile au centre de l'univers, une attitude intuitive et combien humaine. Mais pour reproduire ces mouvements, ils étaient obligés d'imaginer un gigantesque mécanisme d'horlogerie capable de régler les déplacements observés. La description de tous les engrenages était très complexe et ne représentait que très approximativement les mouvements célestes.

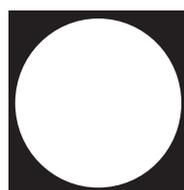
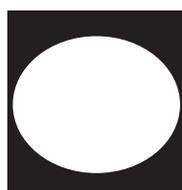
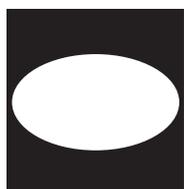
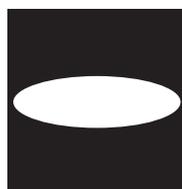
Grâce au futur chanoine et astronome polonais Nicolas Kopernik ou Copernic (1473-1543), puis grâce au théologien luthérien allemand Johannes Kepler (1571-1630), l'horloge céleste des Anciens est balayée. Appliquant à sa manière le principe de parcimonie, Copernic avance une idée simple: les planètes sont en révolution circulaire autour d'un Soleil immobile qui remplace la Terre au centre de l'univers. Il avait été précédé par l'astronome antique Aristarque de Samos (env. 310 - env. 230 av. J.-C.). Mais l'ouvrage dans lequel Aristarque expose sa théorie héliocentrique est perdu, si bien que, pour défendre sa thèse, Copernic a dû puiser les arguments dans ses propres connaissances en mathématiques et en astronomie. Quant à la Terre, elle tourne sur elle-même en vingt-quatre heures et, entre Vénus et Mars, elle prend place dans le cortège des planètes. Reste encore à éliminer les multiples engrenages qui entretiennent les planètes sur leurs trajectoires. C'est Kepler qui s'en charge. Il crée à leur place un système simple et harmonieux, les trois lois qui portent son nom. La première affirme que les planètes se meuvent sur des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers (fig. 3.1). La deuxième nous donne une information sur la vitesse d'une planète le long de son orbite, et la troisième permet de comparer les périodes de révolution respectives.

Il est évident que l'hypothèse de Marie Curie est une violation flagrante du principe de parcimonie. Le recours à un rayonnement hypothétique ne serait justifié que si les lois connues jusqu'alors avaient définitivement démontré leur impuissance à expliquer le phénomène mystérieux, une preuve bien difficile à apporter. Deux physiciens allemands, Julius Elster (1854-1920) et Hans Geitel (1855-1923), tentent néanmoins de tester l'hypothèse de Marie Curie. En prouvant que l'activité d'une source n'est pas affectée si on l'enfouit profondément sous terre, ils rendent encore moins plausible la suggestion de Marie Curie. Si elle avait raison, on s'attendrait à ce que l'intensité du rayonnement diminue avec la profondeur.

Auteurs de nombreux travaux intéressants, Elster et Geitel mériteraient d'être mieux connus. Convoqués par le ministre prussien de l'Instruction, ils refusent poliment une nomination commune à un poste de professeur d'université, préférant sauvegarder l'indépendance de leur recherche. Une autonomie qu'ils payent cher puisqu'ils subventionnent eux-mêmes leurs travaux scientifiques. [29]



(a)

 $e = 0$  $e = 0,5$  $e = 0,8$  $e = 0,94$

(b)

Fig. 3.1 Sur une feuille de papier, une ellipse se construit aisément. Il suffit de planter deux aiguilles en deux points arbitraires F_1 et F_2 , puis d'y fixer les deux extrémités d'une ficelle inextensible. Si l'on tend le fil comme l'indique la figure, un crayon décrit nécessairement une ellipse. Les points F_1 et F_2 en sont les *foyers*. Quant au segment AB , c'est le grand axe de l'ellipse. Il passe par les foyers (a). Pour une longueur de ficelle donnée, la distance entre les aiguilles détermine la forme de l'ellipse ou, comme le disent les mathématiciens, son *excentricité* e . L'ellipse d'excentricité nulle se réduit à un cercle (b).

La crise de l'énergie

En 1898 encore, Marie Curie découvre le polonium et note que l'énergie fournie par un gramme de polonium radioactif est encore supérieure à celle que produisent un gramme d'uranium ou de thorium radioactifs. Quand,

cette même année, le radium est découvert, puis quand il est isolé en 1902, le mystère de la source de l'énergie devient plus aigu. En 1903, Albert Laborde (1878-1968), un collaborateur de Pierre Curie, constate la présence d'un courant d'air chaud au voisinage d'un échantillon de radium, signe du dégagement d'une grande quantité de chaleur. «A la mystérieuse énergie rayonnée s'en ajoutait donc une autre, dissipée sous forme de chaleur, et dont on ignorait également l'origine.» [26]

Quand ils mesurent le dégagement de chaleur avec précision, Curie et Laborde se rendent compte de son importance. La température d'un échantillon de radium dépasse constamment de quelques degrés la température ambiante. La chaleur qu'il produit en une heure suffit à faire fondre plus que son poids de glace. Celle que fournit un kilo de radium en une année a le même effet que la combustion de cent kilos du meilleur charbon, à cette différence près que le radium n'a nullement été réduit en cendres et qu'il continue à produire de la chaleur. On devrait attendre des centaines d'années avant d'observer un ralentissement de son activité [33]. Curie et Laborde comprennent qu'une telle quantité de chaleur ne peut provenir d'une transformation chimique ordinaire. Ils affirment que la transformation observée «[...] doit être due à une modification de l'atome lui-même» mais, comme Marie, Pierre Curie reste perplexe devant cette source inépuisable d'énergie: contrairement à ce qui se passe lors d'une *combustion*, le radium ne semble nullement affecté par la quantité impressionnante de chaleur dissipée. Il continue à irradier imperturbablement. Le radium constitue apparemment une source d'énergie inépuisable!

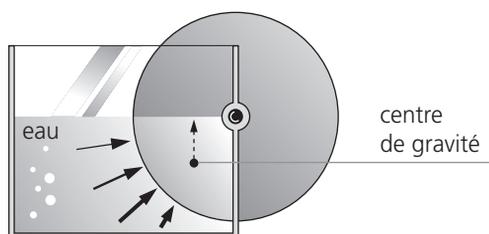
Aujourd'hui, on parle avec raison de la crise qui affecte l'énergie. Pour faire marcher un moteur de voiture, on utilise le pétrole, un carburant *non renouvelable* parce que le réservoir dont l'humanité dispose s'épuise peu à peu. En revanche, quand on parle d'*énergies renouvelables*, on fait allusion aux carburants qui, au contraire du pétrole, ne risquent pas de tarir. C'est notamment le cas de l'énergie que le Soleil distribue sans compter à la surface de notre planète, bien qu'elle ne soit pas facile à exploiter. Il n'en reste pas moins que, pour le maintien de l'activité humaine, un carburant est toujours nécessaire. C'est ce que n'ont pas compris les innombrables inventeurs de *mouvements perpétuels* aussi ingénieux qu'inefficaces (fig. 3.2): ce sont des moteurs qui sont censés fonctionner sans carburant!

Reste alors à répondre à une question importante: à quelle source la radioactivité s'abreuve-t-elle?

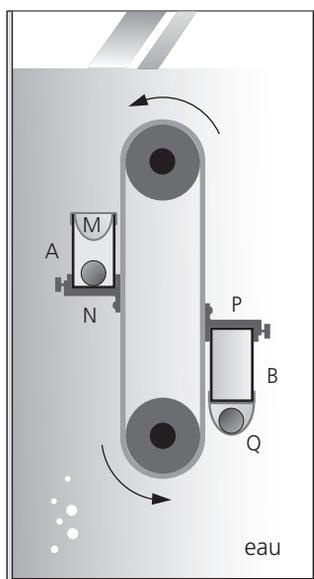
Le physicien des antipodes

Au prix d'efforts démesurés, les Curie purifient sans trêve la pechblende pour en tirer un gramme de radium. Au moment où ils s'efforcent vainement de percer les secrets de la radioactivité, l'un des plus grands physiciens du début du XX^e siècle, Ernest Rutherford, leur montre à distance la voie à suivre.

Ernest, Lord Rutherford of Nelson (1871-1937) est né en Nouvelle Zélande, près de la petite ville de Nelson. L'essentiel de sa carrière scientifique



(a)



(b)

Fig. 3.2 Deux types de mouvements perpétuels reposant sur une fausse conception du principe d'Archimède [34]. Dans le cas de la figure (a), le raisonnement consiste à croire que la portion de la roue de bois immergée a tendance à s'élever sous l'effet de la poussée d'Archimède s'exerçant sur son centre de gravité. En réalité, la pression de l'eau agit perpendiculairement à la roue de bois et ne peut provoquer de mouvement vertical. En (b), deux cylindres A et B métalliques sont fermés en M et Q par des membranes élastiques et en N et P par des cloisons rigides. Chacun d'eux contient une lourde bille. Le raisonnement faux consiste à croire que la bille Q, en contact avec la membrane, augmente le volume du cylindre B et que, de ce fait, la poussée d'Archimède y est supérieure à celle qui s'exerce en A, ce qui mettrait le système en mouvement.

s'est déroulé en Angleterre. Mais le fait qu'il ait voulu associer le nom de Nelson à son élévation à la pairie montre bien qu'il gardait dans son cœur une place de choix pour sa Nouvelle-Zélande natale. Une anecdote est révélatrice à cet égard. Invité à une célébration officielle, Rutherford est placé à côté d'un évêque qui lui demande combien l'Île du Sud compte d'habitants (Nelson est placée sur la plus méridionale des deux îles principales qui constituent la Nouvelle-Zélande). Ayant appris qu'elle n'en compte que 250 000, l'évêque s'étonne: «C'est juste la population de Stoke-on-Trent!». Rutherford répond alors superbement: «Sachez, Monsieur, que chaque habitant de l'Île du Sud pourrait dévorer tous les jours la population entière de Stoke-on-Trent pour son petit déjeuner. Et il n'en serait pas rassasié pour autant!» [29]

Cette anecdote est conforme au portrait que ses contemporains se font de Rutherford: un homme simple, direct, économe, énergique, enthousiaste, plein de respect pour l'instruction. Pour compléter le tableau, on n'aurait garde d'omettre la vive intelligence et l'esprit tranché dont Rutherford ne manquait jamais de faire preuve. Un crocodile est gravé sur le frontispice du laboratoire que dirigeait Rutherford de 1919 à la fin de sa vie. On le verra plus bas, cet animal était le symbole et le surnom de Rutherford.

Au lycée, les dons de Rutherford sont vite remarqués. A la fin de ses études, il obtient une bourse qui lui permet de s'inscrire au collège de Christchurch, puis de partir pour l'illustre Cavendish Laboratory de Cambridge, haut lieu de la science britannique, où il arrive en 1895. Il s'intéresse aux rayons X puis, dès sa découverte, à la radioactivité, domaine dans lequel il s'impose rapidement. Malgré la valeur que tous lui reconnaissent, Rutherford se rend compte qu'il n'a guère de chances d'obtenir une position stable à Cambridge. Il y règne un certain snobisme à l'endroit des malheureux qui ont fait leurs premiers pas dans une autre université. Quant aux natifs des dominions, ils sont encore plus mal partagés [35]. Dans ces conditions, lorsque l'Université McGill de Montréal met au concours un poste de professeur de physique, Rutherford pose sa candidature. Il est nommé en 1898 et trouve au Canada un laboratoire magnifiquement équipé grâce au financement qu'assure un magnat du tabac qui considère le tabagisme comme une manie dégoûtante. Quand le généreux donateur vient visiter les laboratoires qu'il subventionne, le grand fumeur qu'est Rutherford doit faire disparaître toute trace de tabac et aérer les locaux [6]. Si l'argent n'a pas d'odeur, on ne peut pas en dire autant de la fumée.

L'émanation du thorium

A son arrivée à Montréal, Rutherford décide d'étudier le thorium dont la radioactivité vient d'être mise en évidence par Marie Curie. Il commence par faire une observation cruciale: la radioactivité du thorium est variable, notamment quand on place l'échantillon dans un courant d'air.

Rutherford est un physicien remarquable qui, avant de se lancer dans les spéculations, préfère recourir à la méthode expérimentale. Il construit un appareil qui envoie de l'air comprimé sur un échantillon de thorium puis le recueille dans une bouteille. Il constate alors que son flacon contient un gaz

qu'il baptise *émanation du thorium*. Il observe encore que le mélange air-émanation contient quantité d'ions, ce qui indique que l'émanation du thorium est fortement radioactive. Une partie de la radioactivité que l'on avait attribuée au thorium provient en réalité de son émanation.

On s'en apercevra bientôt, tout minéral radioactif est nécessairement un mélange de quantité de composés radioactifs distincts, si bien que l'étude du phénomène en est compliquée d'autant. L'émanation du thorium, elle, a le triple avantage d'être radioactive par émission de particules alpha, gazeuse – on l'isole aisément – et réfractaire à toute combinaison chimique. On constatera plus tard qu'il s'agit de *radon*, un *gaz noble* ou *inerte* analogue à l'hélium ou au néon. Il est beaucoup plus lourd que l'air et séjourne au voisinage de l'échantillon de thorium dont il est issu par radioactivité.

L'isolation et l'interprétation de l'émanation du thorium est déjà une découverte importante. Pierre Curie, confronté au même problème, n'y a vu que du feu [23, 26]. Au mépris du principe de parcimonie, il refuse d'admettre l'interprétation de Rutherford et se complaît dans une spéculation vague: «l'émanation n'a pas pour support la matière ordinaire, [...] il existe des centres de condensation d'énergie situés entre les molécules du gaz et qui peuvent être entraînés avec lui.» [26]

Rutherford ne va pas s'arrêter en si bon chemin. Etudiant la radioactivité de l'émanation, il remarque que, contrairement à ce qui se passe pour les éléments radioactifs connus jusqu'alors, elle varie au cours du temps. En une minute, à peu près, la radioactivité de l'émanation diminue de moitié. Encore une minute, et son intensité est à nouveau réduite de moitié, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'elle cesse d'être perceptible.

Si les Curie avaient été si perplexes devant la production de chaleur due au polonium et surtout au radium, c'est que l'émission radioactive semblait se poursuivre indéfiniment. Or, pour la première fois, grâce à l'émanation du thorium, cette apparente uniformité est battue en brèche. Rutherford, qui s'est assuré en 1900 la collaboration d'un jeune chimiste britannique, Frederick Soddy (1877-1956), entrevoit le mot de l'énigme. En 1903, dans deux articles fameux [36], les deux futurs prix Nobel de chimie² exposent le résultat de leurs travaux et lèvent du même coup le voile épais qui recouvre la radioactivité.

Le mot de l'énigme

Dans ces publications, Rutherford et Soddy affirment que la radioactivité est un phénomène de *désintégration* – on parle aussi de *transmutation* par allusion aux alchimistes qui cherchaient désespérément à transformer le plomb en or. *Au moment où il émet un rayonnement alpha ou bêta, un élément radioactif se transforme en un autre élément. Le processus s'accomplit progressivement, atome par atome. Le nouvel élément peut être radioac-*

² Rutherford et Soddy le recevront respectivement en 1908 et en 1921.

tif, mais il ne l'est pas nécessairement. Le terme anglais, *decay*, a une connotation moins emphatique mais plus lugubre que notre «désintégration»: il évoque le déclin et la décrépitude.

A l'exception de la mise en évidence du phénomène lui-même par Becquerel, le rapprochement que font Rutherford et Soddy entre radioactivité et transmutation est sans doute la découverte la plus importante qu'on ait jamais faite concernant la radioactivité. Quand l'émanation se forme au voisinage du thorium, il s'agit là du résultat de la désintégration du thorium, à cela près que le processus comprend plusieurs étapes intermédiaires qui en compliquent l'interprétation.

Deuxième point, tout aussi fondamental: Rutherford et Soddy énoncent clairement le déroulement et la signification du processus de désintégration. L'exemple de l'émanation du thorium est là pour en rendre la compréhension plus aisée: chaque fois qu'une particule alpha est émise, un atome de l'émanation se transforme en un atome de nature chimique différente. L'interprétation du phénomène est simple. La moitié des atomes de l'émanation se sont désintégrés en 54,5 secondes. Encore 54,5 secondes, et la moitié des atomes d'émanation encore présents disparaissent à leur tour. Quelles que soient les circonstances et la quantité d'émanation présente, chaque fois que s'écoulent 54,5 secondes, la moitié des atomes de l'émanation se transforment. Cette durée de 54,5 secondes est une sorte de label de l'émanation du thorium. On lui donne le nom de *demi-vie* et l'on parle de la *décroissance exponentielle* du nombre d'atomes d'émanation (fig. 3.3).

Poursuivant leurs investigations, Rutherford et Soddy remarquent que toute substance radioactive isolée se comporte comme l'émanation, à ceci près que la valeur de la demi-vie est une caractéristique de l'atome considéré. Elle diffère d'un type d'atome à l'autre de manière apparemment erratique, mais ne dépend ni de la température ni de toute autre propriété physique ou chimique. Que l'échantillon soit solide ou liquide ne change rien à l'affaire, que la substance étudiée soit un élément ou entre dans une combinaison chimique non plus. Il arrive fréquemment qu'un élément radioactif se désintègre en une nouvelle substance qui, elle aussi, est radioactive, ce qui complique la mesure de la demi-vie. Ce problème existe pour l'émanation du thorium.

Rutherford et Soddy interprètent la décroissance exponentielle observée comme la preuve que la radioactivité est un processus *probabiliste* propre à chaque atome. Lorsqu'un atome se désintègre, il n'affecte pas ses voisins, sans quoi on observerait un effet «boule de neige³». Une image permet de mieux comprendre le caractère probabiliste de la radioactivité.

Imaginons que l'on ait à disposition un très grand nombre de dés que l'on fasse rouler ensemble toutes les quinze secondes. A chaque tour, on élimine les dés qui affichent un «six» (fig. 3.4). *S'ils ne sont pas pipés, les dés restant en jeu n'ont gardé aucune «mémoire» des résultats obtenus aux tours précédents.* Contrairement à ce que pensent tous ceux qui perdent leur fortune dans les casinos, *le résultat du jet d'un dé ne dépend nullement des tirages*

³ On verra plus bas que cette affirmation cesse d'être vraie dans le cas de la fission nucléaire, mais il s'agit là d'un phénomène qui diffère de la désintégration usuelle.

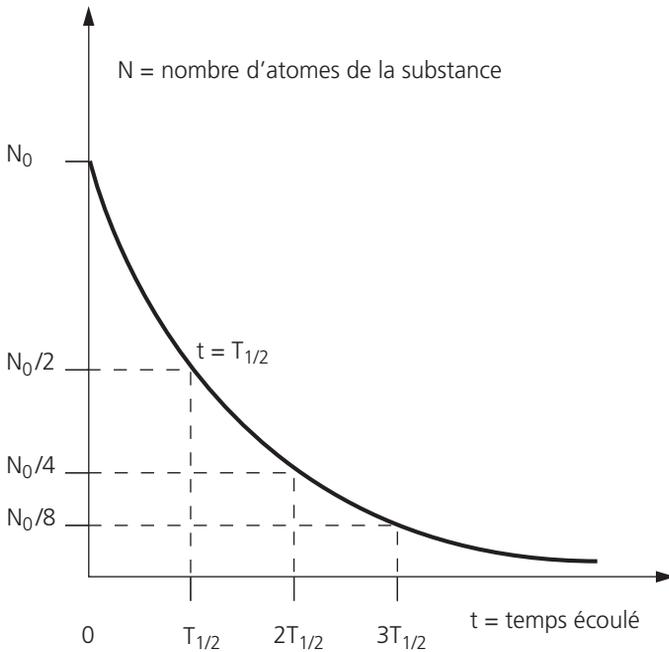


Fig. 3.3 Si, à l'image de ce que Rutherford a fait pour l'émanation gazeuse du thorium, on isole une substance radioactive de demi-vie $T_{1/2}$, le nombre N d'atomes présents est diminué de moitié chaque fois que s'est écoulée une durée égale à $T_{1/2}$. Initialement, ce nombre valait N_0 . Si N_0 est faible (quelques dizaines ou quelques centaines d'atomes), alors la courbe de désintégration ne constitue qu'une prédiction soumise aux aléas de la statistique. En revanche, quand N_0 est grand, quand il représente le nombre d'atomes radioactifs que l'on analyse dans un échantillon de roche, le caractère aléatoire de la décroissance radioactive disparaît complètement.

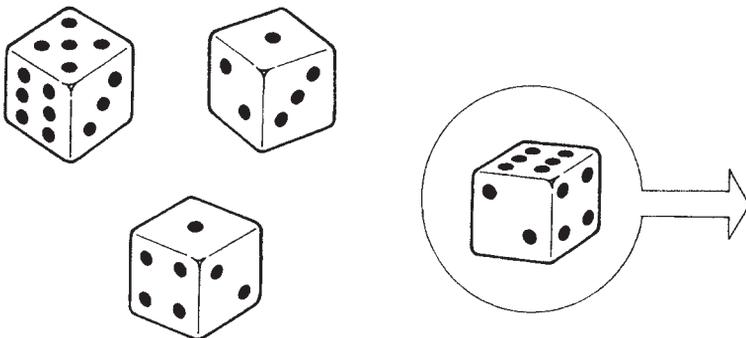


Fig. 3.4 Un grand nombre de dés sont jetés toutes les quinze secondes et l'on élimine à chaque coup tous les dés qui ont obtenu un «six». Au bout de quatre tours, on peut s'attendre à ce qu'un dé sur deux ait quitté le jeu. A condition que les dés ne soient pas pipés, la probabilité que le six apparaisse à chaque coup est égale à $1/6$, même si ce numéro vient de sortir douze fois de suite.

précédents. Toute martingale construite sur la croyance en une mémoire du hasard condamne un joueur à la ruine. Avec ou sans martingale, il y court de toute façon.

A chaque coup, un dé a une *probabilité* de $1/6$ d'être éliminé et personne ne sera jamais capable d'identifier les dés qui vont quitter le jeu au tour suivant. Après un tour, 5 dés sur 6 échappent en moyenne à l'élimination. Après deux, trois et quatre tours, les rescapés constituent une fraction de la population initiale valant respectivement $(5/6)^2$, $(5/6)^3$ et $(5/6)^4 = 0,482\dots$ Ainsi, au bout d'une minute, pendant laquelle quatre tours sont joués, les statistiques affirment que moins de la moitié des dés restent en jeu, à des fluctuations aléatoires près. *Plus le nombre initial de dés ou d'atomes est grand, plus les prédictions statistiques associées deviennent sûres.*

Le cas des atomes de l'émanation est très similaire, à cela près que chaque atome peut se désintégrer à n'importe quel instant et non pas seulement toutes les quinze secondes. La similitude entre le destin des dés et celui de l'émanation confirme que *la radioactivité est un processus atomique*. Un atome radioactif est mortel, mais il ne vieillit jamais. Quel que soit son âge (une heure ou un siècle), il a la même probabilité de disparaître dans la seconde qui suit.

En 1898, Marie Curie avait déjà affirmé que la radioactivité était une propriété atomique et qu'elle ne dépendait pas de la manière dont ces atomes se combinent ou se mélangent dans les échantillons solides qu'elle étudiait. Rutherford et Soddy font un pas de plus: ils affirment que l'émission radioactive peut se produire au sein de chaque atome d'un élément radioactif et que les atomes d'un même échantillon se comportent en toute indépendance.

Les choses se clarifient encore lorsque l'on découvre que les éléments chimiques peuvent prendre des formes distinctes. Tout en participant aux mêmes réactions chimiques, ils peuvent avoir un comportement radioactif différent. En général, le plomb n'est pas radioactif, mais il arrive que celui que l'on découvre dans les minerais d'uranium le soit. A ces variétés d'un même élément, Soddy donne en 1910 le nom d'*isotopes*, un concept qui nécessite la définition de la masse atomique.

Le *nombre atomique* est une conquête de la chimie du XIX^e siècle et notamment de la théorie atomique. Il désigne le numéro d'ordre de l'élément dans le tableau périodique (annexe 2). Quant à la *masse atomique*, elle s'obtient en divisant la masse d'un atome neutre d'un élément particulier par le douzième de la masse de l'isotope C^{12} qui sert d'*unité de masse atomique*. Il s'agit là d'une masse minuscule qui ne vaut que $1,66057 \cdot 10^{-27}$ kg. Quand on procède ainsi, on constate que, en général, les atomes d'un élément particulier se regroupent en familles d'isotopes distincts, tous caractérisés par *une masse atomique proche d'un entier*, ce qui justifie a posteriori une certaine circularité des définitions.

De manière générale, à chaque élément chimique correspond une série d'isotopes. Ils diffèrent quant à la valeur de leur masse mais ils ont les mêmes propriétés chimiques. Comme le montre le tableau 3.1, un élément chimique se reconnaît à son symbole (H, He, Be, C,...), et les divers isotopes du même élément se distinguent par la masse: H^1 , H^2 , et H^3 sont les trois isotopes connus de l'hydrogène. *La donnée du nombre atomique n'est pas indispensable, car elle est implicitement connue quand l'élément chimique est précisé.*

Tableau 3.1 Le nombre atomique, inscrit en bas à gauche du symbole chimique, désigne le numéro d'ordre de l'élément dans le tableau périodique (annexe 2). La masse atomique est la masse d'un atome particulier, généralement exprimée comme le rapport de la masse de cet atome au douzième de la masse d'un atome de ${}_{6}\text{C}^{12}$; on dit alors qu'elle s'exprime en unités de masse atomique. Le nombre qui figure en haut à droite du symbole de l'isotope considéré représente sa masse atomique arrondie à l'entier le plus proche. Les isotopes radioactifs sont marqués d'un astérisque.

Isotope	Nom de l'isotope	Particularité	Masse atomique
${}_{1}\text{H}^1$	Hydrogène	son noyau s'identifie au proton	1,007825
${}_{1}\text{H}^2$	(Deutérium)	isotope de l'hydrogène	2,0140
${}_{1}\text{H}^3 *$	(Tritium)	isotope radioactif de l'hydrogène	3,01605
${}_{2}\text{He}^3$	Hélium 3		3,01603
${}_{2}\text{He}^4$	Hélium 4	son noyau s'identifie à une particule alpha	4,00260
${}_{4}\text{Be}^8 *$	Béryllium 8		8,0053
${}_{6}\text{C}^{12}$	Carbone 12		12,00000
${}_{6}\text{C}^{13}$	Carbone 13		13,00335
${}_{6}\text{C}^{14} *$	Carbone 14	utilisé pour la datation archéologique	
${}_{8}\text{O}^{16}$	Oxygène 16		15,99491
${}_{26}\text{Fe}^{56}$	Fer 56	le noyau le plus stable connu	55,9349
${}_{86}\text{Rn}^{222} *$	Radon 222	produit de la désintégration du radium 226	222,0175
${}_{88}\text{Ra}^{226} *$	Radium 226	l'isotope qui a fait la gloire des Curie	226,0254
${}_{90}\text{Th}^{234} *$	Thorium 234	produit de la désintégration de l'uranium 238	234,0436
${}_{92}\text{U}^{238} *$	Uranium 238		238,0508

Où l'on retrouve la chaleur interne

On a évoqué plus haut la sieste de Kelvin qu'une conférence de Rutherford avait failli troubler. Mais de quoi parlait Rutherford à cette occasion? C'est le moment d'y revenir.

En 1905, deux ans s'étaient écoulés depuis que Curie et Laborde avaient réalisé l'importance de l'énergie rayonnée par certains éléments radioactifs. Lors d'une désintégration, une certaine quantité d'énergie est projetée dans l'environnement. Initialement contenue dans les substances radioactives, sous une forme encore énigmatique, elle se transforme en *énergie cinétique* des particules émises. Cette forme de l'énergie dépend de la *masse* et surtout de la *vitesse* des particules: quand la vitesse double ou triple, l'énergie cinétique est respectivement multipliée par quatre ou par neuf. On retrouve cette forme de l'énergie dans la vie quotidienne. Lors d'un accident de la circulation, les

dégâts subis dépendent directement de la valeur de l'énergie cinétique. Si deux voitures comparables circulent chacune à cent kilomètres à l'heure et entrent en collision frontale, c'est la vitesse relative (deux cents kilomètres à l'heure) qui est en jeu. Les dégâts subis sont seize fois plus importants que lorsque l'un des véhicules, circulant à cinquante kilomètres à l'heure, entre en collision avec un obstacle immobile. Mais allez expliquer cela à un chauffard ivre...

Cette même année 1905, cela fait déjà trois ans que Rutherford et Soddy ont introduit le concept de demi-vie d'un élément radioactif. Leur découverte a démontré que tout processus de désintégration est limité dans le temps. La «bûche radioactive» peut se consumer rapidement, elle peut aussi brûler pendant des millions d'années, mais elle finit toujours par être réduite en cendres. Décidément, la radioactivité s'abreuve à une source d'énergie presque intarissable, mais encore inconnue.

Point plus important pour l'histoire de la Terre, la quantité de chaleur que dissipent les éléments radioactifs enfouis dans les roches compense celle qui, fuyant à travers la surface de notre planète, est rayonnée dans l'espace. Dans notre planète, l'uranium est quatre fois plus abondant que le cuivre. Combiné à d'autres éléments, il forme des sels qui sont solubles dans l'eau et, de ce fait, se répandent dans l'environnement. On en trouve aussi bien dans l'eau de mer que dans le granit ou le charbon. Depuis la naissance de la Terre, *la chaleur interne a eu le temps de disparaître* comme Kelvin le pensait, mais *elle a été sans cesse compensée par le combustible radioactif qui, cependant, s'épuise inexorablement*. Le processus le veut ainsi: qui dit «demi-vie» dit aussi «vie limitée».

La taille de la Terre et sa distance au Soleil sont adaptées à la vie

Mercury, Vénus («l'étoile du Berger»), la Terre et Mars («la planète rouge») entrent dans une même catégorie, celle des *planètes telluriques*; on peut aussi y ranger la Lune puisque son rayon dépasse les sept dixièmes de celui de Mercury (tab. 3.2). A l'aube de l'histoire du système solaire, alors que le Soleil se formait à partir d'une *nébuleuse* de gaz et de poussières dont les planètes allaient également tirer leur substance, la température s'élevait peu à peu. Quand leur tour vint de croître aux dépens de la nébuleuse, les planètes telluriques ne purent retenir l'hydrogène et l'hélium, les deux gaz les plus légers qui soient. Elles n'ont conservé que des constituants plus pesants, des composés chimiques solides ou liquides. Leurs atmosphères, quand elles en ont une, ne comportent guère que les gaz plus lourds que sont notamment l'azote, l'oxygène ou le gaz carbonique.

La comparaison entre planètes telluriques ne fait que confirmer l'importance que joue la radioactivité des roches dans le bilan énergétique. Imaginons deux planètes telluriques formées simultanément. Elles ont même composition et leurs constituants sont distribués de manière analogue. La planète *A* ne se distingue de sa sœur *B* que par son rayon, double de celui de *B*. Dans ces conditions, il y a fort à parier que *B* s'est refroidie bien plus considérablement que *A*.

Tableau 3.2 Données relatives aux planètes telluriques et à la Lune.

	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Lune
Distance moyenne au Soleil (UA) ⁴	0,387	0,723	1	1,524	1
Masse (en comparaison de celle de la Terre)	0,055	0,815	1	0,108	0,012
Rayon (km)	2433	6053	6371	3380	1738
Densité moyenne	5,4	5,3	5,5	3,9	3,34
Atmosphère (principaux constituants)	–	Gaz carbonique	Azote Oxygène	Gaz carbonique Argon	–
Pression atmosphérique (atmosphères)	–	90	1	0,006	–

La raison est simple. Puisque les *rayons* des deux planètes sont dans un rapport 2:1, leurs *volumes* sont dans le rapport 8:1. Il en est de même de la production de chaleur. Elle est due à la désintégration d'éléments radioactifs qui sont huit fois plus nombreux à l'intérieur de A. En ce qui concerne la chaleur qui s'évade dans l'espace en franchissant la surface de chaque planète, elle est proportionnelle à leurs *aires* respectives qui, contrairement aux volumes, sont dans le rapport 4:1. La conclusion est claire: la planète A met plus de temps à se refroidir que la planète B. Si on les assimile à des poêles à charbon bourrés du même combustible, placés dans des pièces séparées et allumés en même temps, le plus gros fourneau chauffe mieux et plus longtemps que son concurrent. C'est aussi simple que cela.

Et c'est bien ce que l'on observe. La Lune a cessé toute activité thermique depuis fort longtemps: elle ne présente plus de volcanisme. Il en est de même de Mercure mais, comme la Terre, cette petite planète se comporte comme un aimant qui agirait sur la boussole d'un astronaute assez fou pour arpenter les paysages mercuriens, aussi désolés que ceux de la Lune. Cette activité magnétique est peut-être due à l'existence, au centre de la planète, d'un noyau de fer liquide analogue à celui que l'on trouve au centre de la Terre. Si c'est le cas, cela implique que le fer de Mercure est sous une forme chimique qui lui permet de rester liquide à des températures plus basses que celles qui règnent au centre de la Terre [37].

La taille de Mars est intermédiaire entre celle de Mercure et celles des deux plus grandes planètes telluriques, la Terre et Vénus. La planète rouge présente des traces bien visibles d'une activité volcanique ancienne et semble avoir passablement ressemblé à la Terre à une époque reculée. Sa surface présente de nombreuses traces d'érosion par une eau sans doute présente dans un passé très reculé. Actuellement, elle ressemble à un désert de sable. Ses pôles sont recouverts par des calottes de glace carbonique et, probablement, de glace ordinaire.

Vénus et la Terre pourraient être de grandes sœurs jumelles. Comme la Terre, Vénus semble encore être la proie d'une activité volcanique. Mais elle est surtout le siège d'un furieux effet de serre: à sa surface règnent une température de l'ordre de 400° C et une pression de 90 atmosphères. Voilà qui n'en fait pas un lieu de séjour rêvé pour d'improbables astronautes [37, 38]. Quant à la Terre, son activité volcanique est patente. Circonstance capitale, notre planète paraît avoir la distance au Soleil propre à favoriser l'apparition de la vie. La présence d'une atmosphère bien peu épaisse en comparaison de celle de Vénus permet à l'eau liquide de subsister sur de grandes étendues.

Que notre planète abrite la vie est une circonstance prodigieuse. Pour que ce phénomène extraordinaire ait pu se produire, il semble que d'innombrables facteurs ont dû être réunis simultanément [39]. La vie est-elle rare ou est-elle fréquente dans l'univers? N'existe-t-elle que sur la Terre? Ces questions sont les plus profondes que puissent aujourd'hui se poser la science et la philosophie. Ce n'est pas la spéculation qui nous permettra d'y répondre mais bien la visite des régions du système solaire susceptibles d'abriter une forme très élémentaire de vie. On ne s'attend pas à y trouver des êtres semblables à nous: les Martiens sont morts avant d'être nés. Mais peut-être existe-t-il des traces de vie, fossiles ou non, sur Mars ou dans un autre coin du système solaire?

Quant aux planètes extrasolaires, malgré leur distance, il n'est pas impossible qu'elles nous réservent des surprises dans le futur... Comme le moine dominicain Giordano Bruno qui fut brûlé pour avoir posé la question, nous nous poserons la question de l'existence d'une vie en dehors du système solaire. A moins, bien sûr, que nous ne soyons assez fous pour nous détruire auparavant.

Qu'est-ce qui prime: le Soleil ou la chaleur interne?

En somme, la surface de la Terre et cette fine pellicule gazeuse qui la recouvre, l'atmosphère, bénéficient de deux installations de contrôle de la température, le chauffage aux infrarouges et le chauffage par le sol.

Le premier système nous vient du Soleil. Il ne se contente pas de maintenir sur notre globe une température propre à l'épanouissement de la vie. Il brasse l'atmosphère, la charge de nuages, déclenche la foudre, crée les tempêtes et érode les reliefs. Le second mode de chauffage est issu du centre de la Terre. Il alimente le volcanisme, provoque les séismes, soulève les massifs montagneux et déplace continents et océans. Laquelle de ces deux sources de chaleur est la plus importante? La réponse est connue depuis belle lurette.

On ne va pas recourir à une évaluation numérique des flux de chaleur respectifs; elle nécessiterait l'emploi d'arguments quelque peu techniques. On se contentera de faire une observation propre à rendre plausible la priorité que la nature a accordée à l'énergie solaire. Elle concerne les températures superficielles respectives de la Lune et de la Terre.

⁴ L'unité astronomique, abrégée UA, est la distance moyenne Terre-Soleil. Elle mesure 149,6 millions de kilomètres.

Les deux corps sont à la même distance moyenne du Soleil. A l'intérieur de la Terre, la température dépasse 4000°C. Sur la Lune, l'activité thermique n'a perduré que pendant un milliard d'années: il est clair que notre satellite, bien petit en comparaison de la Terre, n'a pas pu emmagasiner beaucoup de chaleur [37]. Crûment, on peut dire que les deux corps célestes bénéficient d'un chauffage aux infrarouges identique alors que le chauffage par le sol n'existe que sur la Terre. Si ce second mode de chauffage était essentiel pour le maintien de la température superficielle, la surface de la Lune serait beaucoup plus froide que celle de la Terre. Mais ce n'est pas le cas: si la température descend jusqu'à 150 à 170°C au-dessous de zéro pendant la nuit lunaire, elle peut monter jusqu'à 120°C en plein soleil. Quant à notre planète, le cycle diurne y est trente fois plus court que sur la Lune et, surtout, la Terre bénéficie d'un effet de serre non négligeable du fait de son atmosphère. Ces deux points suffisent à expliquer les différences de température entre la Terre et la Lune sans qu'il soit nécessaire de faire appel à la chaleur interne. Quand on passe aux évaluations précises, on s'aperçoit que, bon an, mal an, l'énergie que dispense le Soleil à la Terre est environ cinq mille fois supérieure à celle qui nous vient de l'intérieur de notre globe.

La radioactivité a beau être de nature probabiliste, tout isotope radioactif est voué à la désintégration. Très souvent, l'isotope produit est lui-même radioactif et le processus peut se poursuivre. Mais la chaîne se termine nécessairement au bout d'un certain nombre d'étapes. L'uranium 238⁵ se décompose en thorium 234, lequel se désintègre en protactinium 234. Encore quatre étapes, et l'on arrive au radium 226 de Marie Curie qui se décompose en radon 222. Mais la série se termine inéluctablement lorsque les produits des produits de cet isotope aboutissent au plomb 206 qui ne se désintègre plus: il s'agit là d'un *isotope stable*. Toutes les séries radioactives se terminent ainsi.

Il est temps de s'interroger sur l'origine de l'énergie qui est à l'œuvre lors d'une désintégration radioactive.

Un étrange écolier

1905 est l'année où, devant Kelvin endormi, Rutherford propose une alternative au refroidissement de la Terre. Mais c'est aussi l'année où, à Berne, un jeune employé de l'Office fédéral des brevets découvre une nouvelle forme d'énergie. On réalisera rapidement que c'est à cette source que la radioactivité s'abreuve.

Comme Darwin, Albert Einstein (1879-1955) traîne une réputation de cancre parfaitement injustifiée. Tout au plus peut-on remarquer que, pour entrer dans la peau d'un élève docile, il avait un esprit trop critique, ingrédient indispensable à la manifestation de ses dons extraordinaires. Il est vrai que, dans sa prime enfance, Albert semble bien avoir inquiété ses parents. Ils craignaient qu'il ne fût retardé tant il tardait à parler. «Ces angoisses n'étaient pas fondées. Selon les propres dires d'Einstein, à l'âge de deux ou trois ans, il avait

⁵ Une autre façon de désigner U²³⁸.

l'ambition de former des phrases complètes qu'il répétait pour lui à voix basse avant de les formuler à voix haute.» [40].

Hermann Einstein, le père d'Albert, a plus d'intérêt pour les mathématiques et la littérature que pour le commerce, si bien qu'il doit abandonner la boutique qu'il possède à Ulm. La famille déménage à Munich et Hermann s'associe avec son frère pour monter une petite fabrique d'instruments électrotechniques. Dès l'âge de 9 ans, Albert entre au lycée, le Luitpold Gymnasium. Il a beau être bon élève, il en gardera toute sa vie un mauvais souvenir. Il n'a pas d'amis et déteste la gymnastique et les sports. Une anecdote rapportée plus tard par Einstein lui-même rappelle les expériences faites par Darwin dans son propre lycée. Un de ses maîtres s'adresse un jour à Albert: « Je serais beaucoup plus heureux si vous n'étiez pas dans cette classe! » Einstein rétorque qu'il n'a rien fait de mal. La réponse ne se fait pas attendre: « Peut-être, mais vous souriez de votre banc au fond de la salle, ce qui va à l'encontre du sentiment de respect qu'un maître est en droit d'attendre de sa classe. » Einstein n'était pas un rebelle mais il se gaussait de toute autorité injustifiée. [40].

L'usine que dirigent son oncle et son père est bientôt confrontée à des problèmes financiers, si bien que la famille Einstein doit déménager à nouveau, cette fois pour Milan puis Pavie. Il est entendu qu'Albert va poursuivre ses études à Munich. Bien malheureux de voir partir sa famille et effrayé à l'idée de devoir faire son service militaire comme sujet de l'empereur d'Allemagne, Albert quitte la Bavière et rejoint ses parents stupéfaits à Pavie. Il a tout juste seize ans. Bien que l'âge d'entrée normal à l'École polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ) soit de dix-huit ans, Albert leur promet de passer dès l'automne les examens d'entrée.

En octobre 1895, le moment est venu de tenir cette promesse. Le programme des examens comprend des mathématiques et des sciences, ce qui lui convient parfaitement. Mais il doit aussi prouver ses capacités dans les branches dites classiques, et notamment en français. C'est l'échec, prévisible pour un lycéen qui, à l'exception de l'allemand et du latin, ne prise guère les langues.

Son échec à l'examen d'entrée est peut-être à l'origine de cette réputation de cancre que l'on s'obstine à lui faire. Mais il s'agit là d'un échec salutaire et seulement provisoire. Ses connaissances sont insuffisantes dans les disciplines classiques, mais ses capacités en physique et en mathématiques frappent les enseignants qui l'interrogent. Ils l'encouragent à combler ses lacunes et à préparer au lycée d'Aarau la « maturité » (l'équivalent suisse du baccalauréat), conseil qu'il suit scrupuleusement. Pour la première fois de sa jeune existence, il fréquente une école qui lui plaît. Tout se passe bien et Einstein a dix-sept ans quand il entre à l'EPFZ.

On pouvait s'y attendre, Einstein ne se montre pas un étudiant assidu. Il passe son temps à lire les ouvrages des grands auteurs, mais n'assiste pas avec une régularité suffisante aux cours auxquels il est astreint. Sa fréquentation des laboratoires est épisodique. Ce qui ne l'empêche pas d'être reçu avec trois autres étudiants lors d'un examen final qui lui ouvre les portes de l'enseignement secondaire. Son manque d'assiduité se paie aussitôt: à son grand déplaisir, il est le seul des quatre lauréats à ne pas décrocher de poste d'assistant.

En 1896, il avait renoncé pour trois marks à la nationalité württembergoise. En 1901, après avoir économisé pendant cinq ans la somme néces-

saire, il devient citoyen suisse. Il le restera toute sa vie. En 1914, nommé directeur de l'Institut de physique Kaiser Wilhelm, il devra prendre la nationalité allemande. Il y renoncera en 1933 pour fuir le régime nazi et s'établir aux Etats-Unis. Einstein sera fait citoyen américain en 1940. Après la guerre, il déclinera l'offre du gouvernement israélien de prendre la présidence de l'état nouvellement créé. Victime de sa renommée incomparable et des aléas de la politique, il n'aura choisi librement que la seule citoyenneté helvétique, et ce sera la seule à lui avoir coûté une somme importante.

Entre 1900 et 1902, Einstein doit vivre de travaux d'enseignement temporaires, mais il finit par être nommé à l'Office fédéral des brevets de Berne. Il peut se marier et se consacrer à la physique.

Annus mirabilis

Les historiens découpent l'histoire en siècles. Mais ils ne les font pas commencer comme les calendriers usuels. Ils ont une prédilection pour les millésimes qui se terminent par 14 ou 15. Pour les Français, le treizième siècle commence en 1214, date de la bataille de Bouvines, le seizième en 1515 (Marignan), le dix-huitième débute en 1715, à la mort de Louis XIV (encore un quatorze), et se termine lors de la prise de la Bastille, en 1789. Toute la période de la révolution est exclue de cette division en siècles, et le dix-neuvième siècle ne commence qu'en 1815, lors de la bataille de Waterloo. Le vingtième siècle, enfin, ne naît qu'en 1914, quand le déclenchement de la Première Guerre mondiale met irrémédiablement un terme aux fanfreluches de la Belle Epoque. De par sa référence presque constante à la seule histoire de France, ce découpage est bien artificiel, sauf peut-être en ce qui concerne le choix du début du XX^e siècle, marqué par un événement mondial.

A cause de ce découpage de l'histoire, 1905 appartient à l'atmosphère si particulière des fins de siècle. L'année est à cheval sur le passé et l'avenir. Le passé, ce sont les guerres coloniales, la guerre russo-japonaise, le désastre russe à Port-Arthur et en Mandchourie, le débarquement à Tanger de l'empereur Guillaume II qui dispute le Maroc à la France. L'avenir, c'est la révolte des marins du *Potemkine*, les grévistes mitraillés à Saint-Petersbourg devant le Palais d'hiver, la journée de huit heures accordée aux mineurs français. Ce sont Matisse, Derain et Vlaminck qui exposent au Salon d'automne. On les baptise les «fauves». C'est Manuel de Falla qui compose *La Vie Brève*.

Mais c'est aussi – on a envie de dire c'est surtout – l'*annus mirabilis*⁶ d'Albert Einstein. Durant cette seule année, il fait quatre découvertes majeures pour la physique et pour la conception que nous nous faisons de l'univers.

Einstein commence par imaginer une méthode qui, en 1908, permettra au Français Jean Perrin (1870-1954) de démontrer expérimentalement l'existence

⁶ Année extraordinaire. L'*annus mirabilis* est le terme utilisé pour qualifier la période la plus féconde de la carrière d'Isaac Newton qui, entre 1664 et 1666, fait des découvertes fondamentales en optique, établit les fondements du calcul différentiel et intégral et de la mécanique et découvre la loi de la gravitation universelle.

des molécules en les comptant et, accessoirement, de recevoir le prix Nobel de physique 1926. Désormais on saura avec précision combien un litre d'eau ou un gramme de sel de cuisine contiennent de molécules. Dans les travaux qui serviront de base aux expériences de Perrin, Einstein, qui est un *physicien théoricien*, ne discute pas de la réalisation concrète de la mesure envisagée. Il se contente d'établir des relations entre des grandeurs aisément mesurables – la taille et le mouvement désordonné d'un grain de pollen en suspension dans l'eau – et la propriété moléculaire cherchée, inaccessible jusqu'alors. En 1827 déjà, le microscope avait révélé qu'une poussière plongée dans un liquide se met à gigoter si sa taille est suffisamment faible, mais il fallut attendre des décennies avant de comprendre la signification d'un tel phénomène. Il faut convenir que la méthode proposée par Einstein n'était pas la première à permettre le décompte des molécules, mais elle était parfaitement dans son style. Remarquable dans la simplicité trompeuse du principe de la mesure, elle met en œuvre des concepts délicats de la statistique et de la mécanique des fluides.

La même année, Einstein explique l'*effet photoélectrique* qui marie les propriétés électriques d'un métal et celles de la lumière. Il s'agit là de l'une des découvertes fondatrices de la physique quantique. Elle lui vaudra le prix Nobel de physique 1921.

Sans risque de se tromper, on peut cependant affirmer que les deux autres découvertes sont d'une importance bien supérieure. Elles constituent deux chapitres de ce que l'on appelle un peu malheureusement la *théorie de la relativité restreinte*, l'adjectif ayant été introduit plus tard pour la distinguer de son prolongement, la *théorie de la relativité générale*. En 1905, Einstein n'en est encore qu'à la relativité restreinte. C'est dans ce cadre qu'il modifie notre conception de l'espace et du temps et qu'il met en évidence une source incomparable d'énergie.

Il n'est pas question de développer ici la fameuse théorie de la relativité bien que, contrairement à ce que l'on croit souvent, on puisse en exposer la substantifique moelle sans faire appel à des mathématiques d'un niveau supérieur à celui du lycée; s'il y a difficulté, c'est dans la nouveauté des concepts qu'il faut la chercher. En revanche, il serait regrettable d'omettre le cheminement qui amène le jeune fonctionnaire bernois à bouleverser les concepts sur lesquels reposaient depuis toujours notre vision du monde. Écoutons Einstein: «Le plus beau sentiment que nous puissions éprouver est celui du mystère. C'est cette émotion qui est à l'origine de l'art et de la science dans ce qu'ils ont de plus spécifique. Celui qui n'a jamais fait cette expérience, celui qui a perdu la capacité de s'étonner et d'admirer a fermé pour toujours les yeux à la vie.» [41]

Changer notre conception de l'espace et du temps

L'Écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) est certainement l'un des plus grands physiciens théoriciens du XIX^e siècle. Comparant entre elles les lois fondamentales de l'électromagnétisme, il s'aperçoit que leur synthèse n'est possible que si on leur apporte une correction. Cette modification, parfaitement compatible avec la description des phénomènes électromagné-

tiques connus jusqu'alors, réserve une surprise de taille. Maxwell constate que *les lois ainsi modifiées impliquent l'existence d'ondes électromagnétiques*. Plus précisément, en 1865, il prédit que des ondes vont apparaître chaque fois que l'on crée un courant alternatif à haute fréquence dans un circuit. Il en calcule la vitesse de propagation et constate qu'elle est identique à celle de la lumière, soit 300 000 kilomètres à la seconde, et traditionnellement désignée par le symbole *c*. Maxwell en tire la conclusion qui s'impose: *la lumière est une onde électromagnétique* caractérisée par une bande de fréquences bien précise. Ce n'est qu'en 1888 que le physicien allemand Heinrich Hertz (1857-1894) démontre pour la première fois l'existence des ondes radio, autrement dit d'ondes électromagnétiques produites par un circuit électrique. On a là un exemple magnifique d'une recherche fondamentale qui débouche sur des applications dont il est impossible de surestimer l'importance.

Du point de vue de la cohérence de la physique, la découverte des *lois de Maxwell* pose un certain nombre de problèmes qui n'apparaîtront que progressivement. Une sorte de malaise envahit la physique de la fin du XIX^e siècle sans que l'on en prenne nécessairement conscience ni que personne soit en mesure de poser un diagnostic précis. Personne, sauf Einstein. Il réalise peu à peu que les lois de Maxwell et la mécanique classique sont incompatibles et trouve un moyen de sauver le mariage. La cure qu'il préconise est simple mais coûteuse: il s'agit de modifier la conception que nous avons de l'espace et du temps, en un mot de *l'espace-temps*.

En juin 1905, Einstein publie dans *Annalen der Physik* un article intitulé *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*⁷ [42]. Cet article ne comporte aucune référence à des articles ou des ouvrages scientifiques antérieurs, mais il élimine toutes les difficultés que la physique avait rencontrées à la suite de la découverte de Maxwell.

Les modifications de l'espace-temps que propose Einstein ne sont pas perceptibles dans la vie quotidienne. La mécanique classique est un édifice solide; elle n'est pas une entreprise d'amateurs. On admet qu'elle est née au début du XVII^e siècle avec l'œuvre de Galilée, le nom francisé de Galileo Galilei (1564-1642). Dans la légende, il est souvent associé à la Tour de sa Pise natale: on le voit lançant divers objets du haut d'une tour penchée dont on se plaît à croire qu'on l'a construite ainsi pour lui permettre d'établir la loi de la chute des corps. En fait, s'il est bien l'auteur de cette découverte, il y est parvenu en utilisant des plans inclinés sur lesquels il faisait rouler des boules. Après Galilée, grâce aux contributions de Newton et de ses successeurs, la mécanique classique a acquis le statut de discipline achevée. C'est elle qui nous permet d'envoyer des hommes sur la Lune et de songer à faire atterrir un véhicule sur une comète. C'est dire qu'Einstein lui-même ne peut la déclarer caduque d'un jour à l'autre.

En revanche, sans remettre en cause un héritage de trois siècles, Einstein peut préconiser des aménagements de la mécanique et de notre conception de l'espace-temps quand il s'agit de les appliquer dans des conditions tout à fait nouvelles. C'est notamment le cas lorsque *les objets étudiés se déplacent*

⁷ «L'électrodynamique des corps en mouvement».

à une vitesse proche de celle de la lumière c : cette vitesse joue un rôle central dans l'argumentation d'Einstein. Il vaut la peine de se pencher sur un exemple fameux d'une telle situation, fameux parce qu'il heurte de plein fouet notre intuition. Il fait appel au comportement d'une particule découverte en 1937, bien après l'avènement de la relativité.

Malgré une masse 207 fois supérieure à celle de l'électron, le *muon* est très semblable à son petit frère, si ce n'est que, avec sa demi-vie d'un millionième de seconde (précisément $1,52 \cdot 10^{-6}$ s), il est instable. Il se désintègre en un électron en émettant simultanément deux membres de la famille des *neutrinos*, des particules si discrètes qu'elles sont très difficiles à détecter, notamment parce qu'elles ne portent pas de charge électrique. Il se trouve que la Terre est constamment bombardée par des *rayons cosmiques*, des particules venues d'ailleurs qui entrent en collision avec les molécules de la haute atmosphère, à environ dix kilomètres d'altitude. Ces chocs donnent fréquemment naissance à des muons très rapides qui se déplacent généralement de haut en bas et à une vitesse proche mais inférieure à celle de la lumière. Or, pendant un intervalle aussi court que $1,52 \cdot 10^{-6}$ s, même s'il se déplaçait à la vitesse de la lumière, un muon ne pourrait parcourir que 450 mètres. Il a une chance sur deux de se désintégrer avant de franchir cette distance, et une chance sur quatre d'atteindre 900 mètres. Si l'on poursuit ce raisonnement, on conclut que seul un muon sur 4 millions pourrait atteindre le sol, *en contradiction flagrante avec l'observation qui assure que la plupart des muons ne se désintègrent qu'après avoir atteint le sol.*

Il y a là une anomalie choquante. On a vu plus haut que rien ne peut modifier la demi-vie d'un atome radioactif, ni la température, ni la pression, ni la combinaison chimique dont il fait partie. Il en est de même des particules instables comme le muon. C'est donc ailleurs qu'il faut chercher le mot de l'énigme, et plus précisément dans les modifications spectaculaires que la théorie de la relativité a introduites dans notre conception de l'espace-temps, attitude légitime puisque les muons se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière.

La théorie d'Einstein commence par nous rassurer: la mystérieuse horloge qui règle la vie du muon fonctionne parfaitement. Mais elle nous plonge aussitôt dans la perplexité: *comme le muon se déplace par rapport à nous à une vitesse comparable à celle de la lumière, l'horloge interne du muon, enclenchée au moment de sa naissance, nous semble frappée d'une étrange lenteur.* Quand le muon arrive au sol, son horloge ne marque pas encore $1,52 \cdot 10^{-6}$ s. Et ce retard est d'autant plus grand que la vitesse de la particule est proche de c . Telles sont les affirmations contenues dans le fameux article paru en juin 1905. Pour le profane, elles constituent un défi au bon sens, mais *leur validité se vérifie chaque jour* dans des institutions comme le CERN.

De son côté, si on lui donne – très vite! – la parole, le muon affirme que son horloge n'est nullement en cause. Elle fonctionne parfaitement. Mais son opinion diffère de la nôtre sur un point important. Au moment où le muon est créé dans la haute atmosphère, *le sol lui semble très proche*; il évalue sa distance à moins de 450 mètres. Le message de la théorie de la relativité ne souffre aucune ambiguïté. *Comme le temps et sa mesure, la durée, l'espace et la distance ont perdu leur caractère absolu.* Comme le muon vit un peu plus de 10^{-6} s et que sa vitesse est très proche de c , il est convaincu de pouvoir arri-

ver au sol! Le muon fait les mêmes prédictions que nous: il y a de fortes chances qu'il arrive au sol avant de se désintégrer. Le muon et nous utilisons des arguments incompatibles en apparence, mais parfaitement cohérents quand on les replace dans le cadre de la relativité.

Pour assurer la cohérence de la physique, Einstein lui a imposé des aménagements qui sont observables même dans le cadre de notre vie quotidienne: les bizarreries de l'espace-temps ne sont pas confinées dans le ghetto des objets microscopiques et rapides. Le 22 novembre 1975, un avion effectue de nombreux cercles au-dessus d'une base de la Marine américaine. Il emporte une horloge atomique identique à un instrument resté au sol. Sa vitesse, cinq cents kilomètres à l'heure, est bien peu de chose face à celle de la lumière. Au bout de quinze heures, le retard de l'horloge embarquée dans l'avion s'élève à quelques milliardièmes de seconde, un retard parfaitement compatible avec les prévisions de la théorie de la relativité [43]. Si l'on fait abstraction de la tension du décollage et de l'atterrissage ou de tout autre phénomène analogue, le cœur du pilote en a fait de même. Il a battu plus lentement que s'il était resté au sol, son sang s'est écoulé plus lentement dans ses artères. En un mot, *il a vécu plus lentement*. Mais l'élixir de jeunesse que détient un pilote d'avion n'a aucune efficacité. Un aviateur qui effectuerait chaque jour cette même expérience n'aurait gagné qu'un dix-millième de seconde au bout de cinquante ans...

L'histoire n'est pas tout à fait terminée. En 1921, alors qu'Einstein visite pour la première fois les Etats-Unis, une rumeur se répand. Une nouvelle expérience aurait remis en cause la théorie de la relativité. Einstein, mis au courant, s'écrie: «*Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist er nicht.*»⁸ [40] Il a raison. La rumeur était sans fondement.

La formule que tout le monde connaît

Un pays qui se donne une nouvelle constitution doit nécessairement revoir toute sa législation afin d'éliminer les nombreuses contradictions qui se feraient jour. De manière semblable, Einstein ne pouvait toucher à l'espace-temps sans aménager l'ensemble de l'édifice de la physique classique. Le nouveau principe de relativité est l'analogue d'une nouvelle constitution. Il entraîne notamment une révision de notre conception traditionnelle de l'énergie.

En septembre 1905, l'*annus mirabilis* n'est pas terminée. Einstein publie un nouvel article qui est appelé à révolutionner notre conception de l'énergie et, accessoirement, à procurer une sorte de slogan pour Einstein et pour la théorie de la relativité restreinte [44]. A défaut d'en bien comprendre la signification, tout le monde connaît la fameuse *formule d'Einstein*

$$E = mc^2$$

⁸ «Le Bon Dieu a beau être subtil, il n'a pas une once de méchanceté.»

En réalité, quand elle entre dans l'histoire, la fameuse formule apparaît sous une forme moins spectaculaire, mais équivalente. On peut d'ailleurs regretter que, en physique, on parle sans cesse de «formules». Ce terme est reconnu par les dictionnaires, mais il est malheureux car il met sur le même pied le «sésame, ouvre-toi» d'Ali Baba et une *relation entre grandeurs physiques* dont le contenu est infiniment plus riche que la caverne des quarante voleurs: on peut lire de plusieurs façons la formule d'Einstein qui établit une relation inattendue entre la masse m d'un corps et son *énergie totale* E , c^2 étant le carré de la vitesse de la lumière dans le vide.

Une mise en garde préliminaire est nécessaire. *La relation d'Einstein n'a pas d'intérêt en dehors du monde microscopique, celui des atomes et des particules*⁹. Non pas que sa validité cesse dans la vie quotidienne. La mécanique classique est adaptée à la description des phénomènes qui se déroulent à notre échelle. La théorie de la relativité, en revanche, est beaucoup trop sophistiquée pour cet usage. Se servir de la relativité pour décrire la trajectoire d'un ballon de football ou les acrobaties d'un jongleur serait aussi vain que de déranger le service du feu pour éteindre une bougie.

Pour bien comprendre la relation d'Einstein, il convient d'être au clair sur les deux concepts que sont la masse et l'énergie. La masse appartient à la langue de tous les jours. Pour la définir en physique, le plus simple consiste à imiter Newton en affirmant que *la masse d'un corps s'obtient en multipliant sa densité par son volume*¹⁰. Quant à l'énergie, c'est un concept que la physique a développé vers le milieu du XIX^e siècle. Si l'on se restreint au domaine des particules, les choses sont simples: l'énergie totale d'une particule ne comporte que deux composantes, l'énergie de masse et l'énergie cinétique.

L'énergie de masse

Quand une particule ou un atome sont au repos, ils possèdent une masse bien déterminée, dite aussi *masse de repos* pour éviter toute confusion. C'est la valeur de la masse de repos que l'on trouve dans les tables de constantes et c'est à elle qu'est associée une *énergie de masse*. Comme le prévoit la relation d'Einstein, cette forme d'énergie se détermine en multipliant la masse de repos par c^2 . Elle est parfaitement mesurable et intervient dans le bilan énergétique d'une réaction. Elle a donc sa place en physique. L'exemple des paires électron-positon est là pour en témoigner.

Alors que l'électron est connu depuis 1897, son partenaire, le *positon*, n'a été découvert qu'en 1932. Les deux particules ont la même masse mais leurs charges sont opposées. Alors que l'électron est un constituant de la matière ordinaire, celle dont nous sommes faits, le positon est un *antiélectron* et à ce titre, il est un constituant de ce que l'on appelle l'*antimatière*. Loin de vivre liés l'un à l'autre comme des frères siamois, le couple électron-positon disparaît

⁹ On la retrouve également dans certains domaines de l'astrophysique.

¹⁰ A condition d'exprimer la densité en grammes par cm^3 ou en kilos par m^3 . Une telle définition est circulaire mais évite des complications inutiles.

lorsque ses membres sont mis en contact. Selon la terminologie consacrée, *la paire électron-positon s'annihile* et donne naissance à deux rayons gamma jaillissant du point où les particules sont retournées au néant. Il est possible de mesurer exactement l'énergie des rayons gamma. Puisque l'énergie est conservée, celle des rayons gamma doit avoir la même valeur que l'énergie de masse disparue avec la paire. Cette circonstance est remarquable puisque la relation d'Einstein date de 1905. A cette époque, l'existence du positon et la notion d'annihilation étaient parfaitement ignorées. Elles n'étaient même pas du domaine de la science fiction...

Comme l'électron, toute particule possède une partenaire de même masse et de charge opposée, son *antiparticule*, un sosie redoutable puisque les deux membres du couple s'annihilent lorsqu'ils entrent en contact. *Notre univers est essentiellement constitué de matière*. Le Soleil, une trottinette, un dictionnaire et une prima donna sont formés de matière. L'antimatière ne s'observe guère que dans les *rayons cosmiques* ou dans les accélérateurs de particules, et son abondance est dérisoire en comparaison de celle de la matière.

L'énergie cinétique et la masse d'une particule

On peut lire la relation d'Einstein d'une autre façon en revenant à la notion d'énergie cinétique, la forme d'énergie qui dépend de la vitesse. On a vu plus haut qu'elle joue un rôle important dans la vie quotidienne, et notamment dans celle des automobilistes. Cependant, comme c'est le rapport qu'elle entretient avec l'énergie de masse qui nous intéresse ici, nous nous restreignons à nouveau au domaine des particules.

Quand une particule est accélérée, son énergie cinétique augmente. Elle s'ajoute à l'énergie de masse, une contribution manifestement constante, si bien que leur somme – l'énergie totale de la particule – augmente également. Parce que sa masse est infime, une particule atteint aisément une vitesse proche de celle de la lumière; c'est le cas des muons créés dans la haute atmosphère. C'est dans de telles conditions que les notions d'espace et de temps basculent et que la formule d'Einstein prend toute sa signification. La raison en est simple. Quand la vitesse d'une particule approche de c , son énergie cinétique devient comparable à l'énergie de masse – elle peut même la dépasser largement. Dans de telles conditions, l'énergie totale de la particule surpasse largement son énergie de masse. La relation d'Einstein nous rappelle que, pour obtenir la masse de la particule, il suffit de diviser son énergie totale par c^2 , si bien que la masse s'accroît dans les mêmes proportions que l'énergie totale: plus une particule se déplace rapidement, plus sa masse augmente...

Le tableau 3.3 montre comment la masse et l'énergie varient en fonction de la vitesse. Il montre à quel point il est opportun d'introduire les concepts de masse de repos m_0 et d'énergie de masse E_0 , les seules grandeurs que l'on rencontre dans les tables. La masse au repos de l'électron ou du positon, par exemple, est égale à $0,91 \cdot 10^{-27}$ gramme.

Tableau 3.3 Augmentation de la masse et de l'énergie totale en fonction de la vitesse d'une particule. La vitesse v est rapportée à celle de la lumière c , la masse m à la masse de repos m_0 et l'énergie E à l'énergie de masse E_0 .

v/c	$m/m_0 = E/E_0$
0	1
0,001	1,0000005
0,01	1,00005
0,02	1,0002
0,1	1,005
0,5	1,155
0,8	1,667
0,9	2,294
0,99	7,089
0,99999	223,6

La radioactivité et l'énergie nucléaire

Le lac d'Annecy est un site touristique de Haute-Savoie. Assez allongé, il mesure 14 km en longueur et sa superficie atteint 27 km². Comme il est peu profond, son volume ne dépasse pas 1,1 km³, ce qui correspond à une masse totale de 1,1 milliard de tonnes. Si la température du lac s'élevait en moyenne de 1°C, la dilatation thermique de l'eau affecterait son volume. Il augmenterait de 230 millions de litres, une quantité d'eau qui pourrait remplir un étang circulaire de 60 m de rayon et de 20 m de profondeur moyenne. Le niveau du lac s'élèverait de quelque 8 millimètres, ce qui, en principe, est mesurable. En parallèle, l'échauffement du lac est dû à un apport d'énergie, si bien que, si l'on s'en tient à la relation d'Einstein, la masse du lac, elle aussi, doit augmenter. Après tout, l'eau est constituée de molécules dont l'agitation s'amplifie sous l'effet de l'élévation de la température. Mais cet accroissement est absolument indécélable puisqu'il ne dépasse pas 52 grammes, la masse d'eau que peut contenir un gobelet (fig. 3.5).

Dans la vie de tous les jours la dilatation thermique est observable – elle a servi à la conception des premiers thermomètres – tandis que la variation de masse associée n'est pas mesurable. Or, si l'on ne pouvait jamais vérifier expérimentalement la relation d'Einstein, elle serait sans intérêt. C'est la raison pour laquelle, à la fin de l'article où il énonce sa fameuse formule [44], Einstein se demande s'il ne serait pas possible de la tester en se servant des composés de radium. Cette suggestion a sans doute pour origine la découverte de Laborde et Curie selon laquelle l'émission radioactive s'accompagne d'un dégagement d'énergie considérable.

En 1905, l'idée est prophétique. Pour mieux apprécier la chose, l'exemple de la désintégration du radium suffit. Au cours de ce processus, le radium 226 émet une particule alpha; il se transforme ainsi en radon 222. Il se trouve que

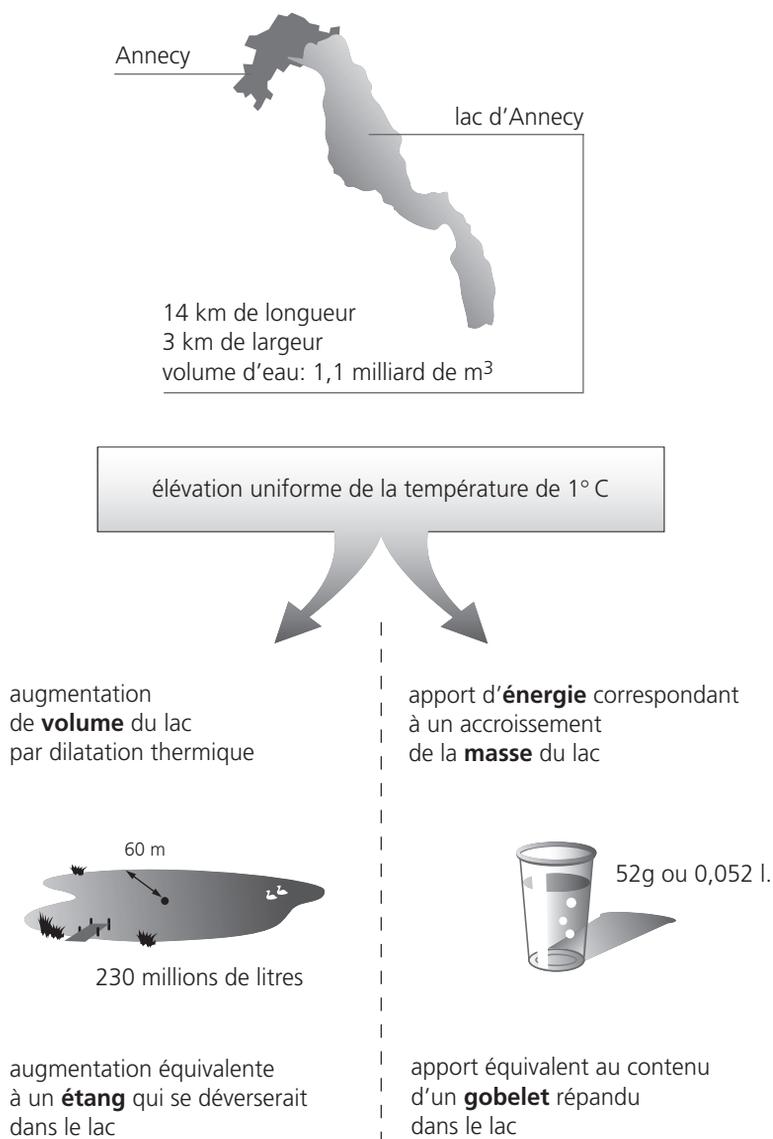


Fig. 3.5 Si la température du lac d'Annecy s'élevait en moyenne d'un degré Celsius, son volume augmenterait assez pour qu'on puisse remplir un étang avec ce surcroît de liquide. Or, pour élever la température du lac, il faut lui fournir une certaine énergie. L'apport de cette énergie entraîne pour le lac entier une augmentation de masse de 52 grammes. On comprend que cet effet ait échappé à l'observation.

le nombre atomique des chimistes donne directement le nombre d'électrons liés à l'atome lorsque celui-ci est neutre. Conformément au tableau 3.1, les nombres atomiques du radium et du radon valent respectivement 88 et 86. Dans ces conditions, lors de la désintégration, deux électrons doivent nécessairement accompagner la particule alpha émise. Ces trois particules peuvent se combiner si elles le désirent: *une particule alpha n'est rien d'autre qu'un atome d'hélium 4 qui a perdu ses deux électrons.*

La conclusion est claire: si l'on veut faire le bilan d'énergie relatif à la désintégration d'un atome de radium 226, il suffit de comparer les masses initiale (la masse atomique du radium 226) et finale (la somme des masses atomiques du radon 222 et de l'hélium 4). Elles figurent toutes au tableau 3.1. La différence, exprimée en kilos et non en unités de masse atomique, puis multipliée par c^2 , donne le bilan d'énergie. Le résultat obtenu permet de comprendre l'origine de la chaleur considérable dissipée lors de la désintégration du radium 226.

Le calcul montre que durant la désintégration d'un seul atome de radium 226, il disparaît une masse équivalente à 0,0053 unité atomique. Elle ne se perd pas mais se transforme en une énergie cinétique partagée entre la particule alpha et les électrons. Une fois libérée, cette énergie se distribue au hasard des collisions qui se produisent quand les produits de la désintégration traversent la matière environnante. Dans un corps fortement radioactif, le nombre d'atomes se désintégrant simultanément est grand, si bien que l'énergie cinétique ainsi produite est assez importante pour que le niveau de l'agitation moléculaire s'accroisse, ce qui s'accompagne d'une élévation de température. Connaissant le taux de désintégration du radium 226, les physiciens nucléaires n'ont aucune peine à démontrer que la chaleur que dissipe en une heure un gramme de cet isotope est bien due à la transformation de la masse en énergie. De manière générale, pour qu'un isotope soit radioactif, il faut que sa masse dépasse celle des produits de désintégration éventuels: le fer 56 est nécessairement stable, car il est impossible de lui associer des produits de désintégration dont la masse totale soit inférieure à la sienne.

La source à laquelle la radioactivité s'abreuve est définitivement dévolée. Mais l'histoire nous apprend que l'humanité a singulièrement sous-estimé les dangers de *l'énergie nucléaire*. Après avoir occulté les dangers de l'utilisation de la radioactivité en médecine, les physiciens ont tiré parti de l'énergie nucléaire pour construire des *réacteurs*. Mais ils ont aussi construit des *bombes atomiques*. Deux d'entre elles ont été utilisées en août 1945 contre Hiroshima et Nagasaki, deux villes du Japon, alors en guerre avec les Etats-Unis. Dans quelle mesure Einstein le pacifiste peut-il être tenu responsable de la tuerie que nous connaissons?

La responsabilité du savant

Depuis bien des décennies, on s'interroge sur la responsabilité du savant. La deuxième partie du XIX^e siècle a vécu sous le signe du progrès. Pour beaucoup, il était acquis que la science allait résoudre tous les problèmes de l'humanité en éradiquant les maladies, en mettant les bienfaits de la technique au service de chacun. Les horreurs des deux guerres mondiales, les retombées

négatives de l'industrialisation à outrance et l'attitude irresponsable de certaines entreprises ont altéré l'image de la science. Le progrès fascine toujours, mais les mouvements écologiques appellent avec un succès toujours croissant à la vigilance et au principe de précaution. La relation qu'Einstein a entretenue malgré lui avec la bombe jette une lumière intéressante sur le problème de l'éthique scientifique. Elle montre à quel point les jugements simplistes sont déplacés dans une question aussi complexe.

Einstein était un savant par passion et un homme public malgré lui: il était trop célèbre pour ne pas occuper le devant de la scène. Une séance commune de la Royal Society et de la Royal Astronomical Society de Grande Bretagne se tient le 6 novembre 1919. Cette réunion est consacrée aux résultats que ramène d'Amérique du Sud une double mission chargée de l'observation d'une éclipse totale de Soleil. On annonce que, conformément aux prédictions de la théorie de la gravitation, les rayons lumineux sont déviés lorsqu'ils passent au voisinage d'un corps massif, en l'occurrence le Soleil soumis à une éclipse totale. Mais la théorie classique de Newton et la théorie de la relativité générale d'Einstein divergent quant à l'importance de cette déviation. Les deux missions prononcent le même verdict: c'est la prédiction d'Einstein qui est correcte. Pour la première fois en deux cent cinquante ans, la théorie de Newton est prise en défaut.

En quelques semaines, Einstein devient célèbre, ce qui transforme sa vie de fond en comble [45]. Jusqu'à la fin de sa vie, il reçoit quotidiennement un courrier si abondant qu'il doit engager une secrétaire. On sollicite désormais son avis sur les sujets les plus variés, on lui demande de prendre position dans d'innombrables débats ou polémiques. Il met son point d'honneur à le faire chaque fois que son opinion peut être utile. Les choses vont si loin que, en 1952, à la mort de Chaïm Weizmann, on lui propose la présidence de l'Etat d'Israël. Il refuse en ces termes: «Toute ma vie, je me suis occupé de matières objectives; de ce fait, je manque à la fois de l'aptitude naturelle et de l'expérience qui me permettraient d'entretenir des relations harmonieuses avec autrui, et d'exercer des fonctions officielles.» [46] En 1954, il déclare au magazine *Reporter*: «Si j'étais à nouveau un jeune homme et devais décider comment gagner ma vie, je n'essaierais pas de devenir savant, chercheur ou enseignant. Je choiserais plutôt de devenir plombier ou colporteur, afin de trouver cette modeste part d'indépendance dont on peut encore bénéficier dans les circonstances présentes.» [46]

Faut-il prendre au sérieux cette déclaration qui ne l'engageait à rien? En 1954, le débat autour du «nucléaire» n'est pas encore amorcé. On peut se demander si la déclaration au *Reporter* traduit un sentiment de culpabilité qui ronge Einstein après Hiroshima et Nagasaki. La réponse à cette question exige que l'on distingue soigneusement la responsabilité du savant et celle de l'homme public.

En tant que savant, Albert Einstein n'est strictement pour rien dans la construction de la bombe. Si on l'incriminait, il faudrait tenter le même procès à Maxwell, à Newton, à Galilée, à Pythagore et à notre ancêtre anonyme qui a domestiqué le feu, en bref à tous ceux dont les travaux antérieurs ont contribué peu ou prou à la formation scientifique d'Einstein. En cherchant à rendre compatibles la mécanique et l'électromagnétisme, Einstein

n'a pas découvert une nouvelle source d'énergie. Il s'est contenté de faire un nouveau pas dans sa direction, sans même le savoir. Pour un physicien, la formule d'Einstein et le chemin qui l'a conduit à sa découverte provoquent une émotion très profonde. Ce sentiment n'est pas le même que celui que l'on éprouve à l'écoute d'un air de Mozart, mais il est également de nature esthétique. Pour arriver à la conception de la bombe, physiciens et ingénieurs ont dû franchir nombre d'étapes. Inimaginables en 1905, elles allaient dépendre d'une série de découvertes à venir. Écoutons encore le principal intéressé: «Je ne me considère pas comme le père de la libération de l'énergie atomique. [...] Je pensais seulement qu'elle était théoriquement possible. Elle n'est devenue praticable qu'à la suite de la découverte accidentelle de la réaction en chaîne, et ce n'est pas quelque chose que j'aurais pu prévoir.» [46]

En tant qu'homme public, en revanche, Einstein porte une part de responsabilité dans la construction de la bombe. Pour s'en convaincre, il suffit de prendre connaissance des pièces du dossier.

Au lycée de Munich, tout en étant bon élève, Albert manifeste déjà «une personnalité particulièrement rebelle à toute discipline imposée et à toute mécanisation du comportement» [45]. Il ne supporte pas l'esprit imprégnant le système d'éducation pratiqué au lycée: «autorité, hiérarchie, automatisme de l'apprentissage et apprentissage de l'automatisme» [45]. Il hait les parades militaires, fréquentes à l'époque de Bismarck. L'année qu'Einstein passe à l'école cantonale d'Aarau lui apparaît comme un intermède heureux. Le style pédagogique convient parfaitement à son intelligence non conformiste. Le contraste entre la vie à Munich et la vie à Aarau le frappe à tel point que, en 1955, l'année de sa mort, il écrit que «la véritable démocratie n'est pas une vaine chimère» [47].

La tournure d'esprit d'Einstein explique déjà son pacifisme, mais ce serait lui faire injure que d'attribuer ses convictions à sa seule haine de l'autorité.

L'*annus mirabilis* avait rapidement assis la réputation d'Einstein dans les milieux universitaires. Il est successivement privat docent¹¹ à l'Université de Berne, docteur *honoris causa* de l'Université de Genève, professeur associé à l'Université de Zurich, professeur à l'Université de Prague, professeur à l'École polytechnique fédérale de Zurich. En 1913, il accepte une offre alléchante de Berlin: la direction d'un futur institut de physique de la Kaiser Wilhelm Gesellschaft, un siège à l'Académie des sciences de Prusse et un poste de professeur à l'université, sans obligation d'enseigner. Il arrive à Berlin au printemps 1914.

La Première Guerre mondiale lui donne l'occasion de devenir un pacifiste militant, ce qui pose certains problèmes au sein d'une nation belligérante. A la vérité, son pacifisme est instinctif. En 1930, il écrit: «Qu'un homme puisse prendre plaisir à marcher en formation au rythme d'une fanfare militaire suffit à me le rendre méprisable.» [46] En 1933, la prise du pouvoir par Hitler et les nazis va infléchir son sentiment à l'égard de la guerre. En témoigne la démarche qu'il entreprend auprès de Roosevelt.

¹¹ Un privat docent a le droit d'enseigner, mais ne reçoit pas de rémunération officielle.

La démarche auprès de Roosevelt

Au moment où éclate la Deuxième Guerre mondiale, la physique nucléaire a progressé à pas de géant. On a découvert que l'uranium 235 est susceptible de se fragmenter. C'est la *fission nucléaire*. Une fois provoqué dans un échantillon comportant une concentration suffisante de cet isotope, le processus peut se répandre: c'est la *réaction en chaîne* qui fait qu'une fission peut en entraîner une autre, fournissant ainsi de l'énergie dans les réacteurs nucléaires où l'on s'efforce de la contrôler. Mais il y a plus. Si les conditions sont telles que, *en moyenne*, pour chaque fission, le nombre de fissions provoquées soit supérieur à un, on peut envisager que la réaction s'emballe et que l'échantillon devienne une bombe en dégageant une énergie monstrueuse. L'image qui s'impose est celle d'une population atteinte par la peste: si chaque individu infecté contamine plus d'un de ses semblables, c'est le déclenchement d'une épidémie effroyable.

Jusqu'en 1933, date de la prise du pouvoir par Hitler, la physique et la chimie allemandes jouaient un rôle de premier plan en Europe. Mais les persécutions antisémites condamnent à l'exil un nombre considérable de leurs représentants les plus éminents. La plupart d'entre eux se retrouvent aux Etats-Unis. C'est le cas d'Einstein, bien sûr, et c'est aussi celui du physicien hongrois Leo Szilard (1898-1964), le premier physicien à avoir conçu la notion de réaction en chaîne. Szilard redoute que les nazis ne se lancent dans la fabrication de la bombe atomique. Durant l'été 1939, il rencontre Einstein qu'il espère convaincre de l'aider à attirer l'attention du président Roosevelt sur ce danger potentiel. Einstein accepte aussitôt et les deux hommes rédigent ensemble un texte adressé à Roosevelt mais signé par le seul Einstein. Le message ne contient que deux pages. Il fait un rapide tableau de la situation: grâce à la réaction en chaîne, la production d'énergie nucléaire est réalisable dans un futur proche et la construction d'une bombe est également envisageable, même si le délai nécessaire risque d'être plus long. Les auteurs du message suggèrent que les Etats-Unis s'assurent que les gisements d'uranium mondiaux leur restent accessibles et que le développement expérimental des conséquences de la réaction en chaîne soit accéléré. Contrairement à ce qu'on lit en général, la lettre d'Einstein n'invite pas les Etats-Unis à construire une bombe.

La lettre, datée du 2 août 1939, un mois avant que l'Allemagne n'envahisse la Pologne, n'atteint pas le président avant octobre. Elle aura peu de conséquences: le président constitue un «Comité de l'uranium» et accorde un subside de six mille dollars à la recherche dans ce domaine... Ce n'est que le 6 décembre 1942 – un jour avant l'attaque nipponne sur Pearl Harbour – que le «Manhattan Project» est inauguré. Il conduira à Hiroshima et Nagasaki.

Sans hésiter, le pacifiste Albert Einstein avait pris une initiative susceptible de conduire à la réalisation de l'arme la plus terrible que l'homme ait jamais utilisée pour détruire son prochain. La citation qui suit jette une certaine lumière sur ses convictions. Elle date de 1953: «Je suis un pacifiste *convaincu*, mais pas un pacifiste *absolu*; je veux dire par là que je suis opposé à l'emploi de la force en toutes circonstances, sauf quand je suis confronté à un ennemi qui a pour objectif la destruction de la vie comme une *fin en soi*.» [46]. En 1939, Einstein pouvait-il agir autrement?

«Adam vécut cent trente ans; il eut un fils à sa ressemblance [...] et il lui donna le nom de Seth. Après qu'il eut engendré Seth, Adam vécut huit cents ans et il engendra des fils et des filles. [...] Seth vécut cent cinq ans, et il engendra Enos. Après qu'il eut engendré Enos, Seth vécut huit cent sept ans et il engendra des fils et des filles. Enos vécut quatre-vingt-dix ans et il engendra Kénan.» [Genèse 5, 3-9]

Qui est parvenu à fixer l'âge de la Terre?

Qui peut se targuer de tout ignorer de Guillaume Tell, du Masque de Fer, de Cyrano de Bergerac ou de Raymond Poulidor? Si le premier n'est qu'un héros légendaire, le second fut un prisonnier du château de Pignerol dont l'identité, ignorée à ce jour, a suscité les hypothèses les plus absurdes. Cyrano n'était pas gascon, mais natif de la vallée de Chevreuse. Il écrivit peu de vers galants mais une de ses comédies, intitulée *Le Pédant joué*, était assez remarquable pour que Molière y puise abondamment. Son nez, enfin, n'avait rien qui puisse provoquer la verve ironique. Quant à Poulidor, c'est un cycliste connu, non pas pour ses victoires, mais pour ses défaites. La notoriété suit des règles surprenantes.

A l'inverse, il est des noms qu'il est inutile de prononcer dans les salons car ils n'éveilleraient aucun écho, quand bien même leur célébrité devrait être grande. Ce sont notamment ceux de Fritz Houtermans et de Clair Patterson dont les travaux ont permis de déterminer la date de naissance de notre planète. La remarque est particulièrement valable pour Houtermans. Sa vie mouvementée évoque celle de Silvio Pellico, l'auteur de *Mes prisons*. Durant les années 1930 et 1940, Houtermans a eu le triste privilège d'être poursuivi successivement par le NKVD, l'ancêtre du KGB, puis par la Gestapo. Il eut ainsi l'occasion de comparer l'efficacité respective des polices et des geôles de Staline et de Hitler.

L'âge des roches

C'est Rutherford, encore lui, qui envisage d'utiliser la radioactivité des roches comme une horloge permettant de les dater. Il part de la fameuse publication rédigée en 1903 avec Soddy [36]: une substance radioactive qui se désintègre disparaît à un taux constant. Quelles que soient les conditions physiques vécues par les atomes de la substance étudiée – qu'elle soit portée aux plus hautes températures ou aux pressions les plus élevées, qu'elle soit pure, qu'elle fasse partie d'un mélange ou d'un composé chimique –, rien, absolument rien ne peut modifier son taux de désintégration. *Une fois qu'une demi-vie s'est écoulée, la moitié des atomes d'une substance radioactive se*

sont *désintégrés*. L'affirmation est de nature statistique, mais dans tout échantillon radioactif, *le nombre d'atomes est tellement grand que les prévisions statistiques se muent en certitude*.

Rutherford a beau avoir une excellente idée, elle n'est pas facile à réaliser. En 1903, les connaissances sont trop lacunaires pour qu'on puisse consulter l'horloge précise qu'il imagine déjà. Il n'empêche que Rutherford peut être considéré comme le fondateur de la *géochronologie*, cette discipline qui permet la datation des couches grâce à la mesure de la radioactivité des roches qui la composent. Auparavant, grâce à l'étude des fossiles, on était capable de classer les couches par ordre chronologique. Mais on ne savait pas leur attribuer un âge.

Les premières tentatives de datation ne sont que des ébauches. La première est prometteuse. Sous l'impulsion de Rutherford, le chimiste américain Bertram Boltwood (1870-1927) se lance dans l'analyse chimique de certaines roches. En étudiant les *minéraux uranifères*, il fait une remarque importante: ils contiennent tous du plomb non radioactif. Qui plus est, dans une roche contenant de l'uranium, la proportion du plomb, métal lourd, est d'autant plus grande que la roche est ancienne.

La tâche de Boltwood serait plus simple si l'uranium se décomposait directement en plomb. Mais il commence à comprendre que le plomb doit être le terme final d'une chaîne de désintégrations partant de l'uranium. Les substances radioactives intermédiaires entre l'uranium et le plomb sont probablement celles qui, dans un minerai uranifère, accompagnent ces deux métaux. Les demi-vies sont toutes différentes et l'identification de tous les acteurs radioactifs du passage de l'uranium au plomb est encore à faire. Il est donc remarquable que les résultats des efforts de Boltwood puissent présenter une évidente cohérence. Il mesure des âges de roches qui vont de 410 à 2200 millions d'années et les datations auxquelles il procède respectent l'ordre chronologique que les paléontologues avaient établi. L'âge que Kelvin attribuait à notre planète est largement dépassé.

Le travail de Boltwood est repris par l'Anglais Arthur Holmes (1890-1965), une grande figure de la géologie: c'est lui qui proposera en 1928 un mécanisme plausible expliquant la *dérive des continents*, ardemment défendue par le météorologue et climatologue allemand Alfred Wegener (1880-1930). L'ironie veut que la première confrontation de Holmes avec le problème de l'âge de la Terre ait été très précoce. Dans son enfance, il était intrigué par la lecture de la note d'Ussher figurant en marge de sa Bible et fixant la Création en 4004 av. J.-C. Pourquoi 4004 et non 4000, un nombre rond? En se posant une pareille question, Holmes révèle déjà un certain goût pour les sciences exactes. «Adolescent, la lecture de Kelvin lui avait ouvert des horizons dix mille fois plus vastes.» [6] Holmes a commencé des études de physique avant de bifurquer vers la géologie qui, décidément, ne se débarrassera jamais complètement des physiciens.

Holmes décide de dater des roches en comparant comme Boltwood leurs teneurs respectives en uranium et en plomb. Ses premiers résultats datent de 1911 et sont remarquables car, pour plusieurs périodes géologiques, il obtient des âges proches des valeurs admises actuellement. Malgré ces résultats, Holmes peine à convaincre ses contemporains. Les géologues avaient été

échaudés par l'arrogance de Kelvin, qui s'était permis de leur donner une leçon peu appréciée. Et voilà que Holmes revient avec une méthode inspirée de la physique. Il attribue aux roches des âges qu'il n'a aucun moyen de confirmer par une approche différente.

Or, en 1911, on se trouve devant une série d'énigmes. Certains éléments sont parfois radioactifs, parfois stables. Pour des raisons encore mystérieuses, si l'uranium se prête à la datation, les autres éléments radioactifs connus sont moins complaisants. Visiblement, en ce qui concerne la radioactivité, les connaissances sont encore trop lacunaires. Il manque encore quelques pièces essentielles au puzzle de la radioactivité.

La découverte du noyau

Nous avons abandonné Rutherford en 1905, au moment où il expliquait devant Kelvin que la chaleur terrestre tire son origine de la présence d'isotopes radioactifs à l'intérieur de la Terre. En 1908, le lauréat du prix Nobel de chimie se nomme Ernest Rutherford...

Il n'est pas étonnant que Rutherford ait passé pour un chimiste aux yeux de la Fondation Nobel, tant les débuts de la physique nucléaire se confondent avec ceux de la chimie nucléaire. Il est plus remarquable qu'il soit parvenu à demeurer un chercheur actif et couronné de succès puisque, au moment où il reçoit le prix Nobel, son plus grand titre de gloire est encore à venir.

L'histoire de la plus importante découverte de Rutherford commence par une expérience montée en 1909 à l'Université de Manchester, où il est nommé en 1907. Il en confie la réalisation à deux de ses collaborateurs, l'Allemand Hans Wilhelm Geiger (1882-1945), le futur inventeur du compteur de particules qui porte son nom, et l'Anglais Ernest Marsden (1889-1970). L'idée de Rutherford consiste à se servir de la radioactivité alpha pour en savoir plus sur la structure de l'atome. On a la preuve de son existence mais on ignore tout de sa structure.

Au moment où commence le montage de l'expérience conçue par Rutherford, on sait que le courant électrique est constitué d'électrons mobiles à l'intérieur des métaux. On ignore tout, en revanche, de la charge positive qui, à l'intérieur du même métal, doit être présente pour neutraliser celle des électrons. En général, on pense qu'elle constitue une sorte de nuage diffus dans lequel flottent les électrons. Un pain aux raisins, en somme, dont les raisins seraient remplacés par des électrons mobiles.

Sur l'instigation de Rutherford, Geiger entreprend de sonder l'intérieur de la matière et, qui sait, de l'atome. Il se sert d'un rayonnement alpha issu d'un échantillon radioactif et le dirige sur une cible constituée d'une mince feuille de métal, le plus souvent de l'or. Le rayonnement alpha est porteur d'une charge électrique, ce qui entrave sa progression dans la matière: le déplacement des particules chargées est ralenti par les charges électriques qu'elles rencontrent sur leur chemin et sa direction est modifiée. Pour contourner l'obstacle, les deux physiciens décident de projeter les particules alpha sur une feuille assez mince pour que toutes les particules incidentes puissent la traverser. Leur idée est simple.

Grâce à l'étude de l'*angle de diffusion*, Rutherford et Geiger espèrent déterminer la distribution des charges dans la matière. Les physiciens utilisent le terme de «diffusion» pour caractériser la déviation de la trajectoire d'une particule. De cette manière, Rutherford et Geiger pensent en apprendre un peu plus sur la structure de l'atome. Il paraît assez clair que la diffusion des particules alpha va dépendre de l'arrangement des électrons et de la charge positive à l'intérieur de l'atome. Pour mettre le phénomène en évidence, Geiger observe le scintillement que produisent les particules alpha quand elles viennent heurter des plaques de sulfure de zinc disposées au-delà de la cible (fig. 4.1a). En un mot, Rutherford et Geiger «observent la feuille d'or par transparence» en remplaçant la lumière par un rayonnement alpha.

Lors de cette série d'expériences, Geiger ne place pas de plaques en deçà de la feuille d'or, et le résultat de ses observations n'incite pas à le faire: les particules alpha ne s'écartent que faiblement d'une trajectoire rectiligne. Une telle constatation n'a pas de quoi enthousiasmer ses auteurs. L'électron étant presque huit mille fois plus léger que les particules alpha, sa présence ne constitue qu'un faible obstacle sur leur passage. Quant à la charge positive, si, comme on le pense, elle baigne uniformément l'atome, elle ne peut modifier la direction du mouvement. Bref, l'expérience paraît vouée à l'échec. Rutherford et Geiger ne voient pas comment tirer une information valable de ces quelques déviations mineures.

Dieu sait pourquoi, Rutherford décide un jour de vérifier que les particules ne sont jamais renvoyées en arrière. En somme, il se comporte comme Becquerel qui, Dieu seul sait toujours pourquoi, développe en 1896 une plaque photographique non exposée à la lumière et découvre ainsi la radioactivité.

Voici comment Rutherford décrit lui-même l'événement:

«Un jour Geiger vint me dire: «Ne pensez-vous pas que le jeune Marsden, à qui j'enseigne les méthodes radioactives, devrait commencer un petit travail de recherche?» J'en étais moi-même convaincu et je répondis: «Pourquoi ne vérifierait-il pas si des particules alpha sont diffusées à de grands angles?» Je dois avouer que je n'imaginai pas qu'il puisse exister de telles diffusions, car nous savions que la particule alpha est une particule massive très rapide [...]; or nous avions calculé que [...] la probabilité qu'une particule alpha soit diffusée vers l'arrière était très faible.» [23]

Sous la direction de Geiger, Marsden réalise l'expérience proposée en disposant des feuilles de sulfure de zinc comme la figure 4.1b le suggère. Et la surprise se produit: certaines particules alpha rebondissent sur la feuille d'or comme des balles de ping-pong contre un mur. Rutherford poursuit: «C'était la plus incroyable surprise de ma vie. C'était comme si un obus de 380 millimètres tiré sur un morceau de soie était revenu en arrière et avait touché l'artilleur.» [23]

Bien que Rutherford ait suggéré l'expérience et qu'il en ait proposé la modification cruciale, la publication faisant état de ses résultats date de 1909 et ne porte que les signatures de Geiger et Marsden [48]. Rutherford était un gentleman. Au risque d'utiliser un euphémisme, on peut affirmer qu'un pareil désintéressement n'est pas courant parmi les scientifiques.

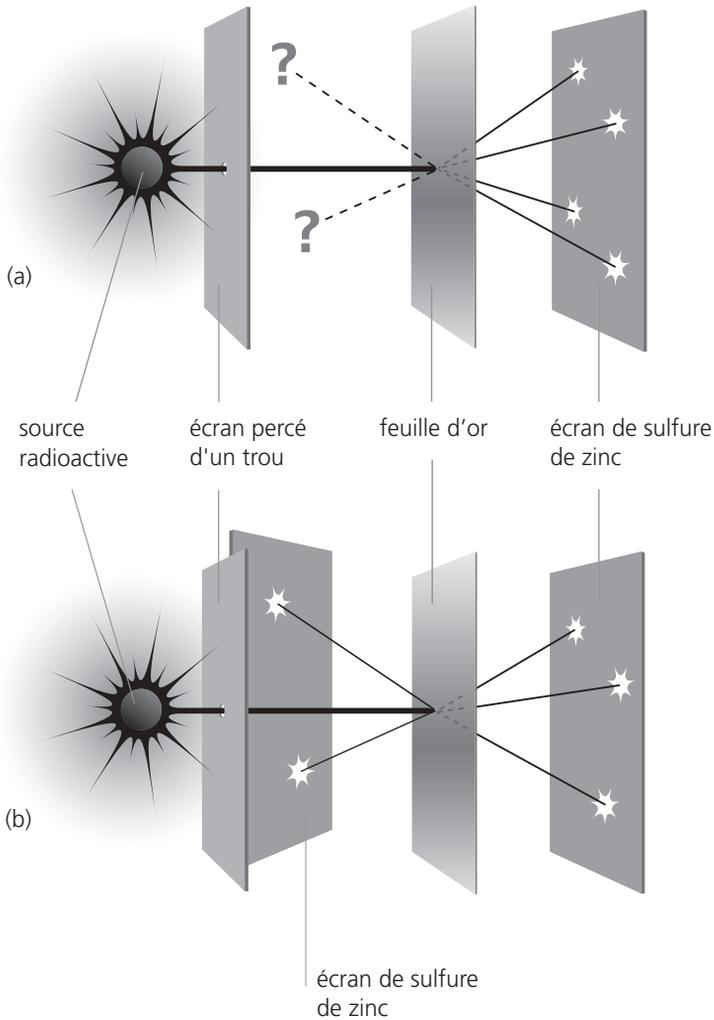


Fig. 4.1 Principe de l'expérience de Geiger. Un échantillon radioactif émet des particules alpha. Un faisceau est délimité grâce à un écran de plomb percé d'une fente ou d'un trou. Il parvient sur une mince feuille de métal. Cette cible lui imprime des déviations observées à l'aide d'une plaque de sulfure de zinc qui scintille quand elle est frappée par une particule (a). Lorsque Marsden se joint à l'expérience, Rutherford décide de disposer des écrans scintillants en deçà de la cible afin d'observer d'éventuels retours en arrière des particules alpha (b).

Après de longues réflexions, Rutherford parvient à donner une interprétation cohérente de la découverte de Geiger et Marsden. Il arrive à une conclusion stupéfiante pour l'époque, mais à laquelle nous nous sommes accoutumés, et dont on a déjà parlé plus haut: *la masse de l'atome est presque entièrement concentrée dans un noyau minuscule, siège de la charge positive.* De

notre point de vue anthropocentrique, l'atome est essentiellement «vide», ce qui explique le comportement des particules alpha. Il y a répulsion entre la particule incidente et le noyau. Tous deux portent des charges positives, mais la force décroît rapidement lorsque leur distance relative augmente. Seules les particules qui passent tout près du noyau peuvent être renvoyées en arrière, alors que les autres poursuivent leur chemin «sans voir» ni le noyau ni les poids plumes que sont les électrons; leur trajectoire est presque rectiligne (fig. 4.2).

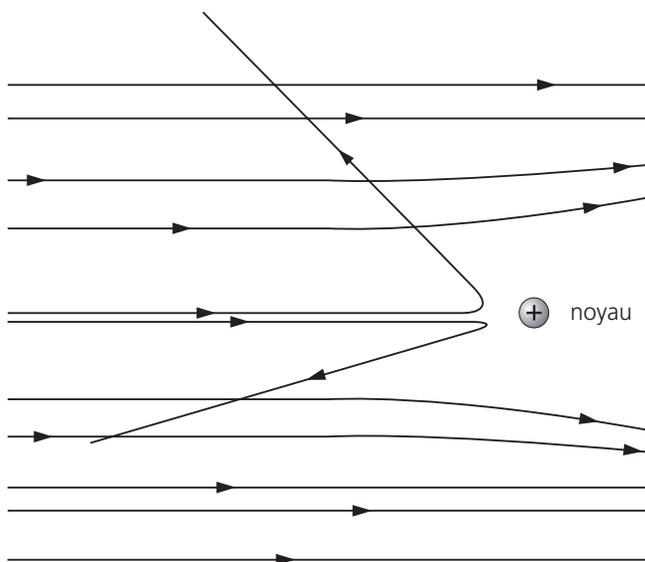


Fig. 4.2 Seules les particules alpha qui passent près du noyau voient leur trajectoire fortement modifiée. Les autres suivent un chemin presque rectiligne. Comme la taille du noyau est cent mille fois inférieure à celle de l'atome, ce n'est qu'une minorité de particules incidentes qui est renvoyée en arrière.

Ce n'est qu'en 1911 que Rutherford publie le résultat de ses réflexions [49]. L'histoire ne s'y est pas trompée. C'est à lui qu'elle a attribué la découverte du noyau et c'est la date de 1911 qui a été retenue.

L'expérience de Geiger et Marsden permet notamment de comprendre la nature des particules alpha. Avant 1911, Rutherford sait déjà que ce sont des ions portant une charge positive et ayant même masse que l'atome d'hélium. Après la découverte du noyau, il peut affirmer que particules alpha et noyaux d'hélium ne font qu'un. C'est leur taille minuscule qui leur a permis de traverser la feuille d'or de Geiger et Marsden.

L'histoire de la découverte du noyau comporte un épilogue manquant singulièrement de panache. Durant la Première Guerre mondiale, Geiger et Marsden seront affectés au front occidental, mais dans des camps opposés. Si l'activité scientifique rapproche les peuples, elle est impuissante face à la folie aveugle qui provoque les guerres.

L'atome et son noyau

La taille de l'atome est de l'ordre de 10^{-10} m. Si l'on se contente d'une description superficielle, on peut le comparer à un système solaire en miniature où la force électrique aurait remplacé la force gravifique. Dans l'atome, ce sont les *électrons* qui jouent le rôle des planètes et le *noyau* celui du Soleil. La masse des électrons n'atteint pas le millième de celle de l'atome auquel ils appartiennent. Le reste de la masse est concentré dans le noyau, dont le diamètre est de l'ordre du dix millième de celui de l'atome (10^{-10} m), ce qui fait que le volume du noyau est un million de milliards de fois inférieur à celui de l'atome (fig. 4.3). Et pourtant ce noyau renferme plus de 99,95% de la masse atomique. C'est un peu comme si un énorme chêne ne produisait qu'un seul gland, à l'intérieur duquel serait ramassée toute la masse de l'arbre. La fable de La Fontaine *Le Gland et la Citrouille* perdrait toute signification.

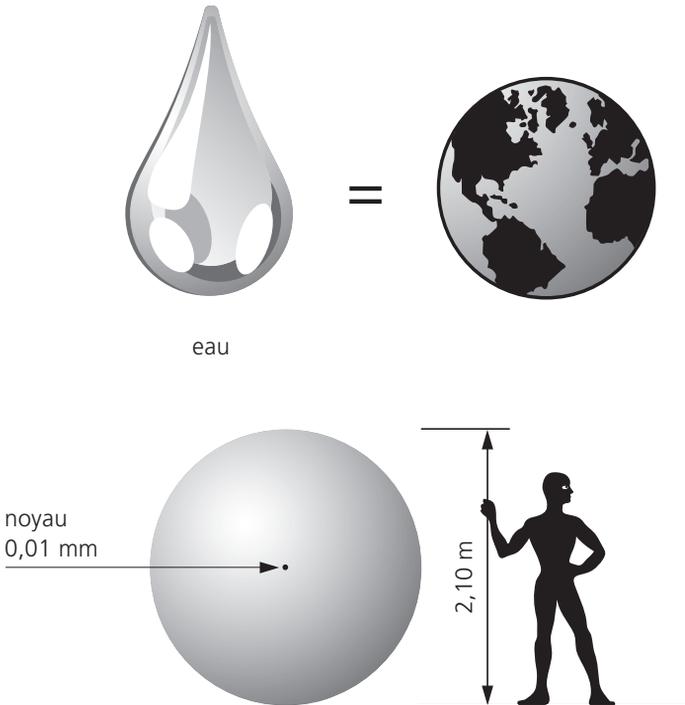


Fig. 4.3 Si la taille d'une goutte d'eau atteignait celle de la Terre, un atome d'oxygène mesurerait 2,10 m. Quant au point censé représenter le noyau de l'atome, il resterait invisible à l'œil nu car son diamètre ne dépasserait pas un centième de millimètre, soit trois fois moins que l'épaisseur d'un cheveu.

Chacun des électrons est porteur d'une même charge électrique négative e^- . La charge opposée e^+ est appelée *charge élémentaire*, bien nommée puisque n'importe quelle charge isolée est toujours un *multiple entier*, positif ou négatif, de e . Les hasards de l'histoire ont concouru à une absurdité: bien qu'il soit omniprésent dans notre vie, placée sous le signe de l'électricité et de l'électronique, l'électron est porteur d'une charge négative, alors que le noyau, beaucoup plus discret, est porteur de la charge positive. L'atome est globalement neutre, si bien que le noyau comporte autant de charges élémentaires que d'électrons en orbite.

Si l'on voulait comparer atome et système solaire, on commencerait par remarquer que le Soleil contient 99,85% de la masse de tous les corps qui gravitent autour de lui. Il y a donc similitude apparente avec l'atome. Les analogies entre système solaire et atome, cependant, comptent peu face à leurs différences.

En ce qui concerne les tailles respectives des deux systèmes, il serait plus difficile de les mettre en parallèle. Celle du système solaire est mal définie puisque, au-delà de Neptune, la dernière des grandes planètes, on rencontre une armée presque inépuisable de corps de faible dimension, tous en orbite autour du Soleil. Les choses se gâtent lorsque l'on compare les électrons et les planètes.

Les électrons sont identiques et leur nombre est fixé par la charge du noyau. A l'opposé, les planètes varient considérablement en masse et en taille; elles peuvent posséder elles-mêmes des satellites. Le nombre de planètes est immense si l'on range parmi elles les *astéroïdes*, petits blocs de rocher, les *comètes*, morceaux de glace sale, ou même les poussières gravitant autour du Soleil. Mais la vraie dissimilitude entre atome et système solaire, il faut la chercher dans la *physique quantique* qui gouverne le monde microscopique et *interdit de parler de la trajectoire des électrons*, qu'ils fassent partie de l'atome ou non. Si l'on veut faire le schéma d'un atome, on en est réduit à ombrer certaines régions voisines du noyau où les électrons ont une chance plus marquée de se trouver (fig. 4.4).

Les constituants du noyau

Vers la fin des années 1920, on s'était rendu compte que, lorsqu'il est bombardé de particules alpha rapides, le béryllium émet un rayonnement très pénétrant qui, de ce fait, ne transporte pas de charge électrique: la matière est formée d'innombrables charges qui dévient toute particule incidente portant elle-même une charge. Mais la nature du rayonnement restait mystérieuse. On pensait à des ondes électromagnétiques. Or Irène Joliot-Curie (1897-1856), la fille de Pierre et Marie Curie, avait repris le flambeau des mains de Marie. Elle se vouait à la recherche nucléaire avec son mari Frédéric Joliot (1900-1958), ce qui leur valut le prix Nobel de physique 1935. Le couple Joliot-Curie avait remarqué que, lorsqu'on le dirigeait vers la paraffine, le rayonnement du béryllium avait pour effet d'éjecter des *protons* très rapides. Le proton n'est autre que le noyau de l'isotope le plus léger de l'hydrogène, ${}_1\text{H}^1$. Cette observation rendait caduque l'interprétation du rayonnement

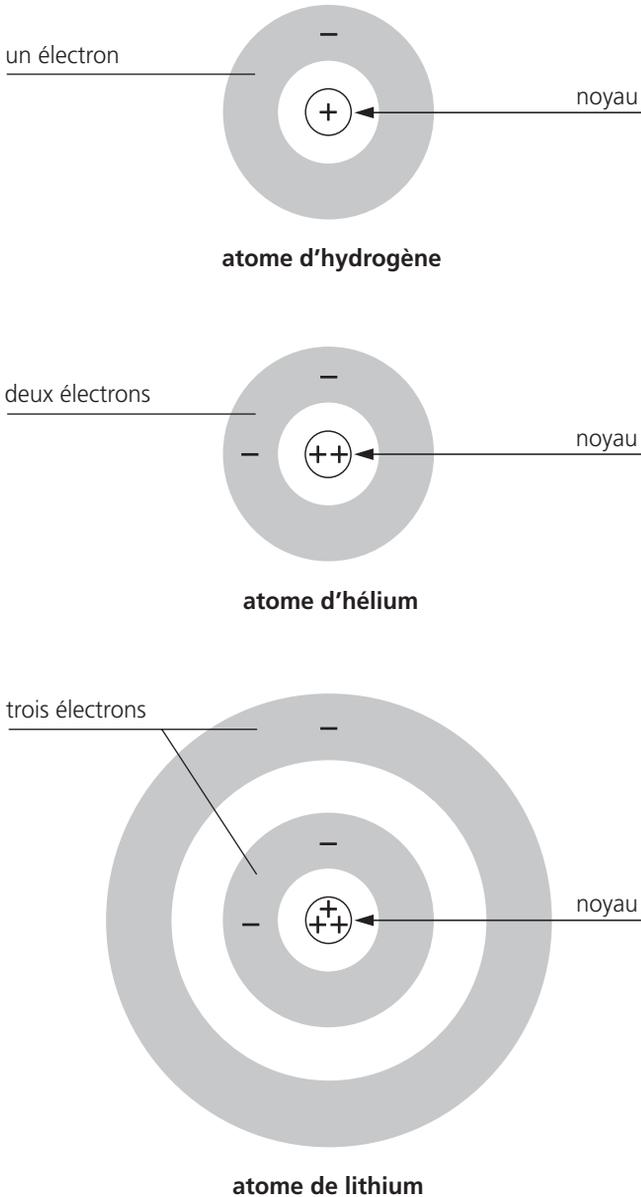


Fig. 4.4 Schématisation des atomes d'hydrogène, d'hélium et de lithium. Ils portent des charges nucléaires respectivement égales à 1, 2 et 3 charges élémentaires. Les électrons ne décrivent pas de trajectoires au sens classique. On ne peut que déterminer les zones (ombrées dans la figure) où ils ont le plus de chance de se trouver, des zones dont la géométrie est régie par des règles complexes. Les électrons obéissent à un *principe d'exclusion* qui, dans le cas du lithium, ne permet pas à trois électrons de coexister dans la même zone. Dans cette représentation, la taille des noyaux a été grossièrement exagérée.

comme onde électromagnétique. A la recherche d'une explication, les Joliot-Curie reproduisirent l'erreur que les Curie avaient commise trente ans plus tôt: ils mirent en doute la loi de la conservation de l'énergie [23].

C'est finalement le britannique James Chadwick (1891-1974) qui résout l'énigme du rayonnement inconnu en étudiant son action sur différents noyaux. En appliquant les lois usuelles de la physique, il découvre que le béryllium émet, non pas des ondes électromagnétiques, mais des particules neutres dont la masse est très proche de celle du proton. Il découvre ainsi le *neutron* dont la masse, exprimée en unités de masse atomique, vaut 1,009214 et dépasse ainsi de 0,14 % celle du proton. Comme son nom l'indique, le neutron ne porte pas de charge électrique. *Le neutron isolé est instable* car, en dix minutes environ, sa demi-vie, *il se désintègre en un proton* tout en émettant un électron ainsi qu'un membre de la famille des neutrinos¹. On donne le nom générique de *nucléons* aux constituants du noyau, qu'il s'agisse d'un proton ou d'un neutron.

La découverte du neutron permet de franchir un pas important dans la compréhension du noyau. Le tableau 3.1 montre que la masse atomique d'un isotope est toujours proche d'un entier. Cette remarque donne la clé du tableau 4.1 qui met en évidence trois faits essentiels:

– *Un élément chimique est caractérisé par un nombre atomique Z qui s'identifie au nombre de protons qu'il contient.*

– *Les isotopes d'un même élément se distinguent par le nombre de neutrons N qu'ils renferment.*

– *Le nombre A obtenu en arrondissant la masse atomique à l'entier le plus proche est égal à la somme $Z + N$. Il s'identifie au nombre de nucléons que comporte le noyau.*

La figure 4.5 présente quelques schémas de noyaux où l'on a explicité la division en protons et en neutrons. Pour chaque noyau, la masse atomique est donnée. Pour peu qu'on se donne la peine de le vérifier, on constate que la masse de chacun des noyaux est inférieure à la somme des masses des nucléons isolés qui le composent: la masse de ${}_6\text{C}^{12}$ vaut exactement 12, alors que la masse totale de 6 protons et de 6 neutrons se monte à 12,09565: la masse atomique d'un proton isolé vaut 1,007276, celle du neutron 1,008665. De manière générale, *pour qu'un noyau soit instable, il est nécessaire qu'il existe un noyau plus léger en lequel il puisse se transformer*, bien que cette condition ne soit pas suffisante. Par ailleurs, *le neutron peut faire partie d'un noyau stable*. Dans ce cas, évidemment, il ne se désintègre pas: le neutron nucléaire ne s'identifie pas au neutron libre.

¹ Pour des raisons qui importent peu, c'est un *antineutrino* et non un neutrino qui est produit lors de la désintégration du neutron. Dans la suite, on parlera toujours de neutrino pour désigner un membre de cette famille.

Tableau 4.1 Le nombre atomique Z , inscrit au bas et à gauche du symbole de l'élément, fixe le nombre de protons qu'il contient. Le nombre A qui figure à droite et en haut du symbole chimique permet de distinguer entre eux les isotopes d'un même élément. Le nombre de neutrons N est donné par la différence entre A et Z .

Isotope	Nom de l'isotope	Nombre de protons Z	Nombre de nucléons A	Nombre de neutrons N ($N = A - Z$)
(n)	(Neutron)	0	1	1
${}_1\text{H}^1$	Hydrogène	1	1	0
${}_1\text{H}^2$	(Deutérium)	1	2	1
${}_1\text{H}^3 *$	(Tritium)	1	3	2
${}_2\text{He}^3$	Hélium 3	2	3	1
${}_2\text{He}^4$	Hélium 4	2	4	2
${}_4\text{Be}^8 *$	Béryllium 8	4	8	4
${}_6\text{C}^{12}$	Carbone 12	6	12	6
${}_6\text{C}^{13}$	Carbone 13	6	13	7
${}_6\text{C}^{14} *$	Carbone 14	6	14	8
${}_8\text{O}^{16}$	Oxygène 16	8	16	8
${}_{26}\text{Fe}^{56}$	Fer 56	26	56	30
${}_{86}\text{Rn}^{222} *$	Radon 222	86	222	136
${}_{88}\text{Ra}^{226} *$	Radium 226	88	226	138
${}_{90}\text{Th}^{234} *$	Thorium 234	90	234	144
${}_{92}\text{U}^{238} *$	Uranium 238	92	238	146

Les séries radioactives

Un minerai radioactif comporte en général une panoplie de substances actives distinctes, souvent difficiles à séparer. Leurs demi-vies semblent distribuées aléatoirement. Une telle observation est évidente dès lors que l'on prend conscience du fait que chaque isotope est caractérisé par une demi-vie et par une voie de désintégration qui lui sont propres. En 1911, Soddy fait une remarque importante: un atome radioactif qui émet une particule alpha se transforme en un atome dont le nombre atomique est inférieur de deux unités. Deux ans plus tard, une observation analogue concerne les émetteurs bêta: au cours de la transformation, le nombre atomique augmente d'une unité. Ces remarques ne deviendront banales que lorsque les structures atomiques et nucléaires auront été comprises: il suffit de se rapporter à la figure 4.6 pour s'en convaincre. Les trois voies de désintégration les plus

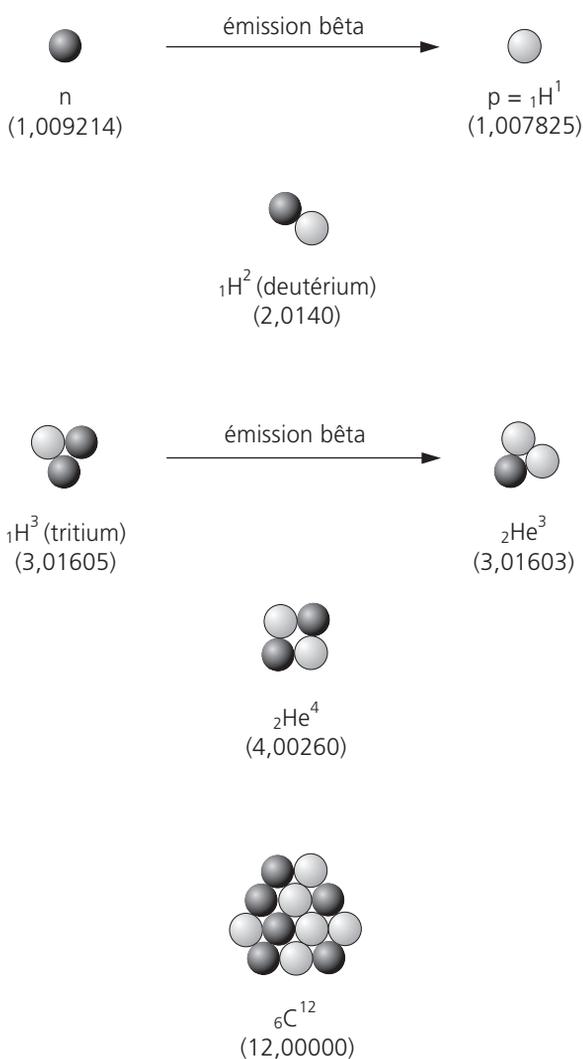


Fig. 4.5 Le neutron isolé est instable. Il se désintègre en un proton ainsi qu'en un électron et en un membre de la famille des neutrinos (ils ne sont pas représentés sur la figure). La conservation de l'énergie l'autorise, car la masse du neutron dépasse celle du proton. Les noyaux de quelques éléments chimiques légers sont également schématisés comme des ensembles de Z protons p et de $N = A - Z$ neutrons n . La masse atomique est indiquée entre parenthèses. Dans chacun des cas, la masse du noyau est inférieure à la masse totale de ses constituants, ce qui assure sa stabilité. Le neutron nucléaire ne devient instable que s'il existe un noyau tel que la mutation $n \rightarrow p$ entraîne une diminution de masse. C'est le cas du couple (${}_1\text{H}^3$; ${}_2\text{He}^3$).

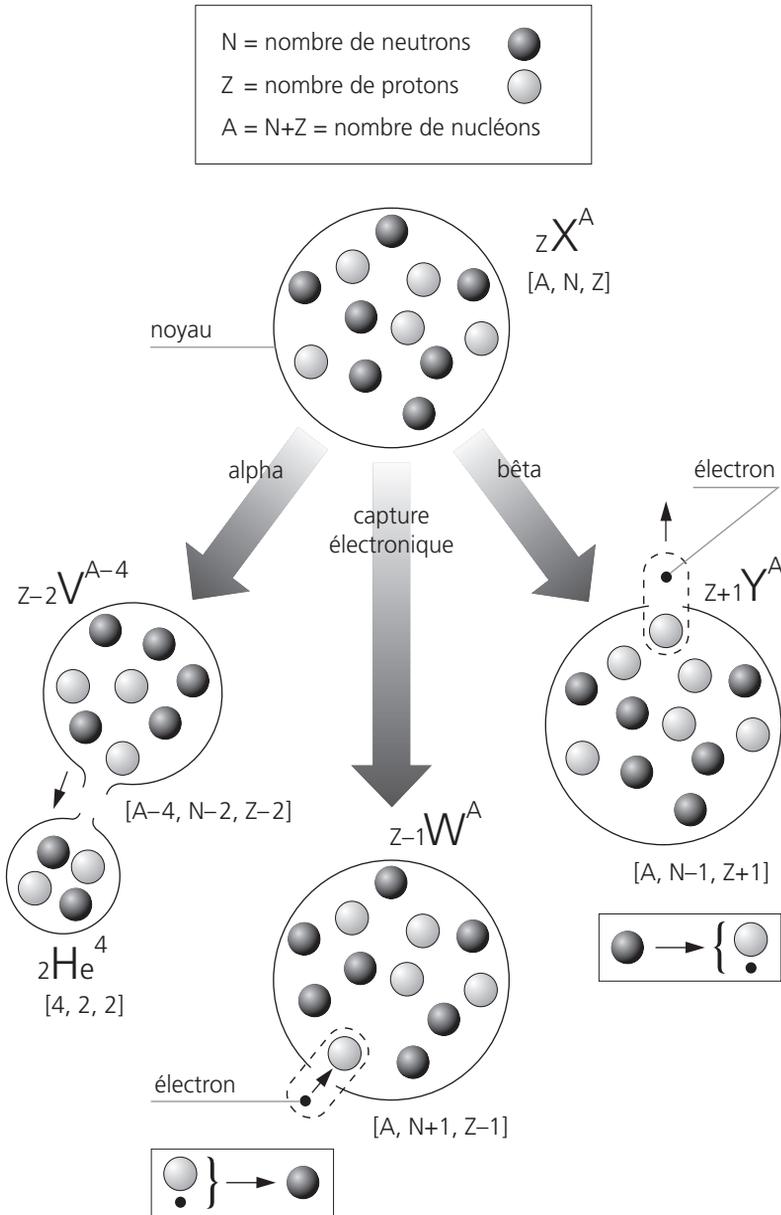


Fig. 4.6 Le noyau de l'isotope fictif ${}_Z X^A$ comporte Z protons et N neutrons et, par conséquent, $A = Z + N$ nucléons. S'il subit une désintégration alpha, il perd deux protons et deux neutrons. Le symbole de l'isotope résultant s'écrit ${}_{Z-2} V^{A-4}$. Au cas où intervient une désintégration bêta, un neutron du noyau se transforme en un proton et un électron. Seule cette dernière particule quitte le noyau et l'isotope ainsi créé est désigné par le symbole ${}_{Z+1} Y^A$. Finalement, si l'on assiste à une capture électronique, un électron orbital est absorbé par un des protons nucléaires qui se transforme du même coup en un neutron tout en restant à l'intérieur du noyau de l'isotope ${}_{Z-1} W^A$ nouvellement créé.

fréquentes y sont schématisées. La figure 4.7 reprend le même thème que la figure 4.6, à cela près que chaque isotope n'est représenté que par son symbole et par la donnée des valeurs correspondantes des nombres Z et A qui le caractérisent. Cette nouvelle représentation permet une lecture plus aisée des relations créées entre isotopes par le phénomène radioactif.

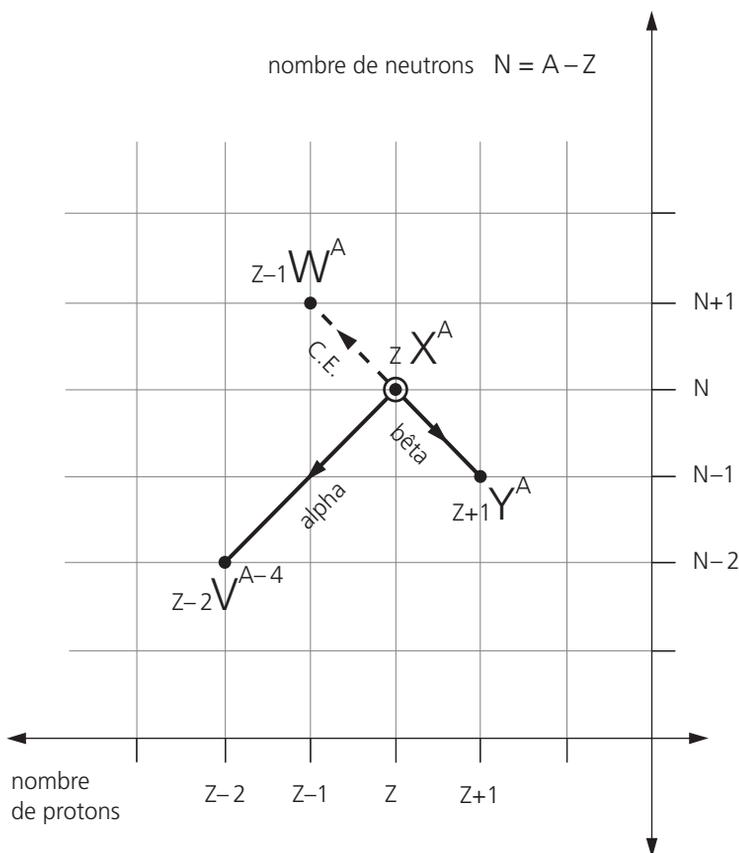


Fig. 4.7 Schéma alternatif des voies de désintégration possibles de l'isotope A_ZX représentées à la figure 4.6. Pour chaque isotope, le nombre atomique Z et le nombre de neutrons $N = A - Z$ sont respectivement portés sur les axes horizontal et vertical.

Une fois clarifiés les concepts d'isotope et de mode de désintégration, il est possible de trouver des réponses à une question essentielle: quelles sont les relations de filiation entre éléments radioactifs? Autrement dit, quand on est en présence d'un isotope radioactif, quels sont les isotopes dont il peut provenir par désintégration et quels sont les éléments dans lesquels il va se désintégrer? Savoir y répondre, c'est être capable d'établir des tableaux généalogiques entre éléments chimiques. Ils vont nécessairement différer de

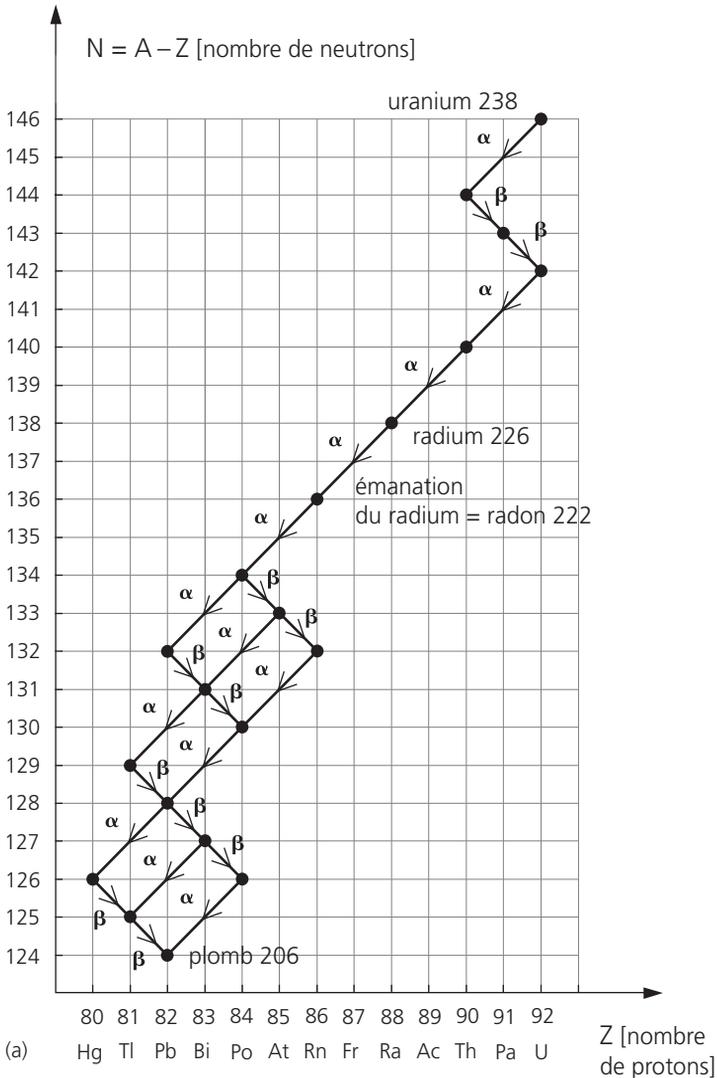
ceux que dressent les généalogistes: chez les êtres humains, la reproduction est sexuée. Chez les éléments radioactifs, elle est asexuée mais «bivalente» comme le montrent les séries radioactives mises en évidence à partir de l'année 1903, date de parution des fameux articles de Rutherford et Soddy [36].

Une *série radioactive* constitue un ensemble d'isotopes liés entre eux par une relation de filiation radioactive. La figure 4.8 représente les deux séries ayant comme points de départ l'uranium 238 et l'uranium 235, l'isotope qui se prête à la réaction en chaîne. Ces séries ont deux points en commun. Tout d'abord, chacune d'elle a comme «ancêtre» un isotope radioactif dont la demi-vie est supérieure au milliard d'années, si bien que cet isotope se trouve encore dans les roches terrestres actuelles: ces demi-vies valent respectivement 4,51 et 0,710 milliards d'années pour l'uranium 238 et l'uranium 235. Par ailleurs, elles aboutissent toutes deux à un isotope stable du plomb. Ces deux séries sont indépendantes: aucun isotope ne figure à la fois dans l'une et dans l'autre.

Si l'on veut comprendre pourquoi l'ancêtre d'une série doit avoir une demi-vie comparable avec l'âge de la Terre, il suffit de prendre le cas du radium 226. Il figure dans la série de l'uranium 238. C'est l'isotope qui a tant fasciné Marie Curie lorsqu'elle l'a découvert. Sa demi-vie est de 1600 ans, un intervalle de temps incomparablement plus court que celui de l'uranium. Imaginons une roche qui, lors de sa formation, n'aurait contenu d'autre substance radioactive qu'un gramme de radium 226, soit $2,65 \cdot 10^{21}$ ou 2650 milliards de milliards d'atomes de cette substance. 1600 ans plus tard, ce nombre a été divisé par deux, et ainsi de suite chaque fois qu'il s'écoule 1600 années. Nous nous posons la question suivante: au bout de combien de temps ne restera-t-il plus de radium du tout dans le minerai? La réponse ne nécessite pas de long calculs. Si la roche est vieille de 160 000 ans – à peu près l'âge de notre espèce, la probabilité de retrouver ne serait-ce qu'un atome de radium dans le minerai initial est inférieure à un milliardième. La confirmation est évidente: l'ancêtre d'une série radioactive doit avoir une très longue demi-vie. Le radium qu'a découvert Marie Curie dans la pechblende ne peut être qu'un produit de la désintégration de l'uranium 238.

Si l'on se reporte à la figure 4.8a, on détermine aisément les prédécesseurs et les successeurs du radium 226 à l'intérieur de la série issue de l'uranium 238. Tous les isotopes intermédiaires, radium compris, ont une durée de vie négligeable si on la compare à celle de l'uranium. C'est donc l'uranium 238 et lui seul qui est à l'origine de la présence de chacun des isotopes de la série. Sa demi-vie est si longue que, *pourvu que l'âge de la Terre ne dépasse pas plusieurs dizaines de milliards d'années*, il a pu alimenter sans trêve la série, à peine diminué chaque fois que s'écoule un milliard d'années. Et c'est le plomb 206 qui est le résultat de cette désintégration, à l'échelle géologique tout au moins. *Les isotopes intermédiaires entre l'uranium 238 et le plomb 206 ne sont que des étapes fugaces sur ce long cheminement.* Comme la série qui conduit de l'uranium 235 au plomb 207 est analogue, c'est la nature de l'isotope stable et distinct du plomb qui sert d'étiquette à la série. Au passage, on note que, le minerai radioactif s'épuisant lentement, la production de chaleur n'a pu que décroître à l'intérieur de la Terre, mais dans une proportion bien moindre que ne le prévoyait Kelvin (fig. 4.9).

Les séries radioactives ont un autre point en commun. A l'intérieur d'une roche contenant les isotopes qui en font partie, il y a formation permanente de ${}^4_2\text{He}$. Il s'agit là d'un gaz «permanent» non radioactif. Il est extrêmement mobile et capable de s'infiltrer à peu près n'importe où. L'hélium 4 se crée sans arrêt: chaque désintégration alpha produit un noyau de ${}^4_2\text{He}$ qui a tôt fait de récupérer deux électrons dans son environnement pour former un atome du gaz. De par son ubiquité et sa mobilité, l'hélium est abondant au voisinage d'un minéral radioactif mais il ne constitue pas la signature d'une série. Bien qu'il ait joué un rôle important dans les débuts de l'histoire de la datation, on peut l'oublier pour la suite de cet exposé.



La découverte des séries radioactives a modifié la méthode de Boltwood et Holmes sur un point important. On ne peut plus se borner à parler de la désintégration de l'uranium en plomb. On doit aussi tenir compte des abondances respectives des isotopes de ces deux éléments. Et maintenant, place à l'élaboration d'une géochronologie permettant une détermination fiable de l'âge des roches et de celui de la Terre.

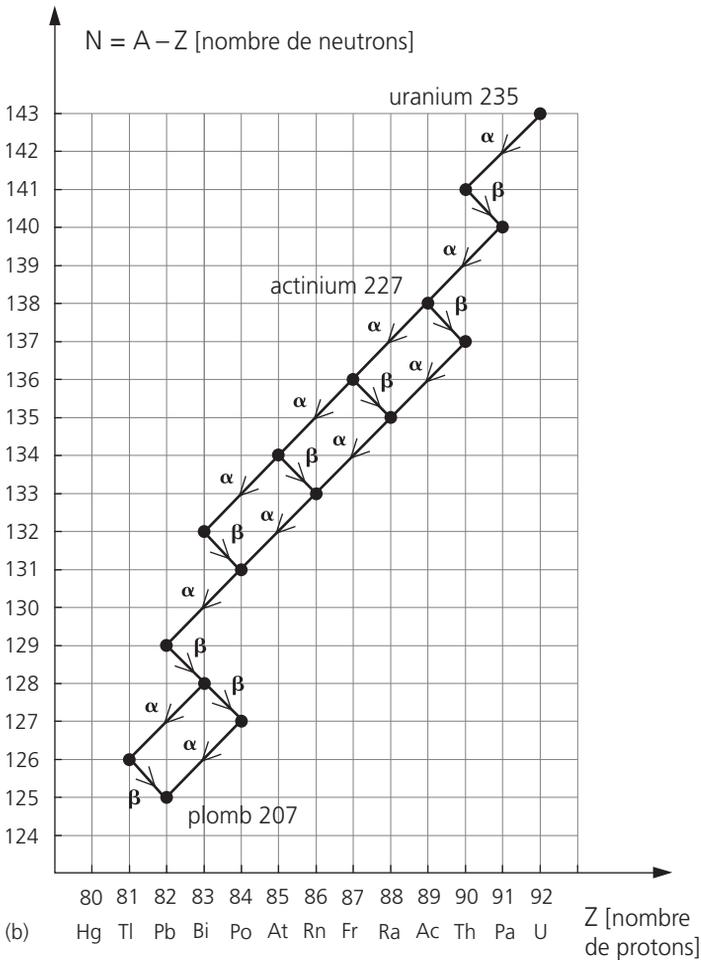


Fig. 4.8 Deux séries radioactives sont présentées, celle de l'uranium 238 (a) et celle de l'uranium 235 (b). Les nombres de masse des isotopes considérés (238 et 235 pour les deux têtes de série) s'obtiennent en sommant les valeurs correspondantes du nombre de neutrons $N = A - Z$ et du nombre atomique Z , respectivement portés sur les axes vertical et horizontal. Les deux séries aboutissent à des isotopes stables mais distincts du plomb. Chacune d'elles passe par un isotope gazeux du radon, chaque fois différent, baptisé d'abord «émanation du radium» dans le cas de la série de l'uranium 238.

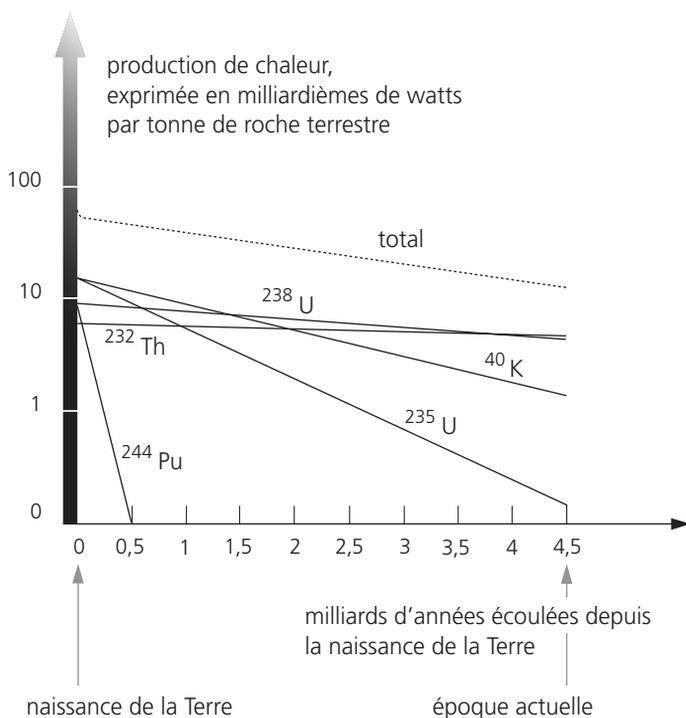


Fig. 4.9 La production de la chaleur interne due à la radioactivité a varié depuis la formation de la Terre. L'échelle verticale est dite logarithmique: quand on se déplace d'une graduation vers le haut, la production correspondante est multipliée par dix. Les contributions respectives des principaux éléments radioactifs à longue demi-vie sont représentées, de même que leur somme (droite pointillée). L'apport de chaque isotope à longue demi-vie englobe celui de tous les membres de la série radioactive dont il constitue le point de départ. Le plutonium 244 ne se retrouve plus dans les roches terrestres. D'après Halliday [50].

La datation des roches

Comment peut-on déterminer un âge?

Monsieur de la Palice était un vaillant capitaine français mort en 1525 à la bataille de Pavie. Mais ses exploits guerriers n'ont pas suffi à le rendre immortel. S'il est resté dans nos mémoires, c'est grâce à une chanson composée peu après sa mort. Un seul quatrain a franchi les siècles, mais quel quatrain:

«Monsieur d'La Palice est mort,
Mort devant Pavie;
Un quart d'heure avant sa mort,
Il était encore en vie.»

Cette constatation naïve a fait la réputation du malheureux capitaine auquel on attribue toutes les évidences énoncées depuis l'invention de l'écriture. Nous n'avons donc aucune raison de nous gêner en répétant avec *Le Petit Robert* que l'âge est «le temps écoulé depuis qu'un *homme*² est en vie». Et pourtant, même cette situation n'est pas dépourvue d'ambiguïté: les débats sur l'avortement humain montrent qu'il n'y a pas unanimité quant au choix de l'événement marquant le début de la vie. Est-ce la naissance ou la conception? Les choses se compliquent quand on veut étendre la définition de l'âge à toutes les créatures vivantes. Mais les vrais problèmes se posent quand il s'agit d'un minéral. Peut-on parler de la naissance d'une roche et lui attribuer un âge?

Pourvu que l'on renonce à tout parallèle avec la biologie, la réponse peut être affirmative. Il faut d'abord qu'une «horloge radioactive» soit incorporée à la roche, ce qui ne constitue pas une restriction bien importante. Il faut encore que cette horloge soit enclenchée lors d'un événement pouvant être assimilé à la naissance de la roche. Il faut enfin que la marche de ce chronomètre se poursuive imperturbablement jusqu'au jour où un géologue vient le consulter. Aussi rigoureuses que soient ces conditions, il arrive qu'elles soient satisfaites.

Lors d'une éruption volcanique, la *lave*, en se refroidissant, donne naissance à une roche volcanique qui contient fréquemment du potassium. En dehors des laboratoires, on ne rencontre que trois isotopes de ce métal. Les isotopes 39 et 41 sont stables; ils représentent à eux deux les 99,99 % du potassium naturel. Quant au potassium 40, il s'agit d'un isotope radioactif dont la demi-vie s'élève à 1,28 milliards d'années. Neuf fois sur dix, il se désintègre par émission bêta en calcium 40 mais, une fois sur dix, il se passe un événement spécial affectant l'un des dix-neuf électrons en révolution autour du noyau de potassium 40. Il peut être littéralement happé par ce noyau au moment où il passe tout près de lui, réalisant ainsi un exemple de *capture électronique*. Ce mode de désintégration échappe à la classification usuelle. Il dépend très faiblement des conditions extérieures au noyau que sont la température et la pression. Symbolisé à la figure 4.6, ce mode transforme le potassium 40 (${}_{19}\text{K}^{40}$) en argon 40 (${}_{18}\text{Ar}^{40}$).

La lave contient toujours une certaine quantité de potassium 40. Tant qu'elle reste liquide, l'argon, à peine formé, s'en échappe aussitôt: il s'agit d'un gaz noble qui ne peut se combiner chimiquement avec un constituant de la roche où il est produit. Mais, au moment où la lave se solidifie, l'argon est pris au piège et s'accumule peu à peu dans la roche volcanique: le chronomètre se met en marche et rien ne l'arrête plus jusqu'au jour où un chimiste ou un minéralogiste entreprennent de mesurer la quantité d'argon emprisonné

² C'est nous qui soulignons. Si l'on en croit cette définition, et contrairement à l'idée reçue, la femme ne cache pas son âge. Elle n'en a pas!

lors du refroidissement. Il chauffe la pierre volcanique, ce qui libère l'argon. Il suffit alors de comparer les teneurs respectives en potassium 40 et en argon pour pouvoir déterminer *la date de la solidification de la roche*, un événement qui peut donc être daté.

Sur le calendrier géologique, une éruption est un événement instantané, si bien que l'âge d'une roche volcanique ne souffre d'aucune ambiguïté. A l'opposé, les *roches sédimentaires* ne peuvent être datées par les méthodes de la géochronologie. Formées par l'agglomération de déchets minéraux ou biologiques entraînés dans la mer par érosion ou produits par des êtres vivant dans l'eau, ces roches ne constituent qu'un amas pétrifié de sable, de gravier, de quartz ou de débris de coquilles d'origines et d'âges distincts. Comment parler de l'âge de la roche elle-même? La date de sa pétrification pourrait certes servir d'acte de naissance. Mais la géochronologie ne peut la déterminer qu'indirectement, notamment lorsqu'une couche sédimentaire a le même âge qu'une roche volcanique susceptible d'être datée avec précision.

L'horloge uranium-plomb

A l'aube de la géochronologie, l'horloge potassium-argon n'avait pas encore été développée. Les pionniers se servaient de l'horloge uranium-plomb.

Si l'on fait abstraction des difficultés purement techniques, l'horloge uranium-plomb est complexe. L'uranium ne pose pas de problème. En revanche les quatre isotopes stables du plomb ne facilitent pas la tâche des chercheurs. Il faut d'abord mentionner les isotopes 206 et 207 auxquels aboutissent les deux séries issues respectivement de l'uranium 238 et de l'uranium 235. Ce sont des passages obligés pour quiconque se sert de l'horloge uranium-plomb. A cela s'ajoute le plomb 208, le terme d'une série radioactive issue du thorium. Et enfin le plomb 204 qui ne constitue pas un produit de désintégration. Ces quatre isotopes sont susceptibles de se retrouver simultanément dans une même roche.

Les obstacles auxquels sont confrontés les pionniers de la géochronologie paraissent insurmontables. Pour dater une roche, il leur faut connaître l'abondance initiale des divers isotopes. Ils doivent aussi se convaincre que chacun des chaînons des deux séries radioactives est sagement resté à l'intérieur de la roche. Finalement, ils espèrent qu'aucun intrus ne s'y est glissé subrepticement, ce qui arrive plus fréquemment qu'on ne l'imagine.

Il a fallu des années pour que l'on prenne conscience que ces obstacles étaient plus apparents que réels. Nombreux sont ceux qui ont participé à cette aventure [6]. Mais deux noms se détachent, ceux de Fritz Houtermans et de Clair Patterson.

De Staline et Hitler, lequel avait la police la plus professionnelle?

Il est peu de figures plus originales que celle de l'Allemand Friedrich Georg (Fritz) Houtermans (1903-1966), un personnage si pittoresque que ceux qui l'ont connu couraient le risque d'oublier qu'il était un bon physicien

[51]. Après une thèse à Göttingen sous la direction du physicien allemand James Franck (1882-1964), prix Nobel de physique 1925, Houtermans s'intéresse à la fusion nucléaire. On y reviendra dans les chapitres qui suivent.

En 1933, les nazis prennent le pouvoir en Allemagne. Sa mère étant à moitié juive, Houtermans pourrait s'inquiéter, mais ce n'est pas dans son caractère. Il préfère plaisanter et faire profiter ses interlocuteurs de sa réserve inépuisable d'histoires juives. Le nombre d'anecdotes qui courent encore à son sujet est tel que certaines ont été recueillies et publiées par l'un de ses élèves, Haro von Buttlar [52]. Une des réponses que Houtermans aimait à faire aux remarques des antisémites ne les faisait certainement pas rire, tant il est vrai que la haine et le sens de l'humour ne font pas bon ménage. Il disait: «Quand vos ancêtres vivaient encore dans les arbres, les miens étaient déjà en train de falsifier des chèques.» [51].

Au demeurant, Houtermans a tout pour déplaire aux autorités nazies: il ne cache pas son appartenance au parti communiste allemand. Dès 1933, il quitte l'Allemagne pour l'Angleterre où il ne se plaît guère. Les mauvaises langues prétendent que la gastronomie britannique y est pour quelque chose. Deux ans plus tard, il reçoit une proposition de l'Institut de physique technique de la ville ukrainienne de Kharkov. Cette institution bénéficie d'une solide réputation et réunit de grands physiciens soviétiques, parmi lesquels Lev Landau. Houtermans s'y sent heureux. En revanche, il constate très vite que l'Union soviétique n'est pas le paradis dont il rêve. Pour lui et pour des milliers d'êtres humains, elle va devenir l'enfer.

L'année 1937 marque le paroxysme de la terreur stalinienne. L'armée et les instituts de recherche sont décimés par les purges. La famille Houtermans décide de fuir. Durant l'été, Charlotte Houtermans part pour l'Angleterre. Elle cherche sans succès une situation pour son mari qui leur aurait permis de quitter l'URSS. Les Houtermans décident malgré tout de partir mais Fritz est arrêté au moment où il s'occupe des formalités douanières. Grâce au courage de collègues russes de Houtermans, Charlotte peut fuir et se réfugier avec ses deux enfants aux Etats-Unis. Entre temps, elle alerte les savants occidentaux les plus renommés. Ils adressent sans succès de nombreux appels aux autorités soviétiques pour qu'elles rendent la liberté à Fritz Houtermans.

Fritz est tombé dans les griffes de la NKVD, l'ancêtre du KGB. Dans son horreur sanguinaire, le système est cohérent. Il voit partout des ennemis du régime si bien que, quand l'un d'entre eux est arrêté, ses agents passent des nuits entières à le torturer afin qu'il dénonce ses «complices». Il ne fait aucun doute pour ses bourreaux que Houtermans espionne au profit de son pays d'origine.

Les agents du NKVD connaissent leur métier. Ils tiennent Houtermans par sa famille, dont il ignore qu'elle a pu fuir. S'il refuse de coopérer, ses tortionnaires menacent Houtermans d'arrêter sa femme, puis de placer ses deux enfants dans un orphelinat tout en modifiant leur nom afin qu'il ne puisse plus jamais les retrouver. La malheureuse victime de ce chantage dévoile le nom de ses complices fantômes. Il les choisit parmi les savants dont il sait qu'ils sont en sécurité en Occident ou qu'ils ont déjà péri dans les geôles de Staline. Il reconnaît aussi avoir inventé un appareil fantastique qui permet de mesurer depuis le sol la vitesse des avions russes. Il en dessine les plans devant

ses inquisiteurs et avoue les avoir fait parvenir à ses chefs. Quand on lui demande l'identité de ses correspondants, il livre leurs noms: il s'agit des colonels Scharnhorst et Gneisenau, deux officiers d'état major de la Wehrmacht. Même dans la situation épouvantable de Houtermans, l'humour ne perd jamais ses droits. Ces deux noms ont effectivement laissé une trace dans l'histoire. Ce sont ceux de deux généraux prussiens qui s'étaient illustrés durant les guerres napoléoniennes. Guillaume II puis Hitler les ont utilisés pour baptiser des navires de guerre.

Pour éviter de devenir fou en prison, Houtermans se lance dans «[...] la seule recherche expérimentale à laquelle on puisse se livrer quand on ne dispose pas de laboratoire, la théorie des nombres». Comme il est dépourvu de papier et de crayons, il se sert d'un morceau de savon pour gribouiller sur les parois de la cellule. Selon Khriplovitch, certains des résultats qu'il obtient ainsi sont originaux et auraient mérité d'être publiés [51]. Houtermans parvient ainsi à survivre plus de trois ans. A la suite du pacte de non-agression signé le 23 août 1939 par l'Allemagne nazie et l'Union soviétique, les prisonniers allemands sont extradés en 1940 vers l'Allemagne et remis à la Gestapo.

Houtermans tombe-t-il de Charybde en Scylla? Pas tout à fait. La situation s'est améliorée.

Il retourne en prison et les interrogatoires reprennent. Mais, selon le propre témoignage de Houtermans, si la prison allemande est plus sale que la geôle russe, si les poux y sont aussi féroces que les gardiens, la Gestapo est moins professionnelle que la NKVD. On lui demande des informations sur ses amis communistes, mais, du côté des inquisiteurs, l'ardeur fait défaut. Finalement, en juillet 1940, Houtermans est libéré. Il apprendra plus tard qu'il le doit à l'intervention de certains de ses collègues allemands qui lui procurent un poste de chercheur dans un institut privé travaillant sur mandat du gouvernement. L'ironie de l'histoire veut que Houtermans se soit penché sur la réaction en chaîne qui deviendra la clé de la fabrication des piles et des armes nucléaires. Pour la science allemande, ce sera un échec qui reste aujourd'hui encore au centre d'une polémique. Les physiciens allemands, conscients de leur responsabilité, ont-ils saboté cette recherche, comme ils l'ont affirmé eux-mêmes? Ou alors, comme de nombreuses voix le proclament, n'auraient-ils pas été à la hauteur de la tâche parce que les moyens leur manquaient?

En ce qui concerne Houtermans, il semble bien qu'il n'ait jamais tourné sa veste et que son opposition au régime nazi n'ait jamais fléchi [51]. Avant la fin de la guerre, ce fumeur enragé réussit encore à jouer un tour de son cru aux autorités de son pays. Bien que le tabac soit strictement rationné, il réussit à en obtenir une bonne quantité en affirmant qu'on peut en extraire de l'*eau lourde*, une substance recherchée par les physiciens nucléaires car elle contient une proportion anormalement élevée de l'isotope lourd ${}^3\text{H}^2$ de l'hydrogène. Une fois que sa réserve est épuisée, il renouvelle sa demande qui, cette fois, attire l'attention de la Gestapo. Il est immédiatement licencié. Grâce au soutien de ses collègues, il s'en tire une nouvelle fois. Il est engagé à l'Université de Göttingen, un des berceaux de la physique du XX^e siècle. Houtermans se lance dans l'étude de la radioactivité. Il va être confronté à la géochronologie naissante.

La contribution de Houtermans à la géochronologie

Au moment où Houtermans commence à s'intéresser à ce domaine, l'horloge uranium-plomb est à l'honneur. D'un point de vue expérimental, la technique de séparation des isotopes s'est améliorée. Mais la méthode se heurte à une difficulté de principe.

Pour déterminer sans peine l'âge d'une roche, il suffirait de connaître l'abondance initiale de l'uranium 238 et du plomb 206, celle qui caractérisait la roche en formation. On pourrait alors la comparer avec l'abondance actuelle de ces deux isotopes. L'uranium se désintègre en plomb à un taux connu et invariable, si bien que le calcul de l'âge serait à la portée d'un lycéen. Bien plus, l'exercice pourrait se répéter avec le couple uranium 235 - plomb 207, ce qui permettrait de vérifier le résultat précédent. Seule difficulté: l'uranium 235 est beaucoup moins abondant que l'isotope 238, ce qui fait que sa présence est moins facile à mettre en évidence.

Tout cela est bien beau, mais nous n'avons accès ni à la distribution initiale d'uranium, ni à celle du plomb. Nous ne pouvons mesurer que les distributions isotopiques actuelles. Comme le plomb est plus mobile que l'uranium, nous pouvons craindre qu'une fraction du plomb *radiogénique* ait disparu: les isotopes 206, 207 et 208 du plomb sont dits radiogéniques car ce sont des produits de désintégration; ils s'opposent à l'isotope 204 qui ne l'est pas.

C'est là qu'intervient Houtermans. En 1947, il découvre un critère permettant de déterminer si des roches uranifères différentes ont le même âge. [53] En cas de réponse positive, Houtermans montre comment calculer l'âge de ces roches jumelles en se bornant à mesurer, pour chacune d'elles, *les abondances actuelles des isotopes 204, 206 et 207 du plomb ainsi que celle de l'uranium 238*. Dans toutes les roches actuelles, l'uranium 235 est 137,88 fois moins abondant que l'uranium 238. Il n'est donc pas nécessaire de mesurer son abondance. [54]

L'immense avantage de cette méthode, c'est que, pour chaque minéral que l'on étudie, elle ne nécessite que la mesure des abondances actuelles de quatre isotopes. Pour y parvenir, Houtermans n'a dû développer aucune technique expérimentale nouvelle. Il s'est contenté de réfléchir profondément aux conséquences de la décroissance exponentielle de l'abondance d'un isotope radioactif et de tirer parti de la présence simultanée de deux horloges indépendantes, les couples uranium 238 - plomb 206 et uranium 235 - plomb 207. Seule contrainte qu'impose la méthode, la teneur en uranium des roches jumelles ne doit pas être la même.³

Ainsi exposée, la méthode de Houtermans pourrait apparaître comme étant singulièrement technique et, pour tout dire, dépourvue d'intérêt. Or c'est le contraire qui est vrai. La valeur d'un instrument nouveau ou d'une méthode inédite réside dans l'exploitation qu'on en fait. Il se trouve qu'elle allait permettre de déterminer l'âge de la Terre et d'en apprendre plus sur le mode de formation du système solaire.

³ Lors de la mise en œuvre de cette nouvelle méthode, Houtermans n'est qu'un acteur parmi d'autres qui mériteraient d'être cités. Le lecteur intéressé peut se référer à l'ouvrage remarquable de Dalrymple [54].

Les plus vieilles roches

On pourrait naïvement identifier l'âge de la Terre à celui des plus anciennes roches qu'on y rencontre et qui remontent à 3,8 milliards d'années. Les plus vieux échantillons ont été découverts en Sibérie, au Canada et en Australie. Mais il existe des minéraux encore plus anciens, les *zircons*, des cristaux presque indestructibles dont les bijoutiers se servent comme d'un ersatz de diamants. Certains d'entre eux ont 4,2 milliards d'années, si bien que l'âge de la Terre ne devrait pas être inférieur à celui des zircons. Mais rien n'empêche qu'il soit supérieur.

L'enveloppe superficielle de la Terre, la *lithosphère*, est une coquille solide épaisse de cent kilomètres qui flotte sur l'*asthénosphère*, un milieu chaud et visqueux. Or ces deux milieux échangent de la matière en permanence. A la faveur de la *tectonique des plaques*, qui implique la dérive des continents, une partie de la masse rocheuse de la lithosphère s'engouffre dans l'océan de roches en fusion sur laquelle elle repose. Lors des éruptions volcaniques, des roches «fraîches» viennent remplacer en surface celles qui se perdent en profondeur. Pour la géochronologie, il s'agit bien de roches nouvelles puisque l'horloge radioactive qu'elles portent en elles est remise à zéro.

Si l'on pouvait trouver des roches formées en même temps que notre planète, la méthode de datation des roches développée par Houtermans serait applicable à la Terre dans son ensemble. Puisque tous les minéraux que l'on trouve sur Terre semblent avoir été formés plus tardivement, la situation paraît être sans issue. A moins que l'on aille chercher ailleurs des roches aussi anciennes que la Terre. Ailleurs, c'est-à-dire dans le ciel. C'est du moins ce que propose Houtermans. Il va être entendu par Clair Patterson.

Meteor Crater, Canon Diablo et l'âge de la Terre

Les *météorites* sont des fragments de corps célestes qui tombent sur la Terre. Ce sont parfois de simples cailloux et la petite histoire a gardé les noms de plusieurs témoins de leur chute. Au siècle des Lumières, de tels récits étaient accueillis avec scepticisme par les gens sérieux. En 1807, apprenant que deux professeurs de Yale avaient annoncé la chute d'une météorite, Thomas Jefferson, le futur président des Etats-Unis, se serait exclamé :

«It is easier to believe that Yankees Professors would lie,
than that stones would fall from the sky.⁴»

Jefferson était mal informé. En 1803, le physicien et astronome français Jean-Baptiste Biot (1774-1862) avait fait un rapport détaillé de la chute d'une pierre dans l'Orne. Dès cette époque, les météorites abandonnent définitivement le statut infamant qu'elles partageaient avec la licorne et le serpent de

⁴ «Il est plus facile de croire à un mensonge des professeurs Yankees que d'admettre que des pierres puissent tomber du ciel.» L'anecdote est peut-être apocryphe [54].

mer. Malgré tout, la famille des objets fabuleux ne désemplit pas. De nos jours, les météorites y ont été avantageusement remplacées par le yéti ou les OVNI.

Certaines météorites sont de grande taille et leur chute ouvre un vaste cratère dans le sol. Aujourd'hui, près de Flagstaff, en Arizona, on peut visiter *Meteor Crater*, une cuvette de 700 m de rayon. Elle date d'environ 50 000 ans; on attribue son existence à la chute d'une météorite de grande taille. L'histoire de son exploration ne manque pas de sel.

Au début du XX^e siècle, les astronomes se demandaient encore si *Meteor Crater* était d'origine volcanique ou météoritique. Or, dans son voisinage, les Indiens avaient recueilli depuis longtemps des fragments de fer. En 1902, le géologue et homme d'affaires américain Daniel Moreau Barringer (1860-1930) se convainc qu'il s'agit bien d'un cratère d'impact et que la météorite qui en est la cause était essentiellement constituée de fer. Il décide d'exploiter la mine que constituent les restes de l'énorme météorite. Il est persuadé qu'elle est enfouie dans le cratère ou dans son voisinage immédiat, et que sa taille est comparable à celle de la cavité creusée lors du choc. En ce cas, elle dépasserait le milliard de tonnes. Il achète à bas prix le terrain désertique qui contient le cratère et se met à la recherche de son trésor. Pendant vingt-cinq ans, il creuse sans grand succès. La communauté scientifique est sceptique, les banquiers le harcèlent et, finalement, la crise boursière de 1929 met fin à ses rêves. Il mourra un an plus tard. [55]

La météorite était beaucoup plus petite que Barringer ne l'imaginait. Son diamètre ne dépassait probablement pas 30 m, ce qui correspond à une masse d'environ 100 000 tonnes. Une grande partie s'est vaporisée lors de l'impact, mais les roches avoisinantes en contiennent de nombreux débris, notamment à quelques kilomètres de là, au *Canyon Diablo*. Ces fragments prouvent que, comme Barringer le pensait, la météorite était constituée d'un alliage de fer et de nickel. De toutes façons, Barringer ne s'était pas trompé. Il y avait bien un filon à creuser. Non pas en vendant du fer mais en exploitant les touristes. Ses descendants l'ont bien compris qui demandent une contribution financière à quiconque désire admirer le cratère et le musée qui l'accompagne.

Clair Patterson (1922-1995) est un géochimiste américain. Il développe les techniques d'analyse isotopique du plomb et choisit les météorites comme sujet d'étude. Il parvient à étudier des échantillons de très faible masse sans les contaminer avec le plomb terrestre omniprésent qui fausserait les résultats. Au Canyon Diablo, il découvre un trésor plus précieux que le fer ou le touriste. Ayant recueilli des fragments de la météorite qui en porte désormais le nom, il établit l'acte de naissance de la Terre et du système solaire.

La météorite de Canyon Diablo ne contient que peu de traces d'uranium ou de thorium, les deux seuls éléments dont la désintégration peut produire un isotope stable du plomb. Bien que ce métal soit également peu abondant dans les fragments recueillis, Patterson parvient à en analyser la distribution isotopique. Il observe que l'abondance de l'isotope non radiogénique du plomb, le plomb 204, est anormalement élevée. Elle dépasse tout ce qu'on avait observé jusqu'alors. Patterson se met à rêver. Peut-être s'agit-il là d'une marque d'ancienneté inégalée: les isotopes radiogéniques ne sont apparus que progressivement, et seulement dans les échantillons pourvus d'une abon-

dance suffisante d'uranium. Autre circonstance favorable, le désert de l'Arizona ne contient que très peu ou pas du tout de ce plomb que l'activité humaine répand déjà à plaisir dans son environnement, si bien que la météorite de Canyon Diablo a peu de chance d'avoir été contaminée.

Si Patterson a raison, la météorite de Canyon Diablo remonte à la formation du système solaire et pourrait avoir le même âge que la Terre. Pour s'en assurer, il décide d'adopter la méthode de Houtermans. Il va procéder en deux temps.

Patterson commence par recueillir et analyser des échantillons tirés de cinq météorites. Trois d'entre elles sont essentiellement constituées de fer, à l'image de Canyon Diablo. Les deux autres sont des météorites pierreuses. Il compare entre elles les distributions isotopiques d'uranium et de plomb. Elles ne coïncident pas mais, beaucoup plus important, *l'âge de ces météorites est pratiquement le même. Il s'élève à 4,55 milliards d'années.* Le fait que les météorites ont toutes été formées simultanément parle en faveur d'un moment initial privilégié qu'il conviendra d'interpréter.

Patterson passe à une deuxième étape, autrement importante. Il décide de comparer l'âge des météorites avec celui de la Terre, que personne ne connaît. Mais il se heurte à une difficulté de taille. Comparée à la Terre, une météorite n'est qu'un petit caillou et la distribution isotopique du plomb qu'on peut y observer est bien déterminée. Ce n'est pas le cas de la Terre: il suffit d'analyser deux roches terrestres distinctes pour que les résultats diffèrent entre eux et donnent, pour chacune d'elles, un âge différent. La méthode qui consisterait à faire une moyenne entre les âges respectifs de chaque type de roche serait absurde puisque, dans l'histoire d'une roche, il peut arriver que son horloge radioactive soit remise à zéro.

Patterson tourne la difficulté de manière très astucieuse. Il analyse une série de sédiments marins récents. Produits par érosion, ils devraient comporter le mélange le plus fidèle qui soit du plomb terrestre originel. Or les mesures confirment son attente: la Terre a le même âge que les météorites, sans lesquelles il n'aurait pu être déterminé. La méthode utilisée nécessite l'analyse d'échantillons différents mais ayant le même âge.

Nous observons dans différentes régions de la Galaxie des *nuages intergalactiques*. Ils sont formés de gaz et de poussières et, là où ils sont particulièrement denses, nous identifions des étoiles en formation. Il y a 4,6 milliards d'années environ, notre Soleil s'est formé de la même manière. Il s'est condensé à partir d'un nuage primordial, auquel on donne parfois le nom de *nébuleuse primitive*. Autour de notre Soleil en devenir, le nuage s'est transformé en un disque en rotation où se sont formées les planètes ainsi que des corps analogues, moins volumineux, les comètes et les astéroïdes. La naissance de la Terre a eu lieu lorsque ces trois types de corps célestes se sont formés aux dépens de la nébuleuse primitive. Décidément, depuis l'époque de Kelvin, la Terre a considérablement vieilli:

«Le tems s'en va, le tems s'en va, ma Dame:
Las! Le tems non, mais nous nous en allons...» [56]

Aujourd'hui que nous connaissons la chimie, la minéralogie et la structure de nombreuses météorites, leur origine est bien comprise. Ce sont des frag-

ments arrachés aux astéroïdes lors de collisions mutuelles. De tels chocs se produisent inévitablement puisque l'on compte des dizaines de milliers de ces minuscules planètes dont la masse totale atteint tout juste 4% de celle de la Lune. La météorite de Tunguska, que l'on rencontrera plus loin, constitue probablement une exception. Elle pourrait être un fragment de comète [54].

Il va sans dire que la mise au point d'une méthode de datation des roches n'a pas servi qu'à la détermination de l'âge de la Terre. Elle a aussi permis de mettre au point une chronologie de l'histoire de la Terre dont l'image devient chaque année plus nette et plus colorée (tableau 4.2). Quant à la Lune, c'est le développement de l'ère spatiale qui a permis d'en apprendre davantage. Les plus anciennes roches lunaires examinées en laboratoire battent le record terrestre: elles sont vieilles de 4,42 milliards d'années alors que les plus récentes remontent à 3,1 milliards d'années. La Lune est un astre mort dont l'activité volcanique a cessé à cette date.

Tableau 4.2 Division de l'histoire de la Terre en ères et en périodes (colonne centrale). Les âges sont donnés en millions d'années. D'après Dalrymple [54].

Précambrien 4500 - 570		Naissance de la Terre et de la Lune, plus vieilles roches, premiers fossiles, premiers organismes pluricellulaires (algues)
Ere Paléozoïque ou Primaire	Cambrien 570 - 505	Premiers animaux pluricellulaires, premiers coraux
	Ordovicien 505 - 438	Premiers poissons
	Silurien 438 - 408	Premières plantes terrestres
	Dévonien 408 - 360	Premiers insectes, premiers tétrapodes
	Carbonifère 360 - 286	Premiers reptiles
	Permien 286 - 248	
Ere Mésozoïque ou Secondaire	Trias 248 - 213	Premiers dinosaures, premiers mammifères
	Jurassique 213 - 144	Premiers oiseaux
	Crétacé 144 - 65	Premières plantes à fleurs
Ere Cénozoïque ou Tertiaire	Paléocène 65 - 55	
	Eocène 55 - 38	Premiers équidés, premières baleines, premiers singes
	Oligocène 38 - 24	Premiers grands singes
	Miocène 24 - 5,1	Premiers hominidés
	Pliocène 5,1 - 1,8	
	Pleistocène 1,8 - 0	Premiers hommes modernes

La météorite ALH84001⁵

C'est dans la ville égyptienne de Nakhla que, en 1911, pour la première fois dans l'histoire des hommes, la chute d'une météorite provoqua la mort d'un chien. C'est dire à quel point une telle rencontre est improbable, même si l'on prétend que les Gaulois n'avaient d'autre crainte que de voir le ciel leur tomber sur la tête. Or cette météorite canicide réservait une seconde surprise. Il s'agissait d'une SNC. Cet acronyme mélodieux est réservé à une classe très particulière de météorites puisque nous n'en connaissons guère plus de deux douzaines. S, N et C sont les initiales des localités de Shergotty en Inde, de Nakhla et de Chassigny en France, lieux de chute de trois objets cosmiques à la fois énigmatiques et similaires. Les SNC sont constituées de roches volcaniques. Or on ne trouve de volcans ni dans les astéroïdes, ni dans les comètes. On ne les trouve qu'à la surface de certaines planètes ou sur certains de leurs plus volumineux satellites. C'est le cas de Io, l'une des quatre lunes de Jupiter découvertes par Galilée.

Au début des années 1980, la datation des SNC apporte une confirmation de leur statut très particulier. Elles sont beaucoup plus jeunes que les météorites usuelles si bien qu'elles se sont formées beaucoup plus tard que le système solaire. L'une des SNC n'est vieille que de 180 millions d'années. La conclusion paraît s'imposer. Les SNC proviennent d'une planète ou d'un satellite où a existé à un moment ou à un autre une activité volcanique assez importante pour que l'horloge interne de la météorite ait pu être remise à zéro. Mais certains points restent obscurs.

Tout d'abord, quel processus physique se déroulant à la surface d'une planète est-il assez puissant pour en éjecter un fragment sans pour autant le détruire? Une éruption volcanique paraît exclue, la puissance mise en jeu étant insuffisante. La seule réponse plausible semble être l'impact rasant d'un astéroïde ou d'une comète.

La seconde question concerne l'identité de la planète d'où proviennent les SNC. La réponse paraît assez claire. Dans une poche vitrifiée de l'une des SNC, un chercheur de la NASA découvrit de l'argon 40 en telle quantité qu'il ne pouvait résulter de la désintégration du potassium 40. Grâce aux conclusions de la mission Viking sur Mars, on comprit que le gaz contenu dans la poche de la météorite n'était autre qu'un minuscule échantillon de l'atmosphère martienne. La composition et la structure de la météorite permirent de vérifier l'hypothèse selon laquelle, dans le passé, l'eau avait été présente à la surface de Mars.

La conclusion de la NASA n'est pas banale. A l'intérieur du système solaire, il existe un *courrier* qui permet à certaines planètes d'échanger des informations et des paquets bien ficelés. Et peut-être plus, la découverte de ALH84001 le suggère...

L'Antarctique est un royaume béni des chercheurs de météorites. «Si vous trouvez une pierre dans la glace de l'Antarctique, elle ne peut être venue que

⁵ La présentation de cet alinéa suit de près, en la résumant, celle qu'en fait Paul Davies à la référence [57].

du ciel. Les météorites tombées sur la glace sont rapidement ensevelies sous la neige, mais à mesure que les glaciers avancent vers l'océan, ils transportent les roches [...] qui remontent parfois en surface. On les aperçoit aisément sur la blancheur de la neige.» [57]

Fin 1984, Roberta Score, membre d'une équipe américaine de chercheurs de météorites parcourt Allan Hills, une région de l'Antarctique où elle trouve une pierre verdâtre qui reçoit son nom de baptême, ALH84001. ALH et 84 rappellent le lieu (Allan Hills) et l'année de la découverte. 001 indique qu'il s'agit de la première météorite ALH84.

A ce détail près, la météorite ne présente rien de particulier. Conformément aux usages, la pierre n'entre pas en contact avec des mains nues. Elle est maintenue à basse température jusqu'à ce qu'elle soit remise au laboratoire d'étude des météorites de Houston où elle est conservée à la température de l'azote liquide. On la classe comme «diogénite», une catégorie de météorites faites de lave solidifiée. Quatre ans plus tard, David Mittlefehldt, un géochimiste intéressé par les diogénites, analyse un fragment de ALH. En 1990, il y découvre des anomalies dont il craint qu'elles ne résultent de l'imperfection de son analyse. Il les mentionne toutefois dans une étude générale soumise à une revue scientifique.

Quiconque propose un manuscrit à une revue scientifique sérieuse sait que, avant publication, son texte va être relu par un ou deux experts de la discipline, que le *franglais* désigne sous le nom de «referees⁶». L'étude sur les diogénites ne fait pas exception. Le lecteur trouve très étrange les anomalies que présente ALH et suggère à Mittlefehldt de revoir ses analyses. Celui-ci se rend alors compte qu'il n'a pas affaire à une diogénite mais à une météorite martienne distincte des SNC. Le système des *lecteurs*, souvent contesté à l'intérieur de la communauté scientifique, vient de donner une nouvelle preuve de son utilité.

La NASA commence à s'intéresser de plus près à ALH et entreprend une recherche approfondie à son sujet. Les techniques de datation les plus récentes livrent alors une première surprise. Contrairement aux météorites martiennes connues jusqu'alors, ALH a 4,5 milliards d'années. Elle est presque aussi vieille que Mars.

La météorite porte les traces d'un choc, probablement dû à l'impact d'une autre météorite ou d'un astéroïde. On y distingue des fractures. A certains endroits, la roche paraît avoir fondu si bien que, dans ces régions, l'horloge potassium-argon a été remise à zéro. Effectivement, dans les interstices où la roche a subi une fusion sous l'effet du choc, l'âge que l'on mesure est inférieur à celui du reste de la météorite. Il ne dépasse pas 4 milliards d'années et peut correspondre à la date du choc. Ce résultat est cohérent: durant les 500 premiers millions d'années de leur existence, les planètes ont subi un bombardement intensif. A l'intérieur des fractures, on relève encore des traces d'un dépôt aqueux. Il s'est vraisemblablement infiltré durant la période où la future météorite gisait encore au voisinage immédiat de la surface de Mars.

Il y a mieux. Il est possible de fixer la date d'un deuxième impact, celui qui a projeté la pierre dans l'espace. Ce choc a dû lui communiquer une vitesse

⁶ Arbitres ou lecteurs.

d'environ 5 kilomètres par seconde. Le seul processus capable d'une performance pareille est connu. Il s'agit de la chute d'un astéroïde dont le diamètre devait dépasser un kilomètre.

Pour dater le deuxième choc de la vie de la météorite, on mesure la quantité de rayons cosmiques qu'elle a absorbés durant son voyage interplanétaire. Sur Mars, la pierre était enfouie à une profondeur suffisante pour que les particules à haute vitesse issues du Soleil ou de la Galaxie n'aient pu l'atteindre. Dans l'espace, en revanche, sa propre surface est sans cesse bombardée par les particules cosmiques qui laissent des traces dans le minéral. Elles y provoquent des réactions nucléaires qu'il est possible d'analyser après coup. Cette méthode s'applique à toutes les météorites, martiennes ou non, et l'on constate que le séjour dans l'espace de ALH a été relativement court. Elle a séjourné 16 millions d'années entre Mars et la Terre.

Reste une dernière date à déterminer: depuis combien de temps la météorite reposait-elle parmi les neiges de l'Antarctique? Pour y répondre, on utilise la *datation au carbone 14*, chère aux archéologues, car l'isotope radioactif ${}_{6}^{14}\text{C}$ se transforme par radioactivité bêta en azote 14 (${}_{7}^{14}\text{N}$) avec une demi-vie de 5730 ans. Six mille ans ne représentent qu'un instant en comparaison des durées géologiques, mais c'est une durée comparable avec celle de la vie d'une civilisation. Sous l'effet des rayons cosmiques, une certaine quantité de carbone 14 se forme à l'intérieur de la météorite. Cette production cesse dès que la météorite est enfouie dans la neige, si bien que le carbone 14 peut rendre son verdict: ALH n'est tombée sur Terre que depuis treize mille ans.

Que l'on puisse reconstituer l'odyssée de ALH avec un tel luxe de détails est déjà fascinant, mais cette météorite est passée dans l'histoire pour une autre raison. A l'intérieur de la fracture, les géochimistes ont découvert des indices convergents de l'existence d'une vie bactérienne qui aurait existé sur Mars, à l'époque du premier choc. En août 1996, la nouvelle est annoncée par Bill Clinton lors d'une conférence de presse. Il s'exprime en ces termes: «Today Rock 84001 speaks to us across all those billions of years and millions of miles... It speaks of the possibility of life. If this discovery is confirmed, it will surely be one of the most stunning insights into our universe that science has ever uncovered.»⁷

Depuis lors, la nouvelle n'a pas été confirmée et la communauté scientifique est franchement sceptique. Les indices découverts par la NASA ne lui paraissent pas convaincants. Nous devons encore attendre une preuve incontestable de l'existence passée ou présente d'une vie martienne.

ALH84001 pose une question importante. Il semble possible qu'une vie élémentaire ou ses fossiles puissent passer d'une planète à l'autre. Si nous voulons comprendre comment la vie a pu prendre naissance, ce qui constitue le secret le mieux gardé, nous ne devons pas nous contenter d'observer notre planète. Nous devons aussi regarder vers d'autres planètes du système solaire. Ou peut-être encore ailleurs.

⁷ La roche 84001 nous parle aujourd'hui au travers de ces milliards d'années et de ces millions de milles... Elle nous parle de l'émergence de la vie. Si cette découverte se confirme, la science aura certainement levé un voile sur l'un des secrets les plus prodigieux de l'univers.

5 QUE LA LUMIERE SOIT!

«Dieu dit: Que la lumière soit! Et la lumière fut.»
[Genèse 1, 3]

L'univers paradoxal

Dans la Genèse, le récit de la Création est l'exemple d'un mythe fondateur ne distinguant pas clairement la Terre de l'univers. Ce n'est que bien plus tard que les deux concepts se sont mis à vivre une vie indépendante.

La prise de conscience de la sphéricité de la Terre est un processus qui commence dans l'Antiquité et se termine lors des grandes découvertes de la Renaissance. Depuis des siècles, nous n'avons plus de doute sur la géométrie de notre planète. En Europe, on chercherait longtemps un passant ignorant que la Terre est ronde ou qui se demanderait comment font les habitants des antipodes pour vivre la tête en bas. En revanche, peu nombreux sont ceux qui ont une idée claire des problèmes que soulèvent la structure et la géométrie globales de l'univers. Face à cette situation, notre intuition est désarmée: «Le champ de l'intellect est plus vaste que celui de l'imagination. On peut comprendre ce qu'on ne peut imaginer.» [58]

Hors des mathématiques, l'infini donne le vertige. Même quand il s'agit de l'univers, nous ne sommes pas prêts à l'affronter. Un univers fini nous rend tout aussi perplexes. Si l'on en croit le *Petit Robert*, l'univers est «l'ensemble de tout ce qui existe, considéré selon les philosophies comme la totalité des choses créées (création), la totalité des êtres, l'ensemble des choses perçues, comprenant ou non la conscience humaine». Dans ces conditions, on voit mal comment l'univers pourrait avoir une limite. Une fois franchie cette borne hypothétique, nous n'aurions pas quitté l'univers...

Si son extension spatiale sollicite vainement notre imagination, que dire alors de la naissance de l'univers? Son existence impliquerait qu'il y a eu un instant qui n'était précédé lui-même d'aucun instant, un instant où «avant» n'avait pas de sens et où seul «après» en avait un. Celui qui refuse d'envisager une telle situation n'améliore pas les choses. Il se condamne à affronter un nouvel infini, l'infini temporel.

Ces questions ne sont pas seulement posées par les amateurs de spéculations philosophiques. Elles constituent le pain quotidien d'une discipline née au XX^e siècle des amours de l'astronomie et de la physique, la cosmologie.

Otez le Soleil que l'on voie l'étoile!

Le physicien et astronome britannique Arthur Eddington (1882-1944) est considéré comme le créateur de l'astrophysique [59]. Entre 1916 et 1926, il

parvient à comprendre la structure interne des étoiles en leur appliquant les lois de la physique «terrestre».

La rapidité d'esprit d'Eddington était proverbiale parmi ses collègues. A peine abordait-il un sujet qu'il les interrompait aussitôt et leur expliquait ce qu'ils s'apprêtaient à dire. Un autre aspect de la personnalité d'Eddington ressort clairement d'une anecdote célèbre qui serait révélatrice même si elle était apocryphe. Ejnar Hertzsprung, un célèbre astronome d'origine danoise, avait fait un pèlerinage en Angleterre. Il tenait à voir le grand homme de ses propres yeux. A son retour, ses collègues accourent afin de l'interroger sur Eddington. Et Hertzsprung de répondre: «Eddington est capable de dire «oui», il est capable de dire «non». Mais c'est tout ce que je peux vous apprendre à son sujet.» [59]

Eddington a joué un rôle hors du commun dans un autre domaine. Loin d'être un spécialiste, il s'illustrait par la variété de ses intérêts. Nommé à trente ans professeur d'astronomie à l'Université de Cambridge, où il remplace George Darwin, le fils de Charles, il s'y distingue rapidement grâce à ses dons de théoricien. En tant que quaker¹, il refuse de participer à la Première Guerre mondiale. Il peut ainsi étudier la théorie de la relativité générale d'Einstein, parue en 1915. On peut saluer le fait que les publications d'un pacifiste suisse, éditées dans une revue scientifique allemande, soient parvenues durant la guerre sur la table d'un objecteur anglais. Elles avaient passé par les Pays-Bas, un pays neutre. La nouvelle théorie d'Einstein passionne Eddington, mais il réalise bien vite qu'elle ne sera pleinement reconnue que lorsqu'une observation parviendra à la confirmer. Si belles soient-elles, les théories non vérifiées n'ont pas droit de cité en physique. Dans ces conditions, Eddington imagine une expérience cruciale permettant de trancher entre la théorie classique de la gravitation et la théorie de la relativité générale.

Un avion à réaction faisant le tour de la Terre sans escale ne peut se passer de moteur. Il y a deux raisons à cela. L'avion doit d'abord lutter contre la résistance de l'air, qui participe ainsi à la combustion de carburant. Mais, même en l'absence de freinage, l'appareil s'écraserait au sol si son moteur tombait en panne: il se déplace trop lentement. Avec la navette spatiale, les choses sont différentes. Grâce à l'action des fusées, elle atteint l'altitude et la vitesse souhaitées. On peut alors couper le moteur. Si l'opération s'est déroulée correctement, la navette décrit la trajectoire voulue autour de notre planète. Comment expliquer cette différence de comportement?

Notons tout d'abord que, à l'altitude où évolue la navette, la résistance de l'air est presque inexistante. C'est du côté des vitesses respectives qu'il faut chercher la cause de l'anomalie apparente. Nous savons depuis Kepler et Newton ce qui se passe: la navette décrit une ellipse, une courbe qui se referme sur elle-même (fig. 3.1). Dans ces conditions, la trajectoire du véhicule spatial est incurvée en direction du sol, comme celle de n'importe quel projectile. Dans ce sens, la navette «tombe» à chaque instant, mais sa chute est très particulière: le véhicule spatial se déplace si rapidement qu'il se maintient à une altitude à peu près constante!

¹ On trouvera au chapitre 7 quelques mots sur les quakers.

Les objets contenus dans le véhicule spatial et tous ses occupants sont logés à la même enseigne. Aucun d'eux n'est équipé d'un moteur; ils sont soumis comme lui à l'attraction terrestre et ils décrivent la même trajectoire, ce qui se traduit par l'instauration du fameux état d'*apesanteur* à l'intérieur de la navette. Les astronautes et les objets flottent, ce qui crée l'illusion qu'ils ont perdu leur poids. Un astronaute sortant du véhicule subit le même sort. *En état d'apesanteur, la masse des corps ne joue aucun rôle.*

Imaginons une gerbe de minuscules astéroïdes passant rapidement au voisinage de la Terre sans pénétrer dans l'atmosphère qui ne peut ainsi les ralentir. Les uns sont de gros cailloux, les autres des grains de sable. Ils se déplacent sur la même trajectoire ouverte: leur vitesse est trop élevée pour que notre planète puisse les capturer. Leur bref passage dans notre voisinage suffit malgré tout à imprimer à leur trajectoire une déviation *qui ne dépend pas de la masse des astéroïdes, mais seulement de leur vitesse.*

Puisque la déviation est identique pour chacun des grains de sable, si léger soit-il, on peut se demander ce qui arriverait à un objet dont la masse, au lieu d'être très faible, serait strictement nulle. La question se pose lorsque la lumière vient à frôler un corps céleste car, selon les conceptions actuelles, elle est constituée d'unités indépendantes et dépourvues de masse, les *photons*, qui se déplacent à la vitesse de 300 000 km par seconde. Dans une telle situation, la relativité générale a une réponse dépourvue d'ambiguïté. La trajectoire de la lumière est déviée, qu'elle ait une masse ou non. Seule compte sa vitesse.

Il ne faudrait pas ramener la relativité générale à cette seule remarque. Elle est à la théorie de la gravitation de Newton ce que la relativité restreinte est à la mécanique classique. Face au problème de la pesanteur, les conceptions d'Einstein et celles de Newton diffèrent radicalement.

Pour Newton et ses successeurs, la Terre décrit une ellipse autour du Soleil parce que ces deux corps exercent l'un sur l'autre des forces égales. Alors que, pour la Terre, l'effet de cette attraction est bien visible, il est imperceptible pour le Soleil dont la masse est 330 000 fois plus grande que celle de notre planète. L'action de la Terre sur le Soleil a beau être très faible, elle est bien réelle: le mouvement du Soleil ne serait pas exactement le même si la Terre n'existait pas. Si peu que ce soit, chaque masse est affectée par la présence de toutes les autres, bien que cette interaction décroisse grandement avec la distance.

L'image qu'Einstein nous donne de l'attraction est bien différente. *Tout corps céleste modifie de proche en proche les propriétés de l'espace.* Là encore, l'effet diminue avec la distance. C'est cette déformation de l'espace autour de la masse solaire qui empêche la Terre et la lumière de suivre une trajectoire rectiligne. Notre planète décrit une ellipse autour du Soleil et un faisceau lumineux qui frôle le Soleil subit une faible déviation. Pour se faire une image simple de cette modification des propriétés de l'espace, on peut imaginer une grosse boule et quelques petites billes reposant sur une membrane de caoutchouc tendue horizontalement. Chacune d'elles déforme le support sur lequel elle repose et son mouvement est affecté par la dépression qui se creuse sous chacune des boules voisines (fig. 5.1). Comme le Soleil au milieu des planètes, c'est la grosse boule qui domine ses voisines, mais il

n'en reste pas moins que l'influence est réciproque. On pourrait croire qu'il n'y a qu'une querelle de mots entre Newton et Einstein. Ce n'est pas le cas, mais les mots, précisément, ne suffisent pas à nous en faire apprécier toute la différence. La devise que Platon avait inscrite sur le fronton de l'Académie trouve ici tout son sens: «Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre!».

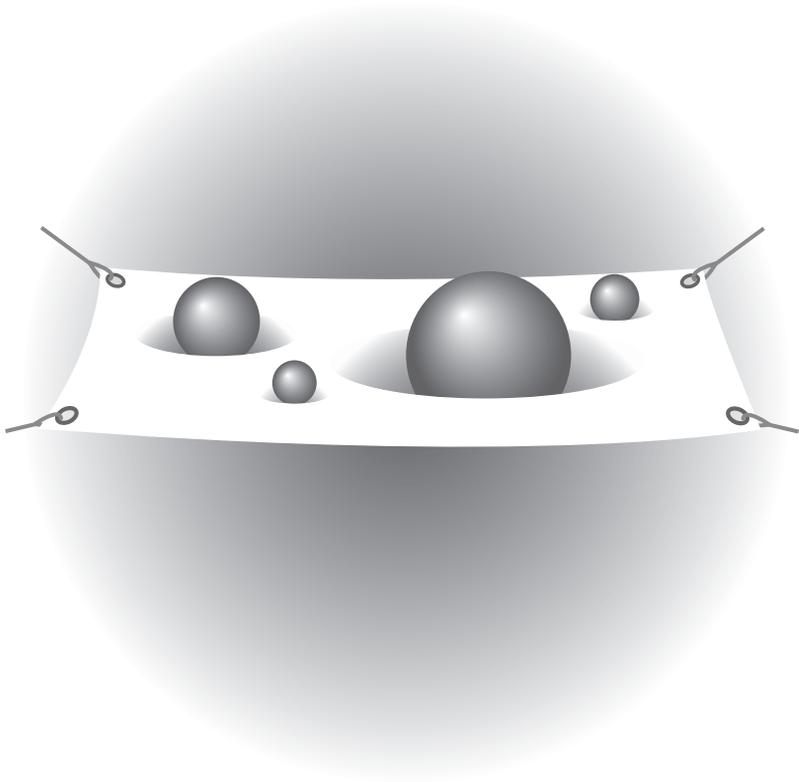


Fig. 5.1 Des billes de tailles diverses reposent sur une membrane de caoutchouc tendue horizontalement. Elles forment des cavités d'autant plus profondes que leurs masses sont plus grandes.

Qu'on se rassure, il n'est pas nécessaire d'acquérir une formation de mathématicien pour saisir le projet d'Eddington. Parmi les bijoux qui émaillent la théorie d'Einstein, il choisit la prédiction de la déviation de la lumière par un corps céleste. Elle lui paraît plus accessible à l'expérience que d'autres. Eddington décide de mesurer le déplacement de la position apparente d'une étoile quand, à nos yeux de Terriens, le Soleil passe à sa portée (fig. 5.2).

A vrai dire, si l'on sollicite quelque peu la théorie classique de Newton, celle-ci prévoit aussi une déviation, mais elle est moins importante que celle

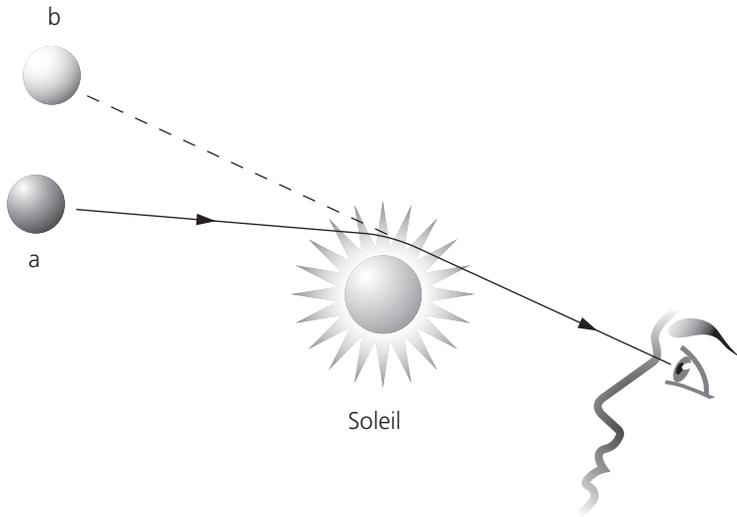


Fig. 5.2 Un faisceau de lumière rasant le bord du Soleil est légèrement dévié. Pour l'observateur terrestre, l'étoile qui est à l'origine du faisceau semble se trouver en b, et non en a, la place qu'elle retrouve une fois que le Soleil s'est éloigné. Pour que la déviation puisse être observée, il faut que le Soleil subisse une éclipse totale. La figure exagère notablement la déviation.

que l'on calcule à partir de la relativité générale. Personne ne s'était jamais donné la peine de la mesurer, ne serait-ce qu'à cause de la difficulté d'une telle observation. Le Soleil aveugle le malheureux astronome qui voudrait observer une étoile en plein jour et, qui plus est, au voisinage immédiat du Soleil. On ne peut y parvenir que durant une éclipse totale de Soleil. Or les circonstances favorisent Eddington. Une éclipse a lieu en 1919. Elle est totale en Afrique Occidentale et au Brésil. A cette date, heureusement pour toute l'Europe et pour la physique, la guerre est terminée, une expédition est organisée. Elle donne raison à Einstein contre Newton en ce qui concerne la valeur de l'angle de déviation du faisceau. En même temps que son auteur, la relativité générale devient célèbre du jour au lendemain.

Il serait parfaitement abusif de prétendre que la théorie de Newton est obsolète. Tout d'abord, son maniement est incomparablement plus simple. Le recours à celle d'Einstein ne se justifie qu'en cas d'écart numérique significatif entre les prédictions des deux théories, ce qui est rare. Les astronomes continuent d'utiliser la théorie de Newton pour prédire les éclipses de Lune et de Soleil ou le mouvement des planètes. Tout au plus doit-on recourir à la relativité générale afin d'expliquer une anomalie de l'orbite de Mercure qui constitue une énigme depuis des décennies. Einstein s'en charge lui-même en 1915.

L'histoire fait son entrée dans la physique

L'expédition de 1919 avait contribué à faire connaître la théorie de la relativité générale. En 1917 Einstein cherche à l'étendre à l'univers entier: il aborde la *cosmologie* théorique. Puisqu'un corps céleste comme le Soleil est capable de modifier autour de lui les *propriétés locales de l'espace*, il faut s'attendre à ce que la distribution de la matière et de l'énergie à grande échelle détermine les *propriétés globales de l'univers*. A cet effet, il faut connaître la moyenne de la densité de masse et d'énergie sur des régions immenses par rapport aux distances entre galaxies. Il faut aussi s'assurer que l'on a inventorié et mesuré correctement toutes les énergies et toutes les masses de l'univers! *Einstein part de l'hypothèse que la densité de masse-énergie est uniforme dans l'univers. Il admet encore que l'univers est immuable.* Il n'a ni début ni fin. Ces deux hypothèses semblent naturelles mais, mis à l'épreuve, l'univers refuse d'obéir aux équations d'Einstein!

Dans ces conditions, l'intéressé se retrouve devant un choix crucial. Ou bien il abandonne l'une de ses hypothèses, ou même les deux, ou bien il met en doute les formules dont il est parti. Einstein opte pour la deuxième solution et modifie ses équations pour arriver au résultat désiré. Il introduit un terme supplémentaire incluant une *constante cosmologique* et décrivant une sorte de force de répulsion inconnue jusqu'alors et n'ayant un effet qu'à des distances bien supérieures à la taille de la galaxie. Cette attitude est rarement payante, d'autant plus que, dans le cas d'Einstein, elle résulte d'une idée préconçue, bien naturelle au demeurant: l'univers ne peut avoir de commencement ni de fin. Mais les équations qui tentent de traduire la nature sont plus objectives que nous. Elles n'ont ni états d'âme ni préjugés. Avant de les modifier sous le prétexte qu'elles nous mènent là où nous ne voulions pas aller, il faut écouter attentivement ce qu'elles nous racontent. Reconnaissons toutefois que, dans les sciences de la nature, il n'existe pas de voie royale. Tous les chemins sont autorisés pourvu qu'ils nous mènent à destination.

Alors qu'Einstein s'est résolu à introduire une constante cosmologique dans ses équations, le mathématicien et physicien soviétique Alexander Friedmann (1888-1925) entre en jeu. En 1914, décidé à mettre ses compétences au service de son pays en guerre, il s'enrôle dans l'aviation russe où il a pour mission de calculer la trajectoire des bombes. A bord d'un bombardier, il vérifie l'exactitude de ses prédictions. En 1915, il écrit: «J'ai eu récemment la chance de vérifier mes idées durant un raid au-dessus de Przemysl; les bombes tombent presque comme la théorie le prévoit. Je pourrai en avoir une preuve définitive lors d'un prochain raid.» On est tenté de voir en lui une sorte de Dr. Folamour mais, dans une lettre écrite deux ans plus tard, il exprime ses regrets d'avoir participé activement à la guerre. Par la suite, les recherches de Friedmann portent notamment sur la météorologie. Comme lorsqu'il était aviateur, il met lui-même la main à la pâte. En juillet 1925, afin de faire des observations météorologiques et médicales, il atteint une hauteur de 7200 mètres, battant ainsi le record d'altitude en ballon. Un mois plus tard, hélas, il meurt du typhus.

Cependant, si l'histoire a conservé le nom de Friedmann, c'est pour de toutes autres raisons. En 1922, il reprend le travail d'Einstein tout en abandon-

nant l'hypothèse que l'univers est statique. Dans ce cas, la constante cosmologique est superflue [60]. Partant de l'hypothèse que les propriétés de l'univers sont les mêmes partout et dans toutes les directions², Friedmann démontre que *l'univers évolue nécessairement*. Ou il est en expansion, ou il se contracte. Mais que veut dire *expansion*, que veut dire *contraction* de l'univers?

L'évolution de l'univers

A l'époque où Einstein et Friedmann abordent la cosmologie, on ignore la structure de l'univers. Pour les astronomes du temps, la Galaxie est une immense accumulation d'étoiles que l'on ne distingue à l'œil nu que lorsqu'elles appartiennent à notre voisinage. Après le philosophe allemand Immanuel Kant (1724-1804), on murmure que notre Galaxie n'est pas isolée mais qu'elle est entourée d'«univers-îles» semblables à elle; mais il faudra encore attendre quelque temps pour avoir la confirmation que ces *galaxies* «extérieures» existent réellement et qu'elles se regroupent en *amas* et en *amas d'amas*. Peu importe. Considéré à très grande échelle, l'univers d'Einstein et de Friedmann est partout identique à lui-même. La présence des petites irrégularités locales que constituent les étoiles, les amas d'étoiles ou même les galaxies ne modifie en rien son homogénéité globale. En somme, l'univers est caractérisé par une densité moyenne de masse et d'énergie, et l'expansion ou la contraction éventuelles de l'univers se manifestent comme un changement de cette densité. La distance moyenne entre les corps célestes change progressivement. Non que la distance Terre-Soleil ou que la taille d'une galaxie se modifient. C'est à plus grande échelle que les distances varient.

Pour mieux comprendre le problème, on peut se représenter la boutique d'un horloger devenue trop étroite. Quand son propriétaire se décide à déménager, il choisit une échoppe plus vaste qui permette d'exposer les montres dans des armoires plus spacieuses. Une galaxie est à l'image de l'une de ces montres: sa taille n'augmente pas, même quand on lui réserve une place accrue. L'attraction gravifique, le mécanisme qui contrôle son fonctionnement, ne l'autorise pas.

On imagine aisément les difficultés qu'Einstein rencontre quand il cherche à déterminer la structure à grande échelle de l'univers. Puisque les galaxies s'attirent les unes les autres du fait des forces de gravitation, notre intuition nous souffle que leurs distances mutuelles ont tendance à diminuer. Mais ce serait aller contre les résultats de Friedmann qui admettent aussi bien une expansion qu'une contraction de l'univers. Nous marchons là en terrain miné. Après tout, les planètes ont beau être attirées par le Soleil, elles ne font que se maintenir en orbite autour de lui. Notre intuition est mise à plus rude épreuve encore quand nous appliquons les lois de la physique à l'univers entier. Heureusement que les mathématiques nous restent fidèles.

² Les mathématiciens et les physiciens disent dans ce cas que l'univers est *homogène* et *isotrope*.

Le physicien américain d'origine hongroise Eugene P. Wigner (1902-1995), prix Nobel de physique 1963, a parlé un jour de «la déraisonnable efficacité des mathématiques dans les sciences de la nature» [61]. Ce que l'esprit humain ne parvient plus à maîtriser avec la seule aide de sa logique et de son intuition, les mathématiques, la langue que l'esprit humain a inventée, peut y parvenir. Les équations qu'il a imaginées se comportent comme un outil traitant la logique avec une efficacité incomparable. Mais elles doivent être constamment maîtrisées car elles sont tout aussi dépourvues d'esprit critique que l'ordinateur.

Friedmann aborde le problème de la structure sans préjugé. Se servant des équations d'Einstein, il cherche à déterminer la structure de l'univers à partir de la valeur de la densité de masse-énergie sans recourir à la constante cosmologique. Les résultats qu'il obtient sont symbolisés à la figure 5.3. A un moment dans le passé, la densité de masse-énergie était infinie (les mathématiciens préfèrent parler de densité *singulière*). Cet événement s'identifie à la naissance de l'univers tel que le décrivent les équations. Par la suite, *c'est la diminution régulière de la densité qui traduit l'expansion de l'univers*.

Ce comportement peut se modifier. S'il veut connaître la nature globale de l'évolution, le cosmologiste doit déterminer un nombre dépendant à la fois de la densité moyenne actuelle et du temps écoulé depuis le début de l'expansion. Si ce nombre est inférieur à une certaine valeur critique, *l'univers est ouvert et l'expansion se poursuit indéfiniment tout en ralentissant*. S'il dépasse cette valeur, *l'univers est fermé et l'expansion initiale laisse la place à une contraction ramenant la densité à une nouvelle valeur singulière*. La courbe pointillée de la figure 5.3 correspond à une hypothétique *accélération de l'univers*. C'est là une situation qui ne peut exister quand les forces gravifiques constituent le seul moteur de l'évolution: car elles ne peuvent que ralentir les galaxies dans leur mouvement d'expansion.

Du point de vue de la cosmologie scientifique, *on ne peut parler que des événements qui se sont déroulés après la singularité initiale*. Quand on remonte dans le passé, il vient un moment où nous nous heurtons au mur de notre ignorance, un mur infranchissable qui, selon notre mesure conventionnelle du temps, n'est séparé de la singularité que d'une infime fraction de seconde.

Univers ouvert, univers fermé

Un univers ouvert est un univers dont le volume est infini. Si notre esprit peine à le concevoir, il est encore plus embarrassé quand il s'agit d'appréhender *un univers fermé* qui, bien qu'il n'ait pas de limites, *possède un volume fini*.

Imaginons des êtres doués d'intelligence vivant dans un univers différent du nôtre. Ils sont incapables de quitter la surface sur laquelle ils se déplacent car ils sont parfaitement plats comme le sont les animaux et les plantes qui peuplent le même univers. Leurs organes des sens et leur cerveau leur interdisent d'appréhender toute réalité inscrite en dehors de la surface sur laquelle ils vivent. Ils ne peuvent imaginer l'aéronautique ou l'exploration sous-marine.

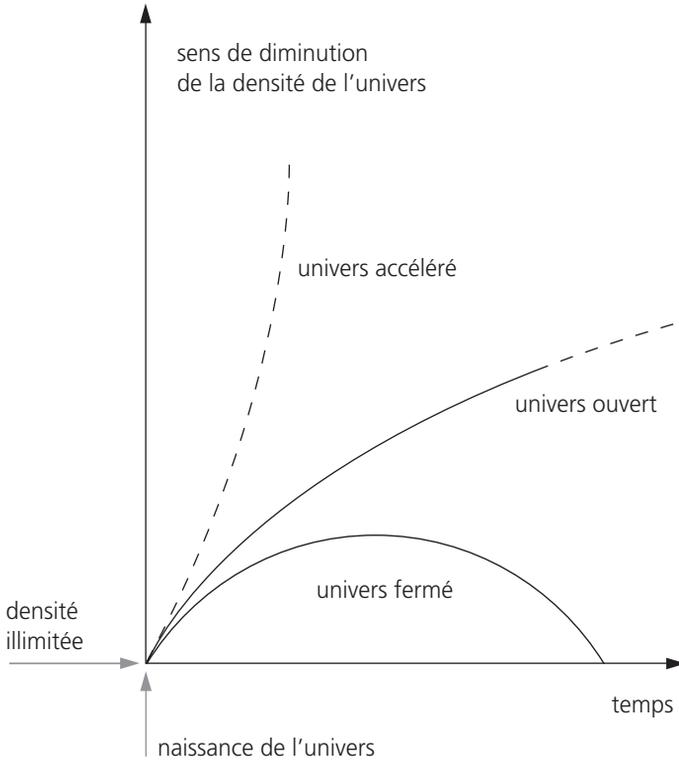


Fig. 5.3 Variation schématique de la densité moyenne de l'univers en fonction du temps. Les deux courbes continues schématisent l'évolution d'un univers fermé, dont le volume est fini, et celle d'un univers ouvert, dont le volume est illimité. Après s'être dilaté, l'univers fermé voit sa densité se remettre à croître. La densité de l'univers ouvert, quant à elle, ne fait que diminuer au cours de son évolution. Ces deux types d'évolution s'obtiennent à partir des équations de la théorie de la relativité générale dans le cas où la constante cosmologique est nulle. La courbe pointillée représente une expansion qui serait accélérée.

Pour eux, la notion de volume n'a pas de sens: seules existent les lignes et les surfaces. Pendant des millénaires, ils ont vécu comme nos ancêtres avec la conviction que leur univers a la forme d'un disque. Certains d'entre eux sont convaincus qu'ils habitent une surface plane s'étendant indéfiniment dans toutes les directions.

Un jour, un habitant de ce monde étrange part à l'aventure dans l'ouest lointain. Lorsqu'il s'aperçoit qu'il rentre chez lui par l'est, il ne peut cacher sa stupéfaction. Quand il affirme qu'il n'a cessé de se diriger vers l'occident, il déclenche l'hilarité et les sarcasmes. L'étonnement initial passé et tout soupçon de fraude levé, les mathématiciens interviennent: «Depuis longtemps, nous avons étudié la géométrie de ces surfaces étranges qui échappent à notre intuition. L'aventure de notre explorateur démontre que nous habitons

une sphère. Elle est illimitée au sens propre du terme: lorsque l'on s'y déplace, on ne rencontre aucune barrière infranchissable. Et pourtant son aire est finie, et les chemins s'y referment sur eux-mêmes, aussi incroyable que cela puisse paraître!».

Pour nous autres Terriens ou, si l'on préfère, Galactiques, la notion de sphère est familière. Nous vivons dans un monde à trois dimensions, ce qui nous permet de quitter la surface de la Terre pour parcourir les airs ou plonger dans les océans. Nous pouvons même atteindre la Lune. Mais quand Friedmann nous parle d'un univers fermé, il désigne un espace illimité dont le volume est néanmoins borné; nous sommes déconcertés comme l'étaient les habitants du pays plat assistant au retour de leur voyageur. Quel a été le choix de la nature? Vivons-nous dans un univers fermé ou dans un univers ouvert? Nous l'ignorons encore mais, selon nos connaissances actuelles, la cote de l'univers fermé n'est pas très élevée.

Dans un premier temps, Einstein exprime son scepticisme à l'égard des conclusions de Friedmann. Il finit par reconnaître son erreur et à lui rendre justice. *L'histoire est entrée par la grande porte en physique*: l'univers, la scène où se déroulent les phénomènes physiques, se modifie au cours du temps. En 1922, la conception de Friedmann ne constitue encore qu'une vision grandiose de l'univers. Elle va bientôt recevoir le support de l'astronomie.

La locomotive, le wagon et les trompettes

La vérification de la pertinence des vues de Friedmann commence par un événement dont le lien avec l'astronomie est d'abord trompeur. Il s'agit de la découverte de *l'effet Doppler* qui porte le nom d'un physicien autrichien, Johann Christiaan Doppler (1803-1853), professeur à l'Académie Technique de Prague.

Pour un œil exercé, les étoiles présentent des colorations variées. En 1842, Doppler affirme que c'est dans leurs mouvements individuels qu'il faut chercher l'origine du phénomène. Il fait erreur. Pourtant l'idée de Doppler est correcte dans son principe. L'effet qu'il a découvert existe en acoustique. Nous avons l'impression que la hauteur du son émis par une trompette s'élève quand l'instrument s'approche – le son paraît plus aigu – et s'abaisse quand il s'éloigne – il devient plus grave. Pour comprendre le phénomène, il faut savoir que la *hauteur d'un son s'élève quand la fréquence d'émission augmente*. La relation entre hauteur et fréquence est la contrepartie acoustique de la corrélation optique entre couleur et fréquence lumineuse.

Imaginons un chevalier du Moyen Age quittant son château pour une destination lointaine, peut-être une croisade. Le premier juin au matin, il se sépare de son épouse en pleurs et lui promet un message quotidien. Le soir même, à peine descendu de cheval, il rédige une lettre pour la dame de son cœur. Le lendemain matin 2 juin, au moment du départ, il confie sa missive à un cavalier de son escorte. Le messenger doit la porter à bride abattue au château où on l'attend le cœur battant. Il y arrive le 2 juin au soir. Au même instant, le chevalier parvient au terme de la seconde étape. Comme la veille, il rédige un message qu'il remet à un second cavalier. Celui-ci, ayant deux

étapes à franchir, ne rejoindra l'épouse éplorée que le 4 juin au soir. Les choses continuent ainsi durant tout le voyage et l'on constate que, si la «fréquence d'émission» correspond à une lettre par jour, la «fréquence de réception» se réduit à une lettre tous les deux jours (fig. 5.4).

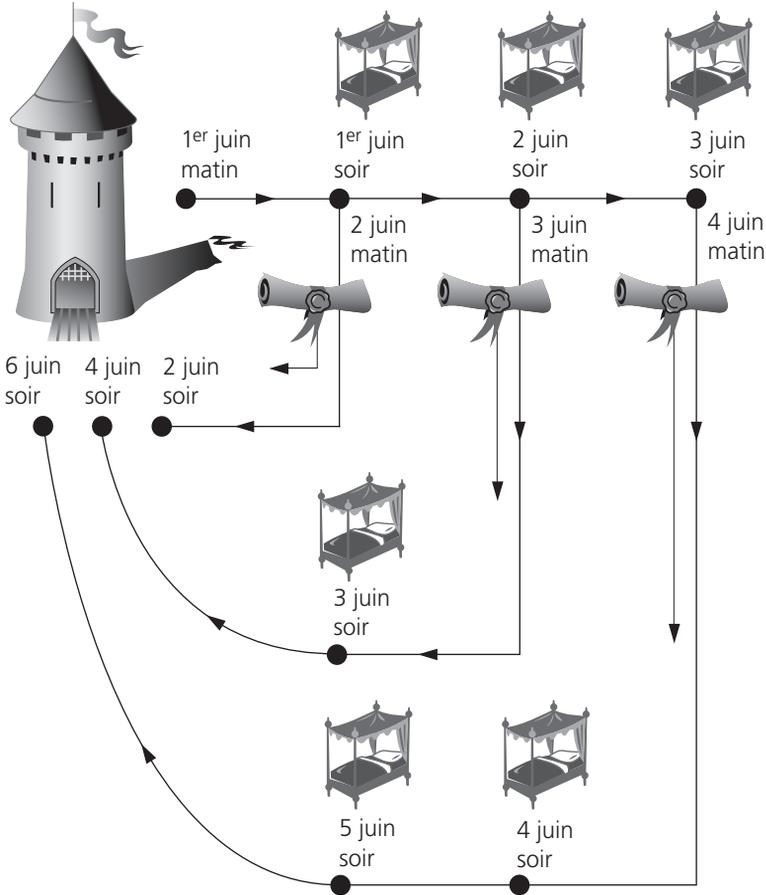


Fig. 5.4 Illustration de l'effet Doppler. Un chevalier quitte son château le premier juin au matin. Chaque soir, à l'étape, il rédige un message à l'intention de la dame de son cœur qui se languit en la demeure qu'il a dû quitter. Tous les matins, il envoie un cavalier de sa suite porter le message à sa belle. Du fait de la distance sans cesse accrue qui la sépare de son preux chevalier, elle ne reçoit ses messages que tous les deux jours: à cause du mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur, la fréquence de réception (un message tous les deux jours) diffère de la fréquence d'émission (une lettre quotidienne).

Si l'on revient à la trompette, la pression de l'air vibre avec une fréquence bien déterminée et les oscillations se propagent dans l'air ou dans tout autre milieu matériel. Quand l'instrument s'éloigne de nous, notre oreille perçoit une fréquence inférieure à la fréquence d'émission. Nous sommes dans la

même situation que la châtelaine restée au logis. Quand la trompette se rapproche, la fréquence perçue est plus haute. On parle d'*effet Doppler acoustique*. En 1845, un météorologue hollandais du nom de Christophorus Buys-Ballot (1817-1890) démontre son existence en utilisant une locomotive tirant un wagon ouvert où sont installés quelques joueurs de trompette. Les auditeurs placés le long des rails notent que la hauteur des sons perçus change selon que le convoi se rapproche ou s'éloigne. Chacun de nous peut faire la même remarque quand une ambulance le dépasse en hurlant de toute la puissance de sa sirène.

L'*effet Doppler optique* est analogue sans être identique: les ondes lumineuses se propagent dans le vide aussi bien que dans l'air. Dans la bande du visible, c'est la couleur qui varie avec la fréquence. Mais le rapport entre la vitesse relative des étoiles – quelques dizaines ou centaines de kilomètres par seconde – et celle de la lumière est dérisoire, si bien que les déplacements stellaires n'entraînent qu'un effet imperceptible. La richesse de la coloration des étoiles ne lui doit rien. Son origine doit être cherchée ailleurs. Lorsqu'un métal est progressivement chauffé, il devient lumineux et sa couleur se modifie à mesure que la température s'élève: c'est là qu'il faut chercher l'origine de la coloration des étoiles. Leur couleur nous renseigne sur la température qui règne en surface.

Et pourtant l'effet Doppler est observable dans le monde des étoiles, à condition de le chercher au bon endroit. C'est l'*arc-en-ciel* qui va nous guider dans cette recherche.

La lumière paraît blanche à nos yeux quand elle résulte de la superposition de toutes les ondes dont les fréquences appartiennent à la bande du visible. Lorsqu'on isole ses composantes, chacune d'elles présente une des couleurs de l'arc-en-ciel. Pour réaliser la décomposition de la lumière, la nature se sert des gouttes d'eau dans lesquelles se mire le Soleil. Le physicien utilise un prisme cristallin.

Le *spectroscope* est un instrument optique monté autour d'un prisme. Il permet la décomposition très fine d'un faisceau de lumière blanche, dévoilant ainsi son spectre. Lorsque l'on étudie la lumière du Soleil ou celle des étoiles au travers d'un spectroscope, on constate que leurs spectres respectifs sont coupés à certaines fréquences par des raies lumineuses ou sombres. En laboratoire, un faisceau de lumière présente les mêmes caractéristiques. Les raies lumineuses nous révèlent la composition chimique de la source, et les raies sombres celle d'un gaz froid traversé par le faisceau. Or, dans le Soleil comme dans les étoiles, nous trouvons les mêmes éléments que sur Terre. Les raies sombres proviennent notamment du passage de la lumière que l'astre émet au travers de son atmosphère, moins chaude que sa surface.

La chimie et la physique du Soleil et des étoiles sont les mêmes que sur Terre. L'hélium avait été observé dans le Soleil avant que l'on ne connût sa présence ici-bas³. Nous le savons grâce à la *spectroscopie*, qui nous informe également sur la vitesse de l'astre observé. *A une raie spectroscopique correspond une fréquence suffisamment précise pour que l'effet Doppler la*

³ Du grec *helios*, qui signifie «soleil».

déplace de façon significative et mesurable: la première observation du décalage d'une raie stellaire remonte à 1868. Néanmoins, pour observer des déplacements importants, on se tourne vers des objets célestes plus lointains que les étoiles de notre Galaxie.

La boxe n'est pas un sport dangereux

L'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) est sans doute le seul savant à avoir défié sur le ring un champion du monde de boxe. Lors de ses études de mathématiques et d'astronomie à Chicago, il ne se fait pas seulement remarquer pour ses capacités dans ces deux disciplines, mais aussi pour son goût pour le sport. Novikov et Sharov affirment que le père de Hubble lui avait interdit de pratiquer le football ou le base-ball, sports qu'il jugeait dangereux. En fils obéissant, il y renonce et se tourne vers la boxe. Avec succès, semble-t-il, puisqu'un organisateur de combats lui propose de devenir professionnel dans la catégorie des poids lourds [62]. Mais Hubble préfère profiter d'une bourse d'études pour se rendre à Oxford où, sans délaisser le sport, il abandonne quelque temps l'astronomie pour le droit. Au cours d'une rencontre «amicale», il boxe contre Carpentier [63], le champion du monde qui fait partie du Panthéon sportif de la France. En 1914, Hubble retourne aux Etats-Unis et y entreprend une thèse en astronomie. Il s'intéresse aux *nébuleuses*, ces objets étendus dont la nature fait l'objet d'une polémique. Sont-elles réellement des «univers-îles», selon la suggestion de Kant, ou ont-elles un caractère plus local? Dans ce cas, ce sont des formations gazeuses situées à l'intérieur de notre Galaxie.

Les qualités de Hubble attirent l'attention. L'astronome Gregory Hale lui propose une situation au Mont Wilson, près de Los Angeles, où se construit un gigantesque télescope. Or, en 1917, les Etats-Unis viennent au secours des Alliés, entrant ainsi de plain-pied dans la Première Guerre mondiale. Hubble est intéressé par la proposition de Hale, mais il répond en substance: «Un moment s'il vous plaît, je vais d'abord donner un coup de main aux Anglais. Dès que je serai démobilisé, je viendrai chez vous.» Hubble est fasciné par l'Angleterre que ses ancêtres avaient quittée au XVII^e siècle. Il ne peut faire moins que de voler à son secours, d'autant que, en 1917, la situation des Alliés est peu brillante. Finalement, Hubble n'aura pas l'occasion de leur rendre un grand service. Engagé volontaire, il parvient au grade de major du Corps expéditionnaire américain en France sans avoir participé à de grandes batailles [62]. A l'automne 1919, à l'âge de trente ans, il est enfin démobilisé. Il ne lui reste qu'à tenir sa promesse et à rejoindre Hale au Mont Wilson. Sa carrière commence.

Hubble revient à l'étude de ces nébuleuses dont il soupçonne que ce sont des univers-îles analogues à celui que nous habitons. En 1924, il démontre que la *Nébuleuse d'Andromède*, visible à l'œil nu, est une *galaxie*⁴, nom que

⁴ On réserve la majuscule à la galaxie à laquelle appartient le système solaire, la minuscule désignant les univers-îles distincts du nôtre.

nous donnons aujourd'hui à ces mondes semblables au nôtre. Alors que le diamètre de la Galaxie est de l'ordre de cent mille années-lumière, Hubble situe Andromède à une distance neuf fois supérieure, ce qui en fait une galaxie indépendante de la nôtre. Or la mesure de Hubble est encore imprécise. La technique qu'il utilise consiste à chercher dans chaque galaxie des «bougies étalons», autrement dit des catégories d'étoiles bien reconnaissables et dont l'éclat intrinsèque est connu. C'est plus vite dit que fait, si bien que les distances mesurées par Hubble ont dû être revues à la hausse. Aujourd'hui, nous nous servons d'étalons stellaires très sûrs, une catégorie bien reconnaissable de *supernovae*⁵. Ces étoiles explosives voient leur luminosité passer au bout de trois semaines par un maximum puis diminuer régulièrement. A l'apogée du cataclysme, elles sont aussi lumineuses que la galaxie tout entière à laquelle elles appartiennent. La comparaison de leur éclat apparent avec leur éclat intrinsèque nous renseigne sur leur distance. Seul inconvénient, les *supernovae* de ce type sont rares. En moyenne, dans une galaxie, on n'en compte que trois par millénaire. Ces améliorations de la technique de mesure des distances nous ont contraints à revoir les distances des galaxies proches ou lointaines: la Nébuleuse d'Andromède s'est retrouvée à deux millions d'années-lumière.

La plus grande découverte de Hubble est encore à venir. En 1912 déjà, la vitesse de quelques galaxies avait été mesurée grâce au décalage de certaines raies d'absorption. Hubble va plus loin. Ayant étudié systématiquement de nombreuses galaxies, il vérifie entre 1929 et 1931 la validité d'une règle que l'on pressentait et qui n'est observée qu'en moyenne: *plus une galaxie est lointaine, plus ses raies sont déplacées vers le rouge*.

Dans le langage des astronomes, une raie est déplacée vers le rouge quand la fréquence mesurée lors de la réception est inférieure à la fréquence d'émission. Si la fréquence de réception est supérieure, on parle de *décalage vers le bleu*. Le déplacement des raies ne prend un sens que si l'on est convaincu de l'article de foi des astrophysiciens: *les lois de la physique et de la chimie ne changent ni avec le temps ni avec la distance*. Si l'observation d'une galaxie met en évidence un ensemble de raies dont la structure est identique à celle d'un groupe connu sur Terre, tout en étant systématiquement décalé vers le rouge, on admet que ces deux ensembles de raies sont dus au même élément.

Un décalage vers le rouge augmentant avec la distance de la galaxie émettrice contient un message clair. *Les galaxies s'éloignent de nous d'autant plus vite qu'elles sont plus lointaines*. Les observations de Hubble ne permettent pas de trancher entre un univers ouvert et un univers fermé, mais elles démontrent au moins que nous sommes en présence d'une phase d'expansion de l'univers. Les galaxies s'éloignent les unes des autres comme des points marqués sur une baudruche que l'on gonfle. Aucune d'elles n'est privilégiée: l'univers est une «sphère dont la circonférence est partout et le centre nulle part» (fig. 5.5). La découverte de Hubble peut être considérée comme une vérification de la cosmologie de Friedmann.

⁵ Supernovae est le pluriel latin de supernova, dont il sera question plus bas.

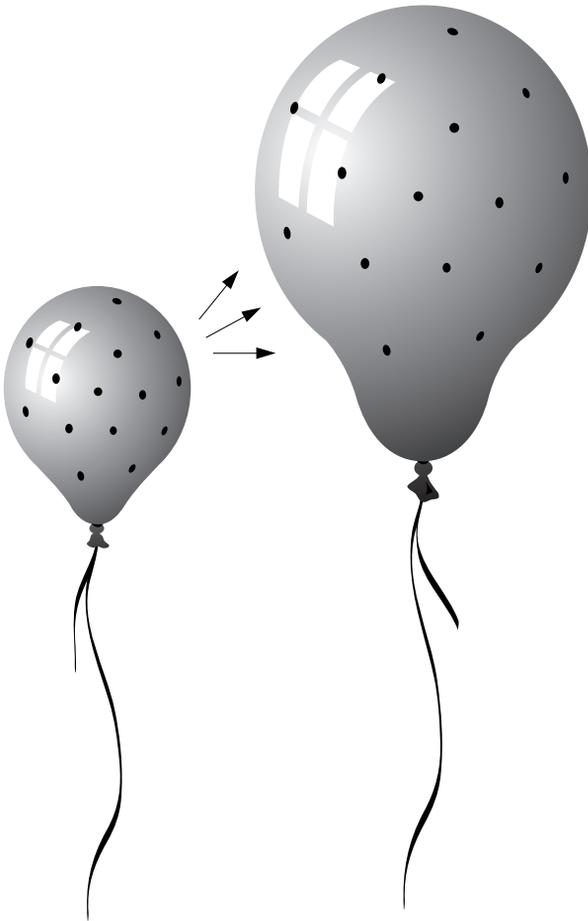


Fig. 5.5 Lorsque l'on gonfle une baudruche dont la surface s'orne de points équidistants, chacun des points s'éloigne de ses voisins en proportion de leur distance initiale. C'est là une image simpliste de l'expansion de l'univers, chaque point dessiné sur la baudruche symbolisant une galaxie qui s'inscrit dans une portion de notre espace.

Si un enfant lance une balle directement au-dessus de sa tête, elle s'élève un instant puis retombe bien vite. Plus la vitesse initiale augmente, plus la hauteur atteinte est grande. Si l'on voulait que le projectile s'éloigne indéfiniment de la Terre, il faudrait lui communiquer ce que l'on appelle la *vitesse de libération*, 11,2 kilomètres par seconde, ou encore 40 000 kilomètres à l'heure. Et ce serait encore insuffisant. Cette évaluation ignore le frottement dû à l'atmosphère qui ralentit le projectile quand il ne le fait pas fondre! Lorsque l'on place un véhicule spatial en orbite terrestre, les choses se passent différemment. Au décollage, grâce à ses moteurs, la fusée accélère progressivement. Quand la pleine vitesse est atteinte, l'altitude est suffisamment grande pour que la pression de l'air et le réchauffement résultant deviennent négligeables.

Si, comme l'imagine Jules Verne dans *Autour de la Lune*, on remplaçait la fusée par un canon et le véhicule spatial par un boulet habité, l'ampleur de l'explosion initiale serait effrayante et le choc anéantirait les habitants du boulet.

Cette image suggère que l'expansion de l'univers est le résultat d'un cataclysme auquel les mots sont incapables de rendre justice. L'univers dans ses débuts n'évoque nullement la douceur et la sérénité du Jardin d'Eden. Les chiffres sont mieux à même de décrire les faits, mais ils ne sauraient parler à notre intuition. Cette explosion initiale n'est autre que le *Big Bang*, l'équivalent de la singularité initiale de Friedmann.

Si l'on projetait à l'envers le film retraçant l'évolution de l'univers, les galaxies se rapprocheraient et la densité moyenne de masse-énergie augmenterait peu à peu. Le décalage vers le rouge nous donne une information approximative de l'*âge de l'univers*: sa naissance correspond au moment où la densité était infinie. Au début des années 1930, les 2 milliards d'années que Hubble attribue à l'univers constituent un âge inférieur à celui que livrent les premières tentatives de datation de la Terre, ce qui jette un certain discrédit sur les débuts de la cosmologie d'observation. La contradiction disparaîtra plus tard.

Selon la conception de Friedmann, l'univers commence par être concentré en un point. Il s'agit là d'une simplification mathématique qui suggère que, en retraçant l'histoire de l'univers, on peut remonter le cours du temps très près du Big Bang, mais sans l'atteindre. Il est exclu de revenir au coup de feu du starter! Quant à ce qui se passait «avant le Big Bang», c'est, pour autant que nous le sachions aujourd'hui, une expression aussi dénuée de sens que de demander ce que l'on trouve au Nord du pôle Nord [64]. Quand, remontant dans le temps, nous nous rapprochons du Big Bang, il vient un moment où les notions les plus essentielles que sont l'espace et le temps changent de sens ou perdent toute signification.

L'expansion de l'univers est la première grande découverte figurant au chapitre de la cosmologie. Deux autres documents doivent encore être versés au dossier.

L'avenir dans les lignes de la main

En 1928, alors que Houtermans séjourne à Göttingen, il fit la connaissance d'un jeune Russe aussi original que lui, Georges Gamov (1904-1968), qui deviendra théoricien de la physique nucléaire et de l'astrophysique, et un vulgarisateur de grand talent. Dans le domaine de la radioactivité alpha, Gamov venait de faire une découverte dont on aura l'occasion de reparler plus loin. Houtermans et lui étaient faits pour s'entendre. Ils étaient aussi bohèmes, anticonformistes et insoucians l'un que l'autre [51].

Gamov séjourne encore une année à Cambridge auprès du Crocodile. C'est le physicien russe Piotr Kapitza (1894-1984), prix Nobel 1978, qui avait donné ce surnom à Rutherford. Dans ses mémoires, Gamov explique que, dans les contes de fées russes, le crocodile n'est pas un reptile terrifiant mais qu'il représente le symbole d'une robuste puissance [65]. Il revient à Copenhague puis, en 1931, à Leningrad. Les amis qu'il retrouve en URSS sont

ahuris de voir qu'il se jette dans la gueule de l'ours soviétique. Dans les années 1920, les dirigeants soviétiques avaient tout fait pour garder le contact avec la science occidentale, mais cette ère de liberté surveillée ne dure pas. Staline crée le concept de «science prolétarienne» qui s'oppose à la «science capitaliste». La première doit se soumettre à la position officielle du matérialisme dialectique. Hitler fera de même un peu plus tard en répudiant la «science juive» au profit de la «science allemande». Le commentaire de Gamov est éloquent: «A quelques exceptions près, les philosophes connaissent mal la science. Ils ne la comprennent pas, ce qui est parfaitement naturel puisqu'elle ne fait pas partie de leurs propres spécialités [...]. Mais si, dans les pays libres, les philosophes sont incapables de nuire, ils constituent un vrai danger dans les dictatures en s'opposant au développement de la science.» [65] Il est difficile de reprocher ces propos à Gamov. Il était tenté d'étendre à la communauté des philosophes tout entière les expériences malheureuses qu'il avait faites au contact des philosophes marxistes, idéologues inféodés à une dictature. Il cite notamment le nom du camarade Gessen qui «démontre» la fausseté de la relativité à partir des principes de base du marxisme. Landau et Gamov se moquent de lui à gorge déployée. Une telle attitude est dangereuse. En 1938, Landau passera une année dans les geôles de Staline. Il devra au courage de l'un de ses collègues d'en ressortir vivant.

Pour Gamov, les choses se gâtent peu à peu. Quand il demande son passeport pour assister au premier congrès de physique nucléaire qui va se dérouler à Rome, tous les prétextes sont bons pour retarder son départ. Il passe suffisamment de temps dans les couloirs du bureau des passeports pour y rencontrer Lyubov, une physicienne comme lui. Selon Gamov, ils décident de se marier afin de vérifier les lois de la génétique [65]. Sur chacune des paumes de sa future femme, les trois lignes de la main ne se coupent pas, une caractéristique très rare. Comme ses propres paumes présentent la même anomalie, Gamov ne voit qu'un moyen de vérifier si la forme des lignes de la main obéissent aux lois de la génétique: épouser Lyubov. En 1935, lorsque la sage-femme présente son fils nouveau-né à Gamov, elle le voit qui se précipite sur les paumes du nouveau-né. Il vérifie que les lignes ne se coupent pas: l'anomalie palmaire est génétique...

Excédé par le régime stalinien, le couple décide de déménager à la cloche de bois en franchissant incognito la frontière de l'URSS. Reste à choisir le point de passage. Leur choix se porte sur la Mer Noire. Ils se procurent une sorte de kayak et mettent cap au sud en direction de la Turquie. Les choses se passent bien lors de la première journée, puis un vent violent se lève. Pendant que George rame avec peine, Lyubov écope. Les choses ne tardent pas à se gâter et le bateau est rejeté sur la côte soviétique où les jeunes mariés sont recueillis par des pêcheurs. Heureusement, les autorités soviétiques acceptent les yeux fermés l'explication que les Gamov donnent de leur expédition: partis pour une partie de kayak, ils ont perdu le contrôle de leur embarcation et n'ont dû qu'à la chance de s'échouer plutôt que de sombrer.

Les Gamov ne se découragent pas. Ils examinent d'abord la possibilité de franchir à ski la frontière finnoise, un plan qui s'avère impraticable. Ils décident alors de se rendre dans une station de biologie marine près de Mourmansk, sur les bords de la Mer de Barents. Ils espèrent emprunter ou voler un bateau

à moteur pour aborder la côte norvégienne. Mais, arrivés sur place, ils découvrent que la marine de guerre soviétique est en train d'y installer une base de sous-marins. La présence d'embarcations civiles est interdite et la station biologique fermée. Il faut renoncer une fois de plus.

Surprise! De retour chez lui, à Leningrad, Gamov reçoit une lettre lui enjoignant de se rendre à Moscou pour y retirer son passeport. Il est invité par le gouvernement soviétique à se rendre à Bruxelles pour assister au Congrès Solvay 1933. A cette époque, ces congrès regroupent les personnalités les plus en vue du monde scientifique, et notamment nombre de celles que l'on a rencontrées au long de ces lignes. Les chercheurs peu connus n'y ont pas accès.

Bien entendu, pour les autorités soviétiques, il n'est pas question que Lyubov accompagne son mari. Gamov remue ciel et terre et parvient à rencontrer Vyacheslav Molotov, le président de l'URSS, qui se laisse convaincre. Madame peut suivre son mari à Bruxelles. Décidément, il vaut mieux s'adresser au Bon Dieu qu'à ses saints. Quelques jours après son entrevue avec Molotov, Gamov reçoit un coup de téléphone d'un officiel qui insiste pour qu'il aille retirer son passeport. Quant à celui de Lyubov, il n'en est plus question. Les saints ont corrigé la coupable indulgence du Bon Dieu. Jouant sa liberté et sa vie, Gamov déclare que, dans ces conditions, il refuse d'aller à Bruxelles. Le lendemain et le surlendemain, la scène se répète. Quand le téléphone sonne, Gamov demande si le second passeport est prêt et, à chaque fois, il reçoit une réponse négative. Et le quatrième jour, miracle! On l'informe que les deux passeports sont prêts:

«A la septième fois, les murailles tombèrent.» [66]

Gamov peut quitter l'URSS en compagnie de sa femme. Il n'y reviendra jamais. Et jamais il ne comprendra comment il a obtenu le second passeport. Après avoir séjourné quelque temps à Paris et Copenhague, il est nommé professeur à Washington. Dès 1938, il se consacre à l'application de la physique nucléaire à l'astrophysique et à la cosmologie. En parallèle, il devient un maître de la vulgarisation scientifique en créant un personnage de fiction, Mr. Tomkins. Employé de banque, *Mr. Tomkins* assiste à la conférence d'un professeur de physique pourvu, comme il se doit, d'une belle barbe blanche. Les nuits qui suivent ces exposés, Mr. Tomkins rêve qu'il se trouve au pays de la relativité ou dans celui de l'atome. Comme Alice, il troque sa vie d'employé de banque contre celle d'un aventurier parcourant le monde merveilleux de la physique moderne.

Avant d'aller plus loin, il convient de revenir sur une importante découverte faite en 1928 lorsque Gamov se trouve à Göttingen. Elle concerne certaines caractéristiques de la radioactivité alpha.

La radioactivité possède-t-elle un inverse?

A Göttingen, dans une université qui constitue un des hauts lieux de la physique quantique, Gamov se demande dans quelle mesure cette nouvelle discipline peut expliquer certaines propriétés du noyau. Le jour où il s'installe,

Gamov se rend à la bibliothèque pour y glaner une inspiration. Il tombe sur un article de Rutherford datant de 1927 et narrant une expérience de diffusion analogue à celle qui avait permis la découverte du noyau, à cela près que la cible des particules alpha n'est plus l'or, mais l'uranium 238. Comme ce métal est radioactif, Rutherford se demande ce qui va se passer s'il le bombarde avec des particules alpha deux fois plus rapides que celles qu'émet l'uranium lui-même. Or le résultat est inattendu: les particules alpha incidentes ne pénètrent pas dans les noyaux d'uranium. Elles se contentent de rebondir comme si elles frappaient des noyaux d'or. Pour expliquer ce paradoxe, Gamov fait appel à la physique quantique.

Pour le sauteur en hauteur, la pesanteur oppose une barrière invisible à toute tentative de s'élever à plus de 2 mètres 50 du sol. Les champions ont eu beau multiplier les entraînements et soigner leur alimentation, ils ne sont *jamaïs* parvenus à franchir une barre placée à deux mètres cinquante au dessus du sol⁶.

Revenons sur l'expérience de Rutherford. Les particules alpha avec lesquelles il bombarde les noyaux d'uranium sont dans la même situation que les sauteurs en hauteur, à cela près que leur approche n'est pas ralentie par la pesanteur, mais bien par la force répulsive que la charge positive du noyau exerce sur celle que portent les particules alpha. Au départ du saut, le sauteur ne s'élève pas assez rapidement pour franchir une barre très haute. De manière analogue, dans l'expérience de Rutherford, la vitesse des particules n'est pas suffisante pour qu'elles puissent surmonter la barrière que leur oppose la force de répulsion. Elles se comportent d'une manière que la physique classique explique parfaitement.

Mais le monde microscopique n'obéit pas aux mêmes règles que le nôtre. Ses règles sont de nature probabiliste et c'est la mécanique quantique plutôt que la mécanique classique qui régit son comportement. Il se trouve que l'écart entre les deux mécaniques est plus spectaculaire pour les particules alpha qui fuient le noyau que pour celles qui le bombardent.

Chacun des constituants du noyau subit de la part de ses homologues une force attractive très intense qui, à l'intérieur du noyau, domine la répulsion électrostatique. A faible distance (10^{-15} à 10^{-14} m, la taille du noyau), l'attraction l'emporte largement, sans quoi aucun noyau ne pourrait exister. Cette force constitue une barrière qui s'oppose à l'évasion des particules alpha composant le noyau⁷. Mais il se trouve que la physique quantique exige qu'une particule confinée dans un volume restreint soit constamment agitée. Pour simplifier, on peut se représenter le noyau d'uranium comme une prison peuplée de particules alpha en mouvement. Sans trêve, elles se lancent contre la paroi de leur cage, sans trêve, elles sont renvoyées à l'intérieur de leur abri. Sans trêve... A moins que le hasard ne leur permette de bénéficier d'une «libération anticipée» et de se retrouver «à l'air libre». Puisque la demi-vie de

⁶ Le record du monde de saut en hauteur masculin est détenu depuis 1993 par le Cubain Javier Sotomayor. Il est de 2 mètres 45.

⁷ Par souci de simplification, on admet que les particules alpha sont déjà formées à l'intérieur du noyau.

l'uranium 238 s'élève à 4,51 milliards d'années, la rareté de cet événement n'a pas besoin d'être soulignée.

Quand une particule alpha franchit la barrière, on dit qu'il y a *effet tunnel*, une image trompeuse car elle implique qu'un passage s'est provisoirement «ouvert» dans une «paroi». Mais où sont la paroi et la porte qui se serait ouverte? Ce phénomène est d'autant plus rare que la barrière à franchir est «haute». Des considérations de ce genre permettent d'expliquer la différence entre les demi-vies qui caractérisent les différents isotopes.

A la fin d'un exposé de Gamov sur ce sujet, le physicien britannique Ralph Fowler conclut en disant: «Toute personne présente dans cette enceinte a une chance non nulle de la quitter sans en ouvrir la porte ni la fenêtre.» [51] A vrai dire, ces événements ne sont courants que dans le monde microscopique. Même pour un virus, la chance de jouer au passe-muraille est complètement négligeable. Pour un être humain, malgré Fowler, on peut la considérer comme strictement nulle. Il est inutile de s'en servir comme alibi lors d'un procès criminel.

Il ne suffit pas en physique de donner une explication plausible à un phénomène. Pour que les physiciens acceptent la théorie de Gamov, il faut qu'elle passe le test de la comparaison avec l'expérience. Très rapidement, c'est chose faite. Grâce aux calculs que lui inspire son modèle de la radioactivité alpha, Gamov est capable de reproduire une relation empirique entre les demi-vies des isotopes radioactifs et l'énergie des particules émises. Gamov est immédiatement accepté par le petit groupe de spécialistes de physique quantique et de physique nucléaire.

L'étude de la radioactivité alpha a démontré que les concepts de la mécanique quantique sont essentiels pour la compréhension de la physique du noyau. Elle permet encore à Gamov d'envisager une classe de processus inconnus. Une particule alpha suffisamment rapide pourrait pénétrer dans un noyau, quitte à ce que le noyau ainsi formé se désintègre après coup. Ce n'est là qu'un cas particulier de la *fusion nucléaire*, un processus général au cours duquel la collision de deux noyaux conduit à la formation d'un noyau plus volumineux⁸. Ce phénomène peut être considéré comme l'inverse de la radioactivité et montre que les noyaux peuvent s'agglomérer comme ils peuvent se désagréger.

L'histoire des éléments

A la fin du XIX^e siècle, la découverte inattendue de la radioactivité avait apporté la preuve que les éléments ne sont pas des objets intangibles. Certains d'entre eux peuvent changer d'identité. Sur un point au moins, la portée de la découverte était limitée. Elle semblait montrer que les noyaux ne peuvent que

⁸ Le vocabulaire nous tend ici un piège: la fission et la fusion nucléaires sont des phénomènes opposés, même si les termes qui les désignent se ressemblent. Au cours d'une fission, un noyau se casse en deux ou plusieurs fragments. Au cours d'une fusion, ce sont deux noyaux qui s'agglomèrent pour former un noyau plus volumineux.

perdre de leur substance, comme c'est le cas de la radioactivité alpha ou de la fission nucléaire. Dans d'autres circonstances, on voyait le noyau changer d'identité par émission bêta ou par capture électronique, ce qui ne change pas le nombre de ses nucléons (fig. 4.6). L'existence de la fusion nucléaire, si elle était avérée, allait tout changer. Il n'y aurait plus de limitation au principe de la transformation des noyaux. Désormais, *le nombre de nucléons pouvait croître aussi bien que décroître*. Tendez le petit doigt à un physicien, il a tôt fait de vous arracher le bras. Ayant admis que les éléments ont définitivement perdu leur intangibilité, il considère le problème dans sa dimension historique. L'*abondance* actuelle des éléments chimiques constitue l'un des indices dont il dispose pour reconstituer l'histoire de l'univers.

A l'époque où Gamov entre sur la scène cosmologique, on commence à connaître la distribution des différents éléments dans l'univers. Elle semble être la même, où que l'on regarde; l'usage du spectroscopie en fait foi. La composition chimique du système solaire est déterminée par celle du Soleil qui rassemble plus de 99,5% de sa masse. Il n'y a pas de raison qu'il en soit autrement ailleurs, si bien que l'on peut évaluer l'abondance cosmologique des divers éléments. L'hydrogène a beau être le plus léger d'entre eux, il n'en constitue pas moins 71% de la masse directement observée. Par ordre d'importance, avec 28% de la masse de l'univers, l'hélium vient en second, même s'il est rare sur notre planète. Le dernier pour cent est à mettre au compte de tous les autres éléments réunis, et notamment à ceux qui sont nécessaires à la vie...

De même que les règles du jeu d'échecs ne peuvent être modifiées en cours de partie, les astrophysiciens ou les spécialistes de la cosmologie supposent que les lois qu'ils observent sont immuables et qu'elles sont les mêmes dans tout l'univers. Rien, jusqu'ici, ne permet de douter de cette hypothèse. Or, si l'étude des diverses réactions nucléaires nous apprend comment les noyaux peuvent apparaître ou disparaître et comment ils peuvent naître les uns aux dépens des autres, elles ne nous disent rien de l'abondance cosmologique des éléments. Seule *l'histoire du cosmos* peut répondre à cette question.

La partie d'échecs cosmiques a déterminé l'abondance actuelle des éléments. Elle a débuté immédiatement après la naissance de l'univers... et personne ne sait qui la joue. Mais les cosmologistes espèrent bien en reconstituer le déroulement. Il y a deux raisons à cela. La première, c'est que l'orgueil et la démesure ne leur manquent pas. La seconde, c'est que l'abondance que l'on observe aujourd'hui résulte d'une partie qui ne fait peut-être que commencer. Au vu des milliards d'années écoulées, il vaudrait mieux s'exprimer autrement: la partie est lente et peu de coups ont été joués.

A l'échelle industrielle, la fusion est un objectif à long terme qui se heurte à de redoutables obstacles. Pour y parvenir, les noyaux que l'on voudrait voir fusionner doivent être plongés à l'intérieur d'une soupe où règnent de très hautes pressions et de très hautes températures. Elles seules peuvent communiquer aux noyaux des vitesses suffisantes pour que la fusion puisse avoir lieu et que l'opération soit rentable du point de vue énergétique. Depuis plus de cinquante ans qu'ils s'y emploient, les chercheurs progressent mais l'objectif n'est pas encore atteint.

Pour les cosmologistes qui tenaient à reconstituer l'histoire des éléments, l'objectif était différent. Il leur fallait trouver un milieu aux propriétés extrêmes.

Le rayonnement fossile

Ayant suivi les cours de Friedmann à Leningrad, Gamov était un farouche partisan d'un univers en expansion. C'est après la guerre, lorsqu'il s'est installé aux Etats-Unis, qu'il apporte sa pierre à la connaissance de la structure de l'univers juste après le Big Bang. Il part d'une idée simple. Puisque l'univers est en expansion, on peut remonter dans le passé et s'interroger sur ses premiers instants. Son avenir, en revanche, est plongé dans les ténèbres. Le vers de Racine s'applique à sa destinée:

«Ce que je sais le mieux, c'est mon commencement.» [67]

Selon les anciens élèves et collaborateurs de Gamov que sont Ralph Alpher, né en 1921, et Robert Herman (1914-1997), l'importance des travaux scientifiques de leur mentor est souvent sous-estimée. On ne prenait guère Gamov au sérieux à cause de son amour irrésistible pour la plaisanterie. On le prenait pour un pitre. Alpher et Herman laissent entendre que, à la suite d'un processus d'identification, leurs propres travaux ont pâti de la même réprobation que ceux de Gamov. [68]

A la fin des années 1930, l'expansion de l'univers était un fait pour la majorité des physiciens, mais pas pour tous. On l'a mentionné plus haut, les mesures que Hubble avait faites de la vitesse d'éloignement des galaxies reposaient sur des estimations incorrectes de leurs distances, si bien que la durée qui nous sépare du Big Bang était largement sous-estimée et entraînait en contradiction avec la datation de la Terre.

Durant les années 1940, Gamov s'interroge sur les conditions qui règnent dans cet univers précoce. Il reprend en quelque sorte le raisonnement fait par Kelvin pour expliquer la formation du Soleil: un gaz se comprimant sous l'effet de sa propre gravitation est condamné à s'échauffer. A la différence près que le gaz étudié par Gamov est l'univers entier et que la compression n'a lieu que lorsque l'on remonte vers le passé. Le scénario proposé par Gamov est très simple. A l'origine, l'univers était empli d'un gaz de neutrons très dense. Dans les premières minutes qui ont suivi le Big Bang, ces neutrons ont commencé à se muer en protons. Comme les conditions extrêmes étaient propices, neutrons et protons se sont mis à fusionner à grande échelle, permettant ainsi la formation de tous les éléments chimiques. Tourné en sens inverse, le scénario de Gamov annonce celui de la formation de l'étoile à neutrons (chap. 7).

Gamov charge Ralph Alpher de tester son idée. La publication qui s'ensuit porte une trace évidente du goût de Gamov pour la plaisanterie. Il associe à ce travail le physicien américain Hans Bethe, né en 1906, Alsacien de naissance et prix Nobel de physique 1967. La seule contribution de Bethe à ce travail était de caractère linguistique, et elle était passive. Grâce à son renfort, la publication décrivant les recherches de Gamov et de son élève et qui s'intitule *L'origine des éléments chimiques* est signée Alpher, Bethe, Gamov, une bonne approximation de Alpha, Bêta, Gamma, les trois premières lettres de l'alphabet grec. [69] Cerise sur le gâteau, elle paraît le 1^{er} avril 1948...

L'idée de Gamov se heurte assez rapidement à de sérieuses difficultés. L'étude détaillée des conditions régnant peu après le Big Bang montre que

seuls l'hydrogène et l'hélium ont pu se former à ce moment-là. Par ailleurs, Ralph Alpher et Robert Herman arrivent à la conclusion que, dans l'état initial de l'univers, la température était tellement élevée que les électrons, les protons et les noyaux éventuels ne pouvaient se grouper en atomes. Ils exécutaient séparément leur danse infernale tout en baignant dans un océan de radiation. L'univers entier ressemblait au centre du Soleil actuel.

En ce qui concerne l'histoire de l'univers, Alpher et Herman font une prédiction importante. La radiation présente lors de ces moments cruciaux n'a pas disparu. Elle a laissé des traces dans l'univers actuel sous la forme d'un *rayonnement fossile*. On l'a vu plus haut, l'expansion de l'univers implique la diminution de la densité d'énergie. Sa décroissance entraîne celle de la température, mais elle a une autre conséquence.

La mise en route d'un four se traduit par l'apparition d'un rayonnement infrarouge qui dépend de la température des parois. Pour connaître sa valeur, un physicien n'aurait pas besoin de thermomètre. Il pourrait se contenter d'analyser le spectre du rayonnement. Pour des raisons qui importent peu ici, la forme de ce spectre est très simple: on l'appelle le *spectre du corps noir* (fig. 5.6).

Or l'univers est semblable à un fourneau dont la taille augmenterait sans cesse mais qui n'aurait pas plus de parois que de limites. Cette circonstance ne l'empêche pas d'abriter un rayonnement de corps noir qui ne peut le quitter ni disparaître. Comme la densité d'énergie diminue au cours de l'expansion, celle du rayonnement en fait de même. La température est liée à la densité d'énergie; elle doit également décroître. Conformément à la figure 5.6, on pourrait mesurer cette température si l'on se donnait la peine de rechercher ce rayonnement hypothétique. Durant les milliards d'années qui ont suivi le Big Bang, la «température du rayonnement» est tombée à une valeur à peu près égale à 5 Kelvin, cinq degrés au-dessus du zéro absolu. C'est du moins ce qu'affirment Alpher et Herman [70], mais personne, pourtant, ne prend cette affirmation au sérieux. Pas suffisamment, en tout cas, pour tenter de la vérifier. Aussi, lorsque les radioastronomes américains Arno Penzias⁹ (1933-) et Robert W. Wilson (1936-) détectent en 1964 un rayonnement radio qui balaye l'univers uniformément et dans toutes les directions, ils ne savent pas en interpréter l'origine. Ce n'est que peu à peu qu'ils réalisent qu'il s'agit précisément du rayonnement fossile suggéré par Alpher et Herman. Penzias et Wilson peuvent alors mesurer la température associée au rayonnement fossile. On sait aujourd'hui qu'elle s'élève à 2,73 Kelvin. Pour leur découverte, Penzias et Wilson partageront avec Kapitza le prix Nobel de physique 1978.

Le Big Bang

La découverte du rayonnement fossile est une étape importante dans l'histoire de la cosmologie. Elle confirme d'abord l'hypothèse du Big Bang. En second lieu, compte tenu de ce que nous savons aujourd'hui de l'abondance

⁹ D'origine allemande, Penzias et sa famille parvinrent en 1939 à fuir les persécutions nazies.

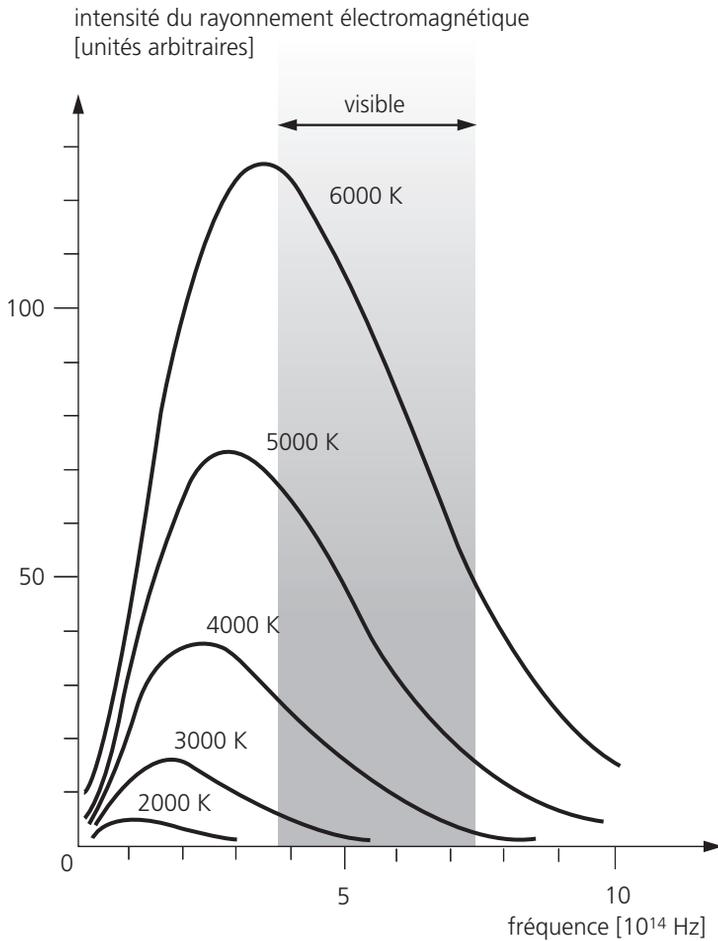


Fig. 5.6 Le spectre du corps noir est caractérisé par la forme de la courbe représentative de l'intensité en fonction de la fréquence. La température du corps noir est fixée quand on donne la fréquence correspondant au sommet de la courbe.

des divers éléments chimiques et de la densité moyenne de la matière dans l'univers actuel, elle permet de remonter aux instants qui ont suivi le Big Bang plus sûrement qu'à la fin des années 1940. Nous avons actuellement une vision assez nette de ce qui s'est passé, non pas «au moment du Big Bang», mais «sitôt après». Dans *Les trois premières minutes* de l'univers, le physicien américain Steven Weinberg (1933-), prix Nobel 1979, a donné un récit circonstancié de l'image que les cosmologistes se font aujourd'hui des premiers instants de notre monde [60]. Dans ce même ouvrage, Weinberg consacre un chapitre entier à l'oubli dans lequel la prédiction d'Alpher et Herman est tombée.

Le récit de Weinberg commence à la fin du premier centième de seconde, ce qui ne signifie pas que l'on ne soit pas remonté plus tôt – ou plus haut,

comme on voudra. Mais, auparavant, la situation de l'univers était si complexe qu'il vaut mieux commencer l'histoire là où débute le récit de Weinberg. A ce moment là, «l'univers est plus simplement et plus facilement descriptible qu'il ne le sera jamais par la suite» [60]. La température est de 100 milliards de degrés. L'univers est rempli d'une soupe brûlante de particules, d'antiparticules et de rayonnement. Il y a là notamment des électrons et des positons qui s'annihilent et se recréent sans cesse alors que les protons et les neutrons, beaucoup moins nombreux, sont en nombre égal.

A mesure que la température diminue, les neutrons deviennent moins nombreux que les protons. Des noyaux d'hélium 4 commencent à se former par fusion nucléaire. Malgré le titre de son ouvrage, Weinberg conclut la partie initiale de son scénario 35 minutes plus tard, lorsque la température est tombée à 300 millions de degrés. C'est dans cette demi-heure initiale que l'antimatière a disparu. Chaque fois que disparaissait un positon ou un antiproton, un électron ou un proton en faisait de même. Ce jeu de massacre a épargné une très faible fraction de la matière initiale car l'antimatière était en très léger déficit relativement à la matière. Quant aux neutrons, ils sont condamnés à la désintégration, à moins qu'ils n'aient trouvé place dans un noyau d'hélium.

La matière n'est pas encore formée d'atomes. A des températures pareilles, les atomes sont dissociés en leurs constituants, les électrons et les noyaux. Ces derniers n'offrent pas encore la belle variété que nous leur connaissons: 93% d'entre eux sont des protons libres ${}^1_1\text{H}$, les noyaux d'hydrogène les plus simples, et l'immense majorité des 7% restants des particules alpha, les noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$. Gamov avait raison d'imaginer que la plus grande partie de l'hélium actuel s'est formée dans les premiers instants de l'univers. Quant aux autres éléments, il faudra leur trouver une autre origine. Seules quelques traces d'éléments légers ont été produites dans les premiers instants, mais on peut les oublier pour la suite de cet exposé. Quant aux électrons qui ont survécu, leur charge négative neutralise exactement la charge positive des noyaux.

C'est au bout de quelques centaines de milliers d'années que les électrons et les noyaux pourront se combiner pour former des atomes. Ce ne sera possible que lorsque la température sera tombée à 3000 K. Depuis lors, la matière et le rayonnement vont vivre, non pas en toute indépendance – après tout le Soleil et les étoiles émettent de la lumière – mais partiellement séparés. La combinaison des électrons et des noyaux permettra un jour à la matière de se regrouper et de former des galaxies et des étoiles. Quant à la radiation, elle se propage dans toutes les directions et emplit l'univers entier.

Si l'on admet l'image du Big Bang proposée plus haut, la quantité de matière de tout l'univers s'est à peu près figée une demi-heure après l'explosion initiale. La masse de ce mélange gazeux ne diffère guère de celle de toute la matière constitutive des galaxies actuelles. C'est au cours des 13,6 milliards d'années suivantes que se forgeront les éléments plus lourds que l'hélium, et notamment ceux qui permettront la formation de planètes comme la Terre et l'apparition de la vie. Pour cette deuxième étape, il faut du temps et une forge puissante et, surtout, très chaude...

L'accélération de l'univers

Le XX^e siècle a vu la mise en place de trois piliers de la cosmologie: l'expansion de l'univers, l'existence d'un rayonnement fossile et la production de l'hydrogène et de l'hélium dans les premières minutes qui ont suivi le Big Bang. Les moyens techniques d'observation mis récemment à disposition des astronomes ont permis d'améliorer considérablement nos connaissances de l'univers lointain. Nous parvenons aujourd'hui à déterminer avec une bonne précision le temps qui s'est écoulé depuis le Big Bang. A cet effet, on mesure la vitesse avec laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres. Plus une galaxie est lointaine, plus son image est ancienne: si elle est située à 20 millions d'années-lumière, on la voit telle qu'elle était il y a 20 millions d'années: en augmentant la puissance des télescopes, on remonte dans le passé, ce qui permet ainsi de reconstituer l'histoire de l'expansion de l'univers durant les 13,7 milliards d'années écoulées depuis le Big Bang. Quant à la plus ancienne galaxie connue, elle a été observée tout récemment par une équipe franco-suisse. Elle serait vieille de 13,23 milliards d'années. Son décalage vers le rouge est si élevé qu'elle n'est visible qu'en infrarouge [71].

L'aube du XXI^e siècle nous a apporté une autre surprise. *L'univers est en expansion accélérée*¹⁰. A mesure que passent les milliards d'années, les galaxies s'éloignent de plus en plus rapidement les unes des autres [58, 72-74]. Sur la figure 5.3, l'expansion accélérée est schématisée par la courbe pointillée.

L'image simple que l'on a donnée au cours de ce chapitre est éloquent. Parce que les galaxies exercent les unes sur les autres une attraction gravifique, l'expansion de l'univers se ralentit, à l'image de la balle que l'on lance vers le ciel et qui perd de la vitesse du fait de la pesanteur. Si, lors du lancement d'une fusée, on constate qu'elle s'éloigne de plus en plus rapidement du sol, c'est que ses moteurs consomment du carburant. Quand les réservoirs sont vides, la fusée se comporte comme un objet usuel: son ascension se ralentit. Les galaxies n'ont pas de carburant: il faut trouver une autre raison à leur accélération. En attendant de la trouver, les spécialistes de la cosmologie réintroduisent la constante cosmologique d'Einstein. Elle ne constitue pas une explication, mais permet au moins de décrire le comportement inattendu du cosmos.

¹⁰ Certaines mesures récentes indiqueraient que cette accélération serait «récente»: elle ne daterait que de quelques milliards d'années.

6 D'OÙ PROVIENNENT LES ÉLÉMENTS DE LA VIE?

«Dieu dit: Que les eaux produisent en abondance des êtres vivants; et que des oiseaux volent au-dessus de la terre, à travers l'étendue des cieux. [...] Alors Dieu dit: Faisons l'homme à notre image, selon notre ressemblance; et qu'il règne sur les poissons de la mer, sur les oiseaux du ciel, sur le bétail, sur la Terre entière, et sur tous les reptiles qui rampent sur le sol.» [Genèse 1, 20; 29]

Poussières d'étoiles

Fred Hoyle est la grande figure de ce chapitre. Il se considérait comme la victime d'un certain terrorisme intellectuel. S'il a souffert d'ostracisme, il le devait à son esprit très critique, une qualité essentielle pour un chercheur qui s'accompagnait chez Hoyle d'une telle indépendance d'esprit que ses idées allaient souvent à contre-courant des opinions courantes. Rien ne pouvait l'en faire démordre, même lorsque de nouvelles découvertes fragilisaient sa propre position.

Si Hoyle n'avait été qu'un maniaque de la polémique, il ne serait guère connu au-delà d'un cercle restreint. Mais il a été le premier à découvrir la clé de la formation des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. On savait que ces deux gaz avaient été forgés dans les premières minutes de l'univers, mais on ignorait dans quelles conditions les autres éléments s'étaient formés. A ce titre, Hoyle est un des pionniers de l'étude de l'astrophysique nucléaire. Il a démontré que chacun d'entre nous est constitué de cendres d'étoiles. La plus grande partie des matériaux dont nous sommes faits ont été fabriqués en leur centre, là où règnent des conditions extrêmes, impossibles à réaliser en laboratoire. Les savants s'en doutaient, mais Hoyle a su en démontrer le mécanisme. La communauté scientifique a jugé son œuvre suffisamment importante pour la couronner du prix Nobel de physique 1983, mais elle a repris d'une main ce qu'elle donnait de l'autre: ce prix n'a été décerné qu'à William Fowler, le chercheur qui a vérifié expérimentalement les prédictions de Hoyle. On peut imaginer que cette injustice n'a que trop contribué à enfermer Hoyle dans une attitude agressive vis-à-vis de ses pairs.

La découverte de Hoyle a eu un autre mérite. Elle nous a fait prendre conscience d'une situation à la fois troublante et intrigante. Pour construire notre univers, il fallait se servir d'une recette bien particulière.

Une boule de gaz incandescente

L'origine de l'énergie solaire a longtemps été une énigme. Kelvin avait cru la trouver dans le réchauffement que notre étoile avait subi lors de sa formation. La découverte de la radioactivité suggérait que l'origine de l'énergie solaire devait être cherchée dans le noyau. Il restait à identifier le mécanisme

responsable d'une production de chaleur bien plus efficace que la radioactivité elle-même. Pour y parvenir, il fallait déterminer la constitution interne du Soleil. Or, au début du XX^e siècle, seule la surface de l'astre du jour était à notre portée. On ignorait ce qui se passait en-dessous. Arthur Eddington allait changer tout cela.

Au chapitre 5, on a dépeint Arthur Eddington sous les traits d'un ardent défenseur d'Einstein et de la relativité générale. Mais sa notoriété a une autre origine. Entre 1916 et 1926, appliquant aux étoiles les lois de la physique, Eddington ouvre la voie à la compréhension de la structure interne des étoiles. Pour y parvenir, il utilise les informations que l'on avait accumulées sur leur composition et leur température superficielle. Il parvient notamment à évaluer les conditions qui règnent au centre d'une étoile dont on connaît la masse. «Quand Eddington se mit à étudier ce domaine, personne ne savait ce qui passait à l'intérieur des étoiles. A supposer qu'ils se soient posé de pareilles questions, les astronomes [...] assimilaient le Soleil à l'intérieur d'un volcan. Comment fallait-il aborder le problème? Personne n'en avait la moindre idée.» [59]

Eddington se rend compte que le Soleil est une boule de gaz incandescente au centre de laquelle la température se compte en millions de degrés. Les astronomes considèrent le Soleil comme une étoile naine, même si sa masse est supérieure à la plupart de celle des étoiles qui peuplent le ciel. Le paradoxe n'est qu'apparent: les étoiles géantes sont rares parce qu'elles ne vivent pas longtemps. A l'échelle des temps cosmiques, ce sont des bulles de savon. Quant aux étoiles moins massives que le Soleil, elles vivent chichement mais plus longtemps que lui. Même s'il naissait autant de géantes que de naines, ces dernières seraient bien plus abondantes.

L'observation directe du Soleil nous en apprend beaucoup sur son histoire. L'avènement des grands ordinateurs nous a permis d'étudier son évolution «en laboratoire», à l'image des météorologues qui étudient le déploiement des perturbations et des anticyclones et les changements de climat. Comme eux, les astrophysiciens comparent sans cesse leurs résultats avec les observations faites sur le Soleil et sur les autres étoiles. L'univers est *trop jeune* pour que la prééminence initiale de l'hydrogène et de l'hélium ait pu changer considérablement. Les étoiles que l'on observe sont à différents stades de leur évolution, si bien que celle du Soleil peut presque se lire du début à la fin. Pourvu qu'elles aient la même masse que l'astre du jour, les étoiles qui viennent de naître nous éclairent sur sa jeunesse, celles qui sont en fin de vie nous apprennent quelle sera sa mort.

A l'époque de sa naissance, le futur Soleil a eu un comportement qui peut surprendre, même s'il obéit scrupuleusement aux lois de la physique classique. Notre étoile s'est formée à partir d'une nébuleuse incroyablement ténue, essentiellement constituée d'hydrogène et d'une quantité moindre d'hélium. Pour en apprécier la faible densité, il faut imaginer la quantité d'eau que peut contenir un dé à coudre. Laissons ce liquide s'évaporer dans un cube de quelques dizaines de kilomètres de côté où l'on a préalablement fait le vide le plus complet. On obtient alors un nuage de vapeur d'eau dont la densité est équivalente à celle de la nébuleuse dont est issu le Soleil. Pour une raison ou une autre, une portion du nuage s'est contractée et a formé une poche un peu plus dense que son environnement. Le Soleil attire la Terre: la poche en fait de

même avec le gaz qui l'entoure. Quand sa masse est devenue assez grande, elle prend une forme sphérique, à l'image des planètes et des satellites, à moins qu'ils ne soient trop petits. Phobos et Deimos, les deux satellites de Mars, ont une forme irrégulière parce que leur diamètre est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres.

Aujourd'hui, le Soleil, toujours gazeux, se porte bien. En son centre, la température atteint 15 millions de degrés et la densité y est 160 fois plus élevée que celle de l'eau [75]. A titre de comparaison, les densités de l'or et de l'iridium valent respectivement 19,3 et 22,4 à 20°C. Dans ces conditions, comment le Soleil peut-il se comporter comme une boule de gaz?

Sur notre planète, la matière est formée d'atomes ou de molécules dont la dimension n'est pas inférieure à 10^{-10} m. Un gaz est suffisamment dilué pour que les molécules qui le constituent s'agitent librement dans l'espace, quitte à entrer en collision au hasard de leurs pérégrinations. Cette liberté de mouvement de ses constituants permet au gaz de se dilater ou de se comprimer aisément. Les solides ou les liquides, en revanche, sont plus denses. Il est difficile de modifier leur volume car leurs molécules ou leurs atomes sont en contact permanent. A l'intérieur du Soleil, en revanche, les atomes sont dissociés par la haute température. Seuls subsistent leurs composants, les noyaux, dont la taille est cent mille fois plus faible que celle des atomes, et les électrons, bien plus petits encore – pour la science actuelle, ils sont strictement ponctuels. Il ne faut pas s'étonner que, même à des densités bien supérieures à celles des solides, ces particules minuscules se comportent comme les molécules indépendantes constitutives des gaz (fig. 6.1). *Le Soleil est une boule gazeuse incandescente.*

Selon le scénario de Kelvin, la boule de gaz commence par se contracter tout en s'échauffant. Comme sa température s'élève, elle émet un rayonnement infrarouge. La boule ne s'arrête pas en si bon chemin. Sans trêve, son rayon se réduit et sa température s'élève. Elle va bientôt devenir lumineuse tout en restant gazeuse – Kelvin la croyait liquide. Son éclat augmente comme une braise sur laquelle on souffle. Emportée par le rayonnement, son énergie se disperse dans l'espace. Cette diminution progressive de l'énergie de la masse gazeuse la force à se contracter et à s'échauffer de plus en plus. En quelques dizaines de millions d'années, elle pourrait conduire le Soleil naissant à un effondrement définitif qui condamnerait le reste du système solaire à graviter en silence dans l'éternité des ténèbres glacées. Quelle est la nature du *deus ex machina* qui, au bout de 50 millions d'années, l'a empêché de se contracter davantage? 50 millions d'années, c'est un éclair en comparaison de la vie entière du Soleil, vieux de quatre milliards et demi d'années.

Tant que le rayon de la boule gazeuse diminue, elle perd de l'énergie. Rien ne peut l'empêcher de rayonner et de se contracter. Rien, si ce n'est un phénomène nouveau, une source d'énergie capable de résister à l'effondrement de ce qui cesse alors d'être une simple sphère de gaz chaud, mais devient une étoile de plein droit, le Soleil, une boule lumineuse dont l'éclat et le diamètre ne varient que peu pendant des millions ou des milliards d'années. Cette source hypothétique permet de maintenir à l'intérieur de l'étoile une température très élevée et une pression capable de s'opposer à l'effondrement stellaire. L'énergie ainsi produite compense celle qui est rayonnée dans l'espace.

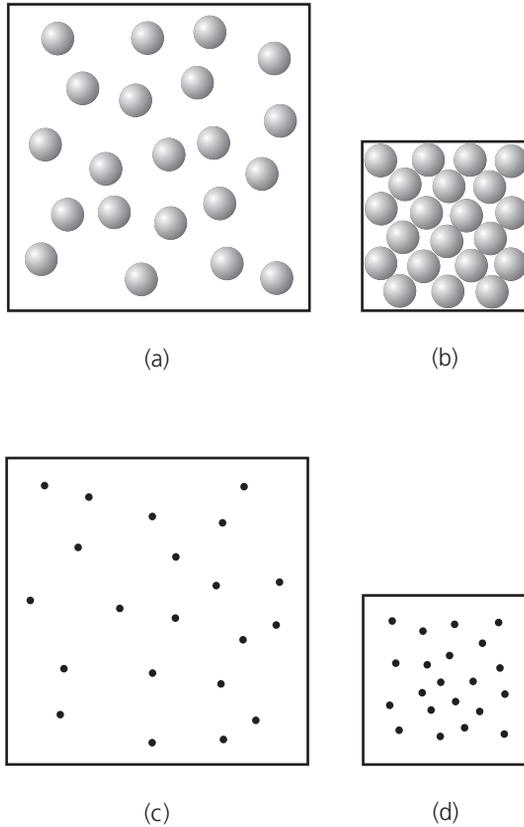


Fig. 6.1 Un gaz usuel est formé de molécules ou d'atomes indépendants et animés de mouvements aléatoires (a). Plus la température est élevée, plus les vitesses sont grandes et les collisions nombreuses. Si le volume à disposition diminue, les atomes ou les molécules entrent en contact permanent et s'agglomèrent. Il en est de même si la température s'abaisse au-dessous d'un certain seuil. On est alors en présence d'un liquide ou d'un solide (b). A l'intérieur d'une étoile, la pression et la température sont telles que les atomes se dissocient. Il ne subsiste qu'un *plasma*, mélange d'électrons et de noyaux (c). Même si le plasma est considérablement comprimé, son caractère gazeux se maintient, notamment en raison de la taille infime de ses constituants: leurs rayons sont au moins cent mille fois inférieurs à ceux des atomes (d).

Reste à identifier la nature du carburant providentiel. En 1920, Eddington imagine qu'un lent processus d'annihilation de matière se déroule à l'intérieur des étoiles. En vertu de la relation d'Einstein qui unit la matière et l'énergie, la disparition d'une certaine quantité de matière libère de l'énergie: c'est ce qui se passe avec la radioactivité. Mais il faut ensuite découvrir une réaction crédible susceptible de fournir l'énergie gigantesque produite au centre du Soleil, une énergie qui n'a pas de commune mesure avec celle qui est créée au sein de notre planète.

Un amour fusionnel

C'est Houtermans qui fait le premier pas. En 1928, il fait la connaissance de Gamov qui, peu auparavant, avait jeté les premières bases de la fusion nucléaire (chap. 5). Houtermans se passionne pour le travail de Gamov et se met à collaborer avec lui mais leurs carrières respectives les séparent très vite. Ce n'est que l'année suivante que, pour Houtermans, la rencontre va porter ses fruits.

L'image qui a rendu Gamov célèbre, c'est celle d'une particule chargée positivement, pénétrant dans un noyau, lui aussi porteur d'une charge positive. Lors de son approche, la particule incidente est ralentie par une barrière électrostatique due à la répulsion entre les deux charges. Plus la particule chargée approche de son but, plus la progression est difficile. Si elle atteint néanmoins son but, elle peut former avec le noyau cible un noyau plus volumineux, mais souvent instable. Il s'agit d'une réaction de fusion qui peut être la source d'une énergie considérable.

Houtermans pense que la fusion est la clé de la source de l'énergie solaire. Dans la nature, il existe un moyen de surmonter l'obstacle de la barrière électrostatique: ce sont les températures très élevées, avoisinant les dix millions de degrés. Au sein d'un gaz assez chaud, certains noyaux atteignent une vitesse suffisante pour que se produise une fusion. Il reste à identifier les régions de l'univers où règnent des conditions assez infernales pour qu'une telle réaction soit possible. Dans les années 1920, la réponse ne souffre aucune ambiguïté. La fusion ne peut se produire que là où la température et la pression sont suffisamment élevées, au centre du Soleil et des étoiles. Ce n'est qu'au cours des années 1940 que Gamov identifiera une autre scène où la fusion a pu se produire: l'univers entier émergeant du Big Bang.

Un élève d'Eddington, Robert Atkinson, se joint à Houtermans. Ils publient ensemble un article proposant que la fusion nucléaire réalise précisément l'annihilation de matière entrevue par Eddington. Ce serait la fusion des protons qui conduirait à la production d'hélium. Durant le processus envisagé, une certaine quantité de matière se transforme nécessairement en énergie. [76] Les détails du scénario imaginé par Atkinson et Houtermans ne sont pas corrects, ce qui est normal. A cette époque, le neutron n'est pas encore été découvert. Il n'empêche que ces deux pionniers ont montré la voie à suivre. Leur publication a un intérêt historique évident.

Laissons à Houtermans le dernier mot de cette histoire: «Le soir même où nous avons terminé la rédaction de notre publication, je me promenais avec une jolie fille. Une fois que le jour fut tombé, les étoiles se mirent à luire dans toute leur splendeur. "Ne sont-elles pas magnifiques?" demanda ma compagne. Je bombai le torse et annonçai fièrement: "Depuis hier, je sais pourquoi elles brillent." » [51]

Un amour placé sur d'aussi heureux auspices ne pouvait que s'épanouir. Houtermans épousera Charlotte, la jeune personne si sensible au charme des étoiles. Mais les étoiles et l'amour ont une fin. Fritz et Charlotte Houtermans divorceront, se remarieront encore et divorceront définitivement, un processus encore inconnu en astrophysique...

La fusion de l'hydrogène

Atkinson et Houtermans avaient montré la voie à suivre, mais il était impossible de se faire une idée claire de la fusion tant que le neutron était ignoré de la science et que les propriétés nucléaires des noyaux légers n'étaient pas comprises. Dans ce qui suit, on abandonne la perspective historique pour faire un exposé très succinct et simplifié de l'évolution des étoiles. On se limite essentiellement au cas du Soleil et des étoiles de masse comparable¹.

Il convient d'abord de réaliser que la radioactivité et la fusion nucléaire sont des phénomènes bien différents. La radioactivité se déroule d'un pas uniforme que rien ne peut modifier. Ni la pression, ni la température, ni l'environnement chimique n'ont le moindre effet sur elle. Seuls comptent le nombre et la nature des noyaux instables présents dans la planète qui en est le siège. La fusion nucléaire, en revanche, ne peut se produire que si les conditions le permettent. Pour que la fusion d'hydrogène en hélium ait lieu, il faut que les conditions extrêmes mentionnées plus haut soient réalisées. Deux remarques s'imposent d'emblée.

On ne fabrique pas une bicyclette en lançant deux roues, un guidon et un pédalier les uns contre les autres. De manière analogue, il serait absurde d'imaginer qu'un noyau d'hélium se forme d'un seul coup. Sa production nécessite une série d'étapes *ne mettant en jeu que la fusion de deux particules*. La raison en est simple. La fusion de deux particules, quelles qu'elles soient, est un processus très rare: au centre du Soleil, seul un proton sur 100 millions participe aux réactions de fusion. Que dire alors de la fusion simultanée de trois particules! Toutes proportions gardées, elle est aussi improbable que de gagner dix semaines de suite le gros lot à la loterie alors que, à chaque fois, on ne prend qu'un seul billet.

Le deuxième point est tout aussi important. Quand la contraction du nuage gazeux dont le Soleil est issu a été interrompue par la mise en place des réactions de fusion, celles-ci ne pouvaient impliquer que des éléments à très faible nombre atomique Z . La valeur de Z correspond au nombre de protons contenus dans le noyau. Quand Z croît, la hauteur de la barrière électrostatique en fait de même. Or, plus l'obstacle est difficile à franchir, plus les particules qui fusionnent doivent être rapides et plus la température de l'étoile doit être élevée. Quand l'étoile se forme, ce sont les réactions correspondant aux températures les plus basses qui s'enclenchent les premières. Et si la chaîne qui en résulte fournit suffisamment d'énergie à l'étoile pour qu'elle cesse sa contraction, l'évolution de l'étoile atteint un palier caractérisé par la fusion d'un élément particulier.

Depuis plus de quatre milliards d'années, le Soleil vit de la fusion de l'hydrogène. A chaque seconde, 600 millions de tonnes de ce gaz sont transformées en hélium. Les réactions qui entrent en jeu sont symbolisées à la figure 6.2. Chacune d'elles donne lieu au même bilan: 4 protons donnent naissance

¹ A l'intérieur du centre d'une étoile dont la masse est trop faible, les réactions nucléaires ne s'allument jamais (chap. 10).

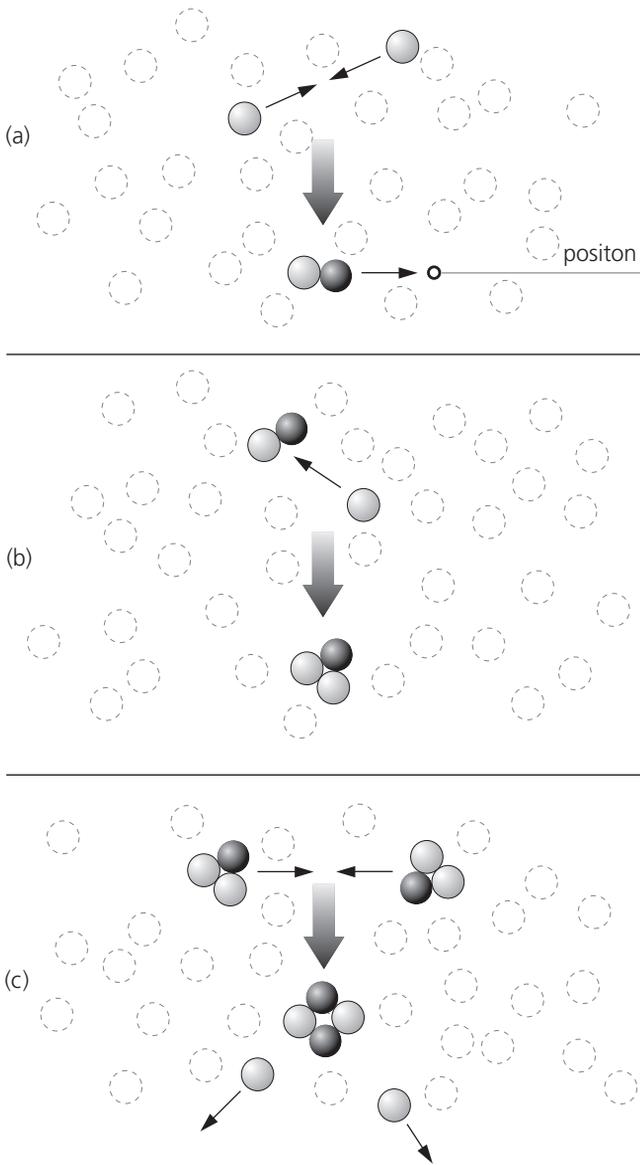


Fig. 6.2 Fusion de l'hydrogène solaire. Dans les conditions extrêmes régnant au centre du Soleil, l'hydrogène est dissocié en protons (boules en pointillés ou faiblement ombrées) et en électrons (non représentés). Les collisions sont fréquentes. Un proton attend en moyenne 10 millions d'années pour pouvoir former un noyau de deutérium ${}^2\text{H}$ lors d'une collision avec un autre proton. L'un d'eux se transforme en neutron (boule plus foncée). Un positon s'échappe du noyau (a). Un noyau de deutérium attend 6 secondes pour former un noyau d'hélium ${}^3\text{He}$ par absorption d'un proton (b). Un noyau d'hélium ${}^3\text{He}$ attend un million d'années avant de former un noyau d'hélium ${}^4\text{He}$ et deux protons à la suite d'une collision avec un noyau identique (c). On n'a représenté ni le neutrino formé lors de l'étape (a), ni le rayonnement gamma émis au cours de chacune des étapes (b) et (c).

à un noyau d'hélium 4, deux positons, deux neutrinos et deux photons. Les positons ne survivent pas; ils s'annihilent au contact des électrons en donnant naissance à un rayonnement gamma, ce qui contribue au maintien de la température et de la pression au centre du Soleil. La fusion de l'hydrogène produit une énergie considérable à l'échelle nucléaire: 0,7% de la masse totale des quatre protons et des deux électrons annihilés au contact des positons est convertie en une énergie dont on peut calculer la valeur à partir de la formule d'Einstein discutée au chapitre 3. Elle compense l'émission thermique et lumineuse qui intervient à la surface de notre étoile. Quant aux neutrinos, ils se déplacent à la vitesse de la lumière et quittent le Soleil en deux secondes. Ce sont des particules si subtiles qu'elles ont toutes les chances de traverser notre étoile sans être arrêtées. A cause de leur fugacité, nous avons toutes les peines du monde à les capturer sur Terre. Quand nous y parvenons, elles fournissent d'importantes informations sur les conditions régnant au centre du Soleil. On dispose ainsi d'un télescope bien malaisé d'usage mais permettant d'observer directement le centre d'une étoile...

On peut se demander pourquoi la chaîne de réactions s'arrête à la formation d'hélium. Le noyau ${}^4_2\text{He}$ ne pourrait-il absorber un proton, donnant ainsi naissance à l'isotope ${}^5_3\text{Li}$ du lithium? La réponse est simple, en apparence du moins: l'isotope ${}^5_3\text{Li}$ ne peut être produit parce que, sitôt formé, il se désintègre. C'est là la première des nombreuses surprises que nous réserve l'histoire des éléments: il n'existe pas de noyau stable dont le nombre de nucléons A soit égal à 5. Cette circonstance et d'autres restrictions analogues ont pour effet de bloquer les réactions de fusion. *Une fois que l'hélium 4 a été produit dans le Soleil actuel, il ne peut plus être transformé en un élément plus lourd.*

A l'origine, le Soleil était essentiellement formé d'un mélange d'hydrogène et d'hélium. Comme on mesure l'énergie qu'il rayonne, il est aisé d'évaluer le rythme de la *fusion de l'hydrogène*. Actuellement, le Soleil a consommé près de la moitié de l'hydrogène qui occupait son centre, la seule région où la température soit assez élevée pour que sa fusion puisse se produire. Son éclat augmente d'environ 9% chaque milliard d'années. Encore cinq milliards d'années et le noyau du Soleil ne contiendra plus que de l'hélium, la cendre de la fusion de l'hydrogène. A ce moment, notre étoile devra modifier son train de vie.

Cette observation démontre que la physique des noyaux et des particules a de profondes répercussions sur notre univers, et notamment sur l'apparition de la vie. Il fallait que le Soleil vive durant plusieurs milliards d'années et qu'il répande un rayonnement à peu près constant pour que la vie puisse apparaître sur Terre. Mais pour que notre planète existe et que la vie y prenne naissance, il fallait encore que notre univers contienne d'autres éléments que l'hydrogène et l'hélium. Notre histoire ne peut se terminer là!

L'énigme de la fusion de l'hélium

La plupart des étoiles qui peuplent le ciel traversent actuellement la même étape évolutive que notre Soleil: l'hydrogène n'est pas encore épuisé en leur centre. Cette phase est très importante puisqu'elle représente environ 80%

de la vie d'une étoile. C'est la masse initiale de l'étoile qui détermine le rythme de l'évolution: plus l'étoile est massive, plus elle consomme rapidement son hydrogène. Avec ses $2 \cdot 10^{30}$ kg, le Soleil a beau être 330 000 fois plus massif que la Terre, il est loin de détenir un record stellaire. Les astres trop lourds n'occupent pas longtemps le devant de la scène: pour une étoile 30 fois plus massive que le Soleil, l'étape marquée par la fusion de l'hydrogène prend fin au bout de 6 millions d'années environ. A l'échelle des durées cosmiques, c'est un éclair dans le ciel d'été.

Une fois que l'hydrogène est consommé au centre de l'étoile, l'hélium a pris sa place. Il constitue un cœur qui subit le sort que Kelvin avait attribué au Soleil: il se contracte et s'échauffe. Comme la fusion de l'hydrogène se poursuit dans une coquille entourant le noyau, l'enveloppe de l'étoile se dilate considérablement. Les astronomes nomment *géantes rouges* les étoiles qui ont atteint ce stade. Leur surface est moins chaude que celle du Soleil, si bien qu'elles apparaissent plus rouges que lui. Un métal fondu qui se refroidit en fait de même. Du rouge orangé, il passe au rouge vif et au rouge sombre avant de cesser d'être lumineux. Quand le Soleil atteindra le stade de géante rouge, il aura un éclat mille fois supérieur à son éclat actuel. Il s'étendra sur près de 50° dans le ciel d'une Terre surchauffée [75].

Au moment où une étoile se transforme en géante rouge, un second *deus ex machina* entre en scène: la *fusion de l'hélium 4* interrompt la contraction du noyau d'hélium. Ce nouveau palier s'amorce quand la température dépasse 100 millions de degrés en son centre. C'est là que les choses se compliquent. Quel est le noyau stable qui résultera de la fusion de l'hélium et qui jouera le rôle que tenait l'hélium lui-même lors de la fusion de l'hydrogène? Ce noyau sera le maillon terminal d'une chaîne encore à découvrir.

Pour qui se demande quel est le produit de fusion de l'hélium, la première idée consiste à chercher dans une table un noyau possédant quatre protons et quatre neutrons. Il serait si simple que deux noyaux d'hélium fusionnent et forment ainsi un nouvel élément stable, en l'occurrence le béryllium 8 (${}_4\text{Be}^8$). Mais, et c'est là la seconde surprise, ce noyau est instable: il n'existe aucun isotope stable ayant 8 nucléons.

Si l'on consulte la figure 6.3, on constate que, après l'hydrogène et l'hélium, ce sont l'oxygène et le carbone qui se classent respectivement aux troisième et quatrième rangs par ordre d'abondance dans l'univers. Dans les tables, on apprend encore que, en comparaison des autres isotopes de l'oxygène, ${}_8\text{O}^{16}$ se taille la part du lion. Son abondance relative atteint 99,8 %. La situation est la même quand on compare ${}_6\text{C}^{12}$ avec les autres isotopes du carbone. Cette double observation s'explique si l'on admet que ${}_6\text{C}^{12}$ a été formé par la fusion de *trois* particules alpha² et ${}_8\text{O}^{16}$ par l'absorption d'une nouvelle particule alpha par ${}_6\text{C}^{12}$.

Acceptons provisoirement l'idée que le carbone est le résultat de la fusion de l'hélium. Le premier obstacle qui se dresse sur notre route n'est pas mince. Il est dû à la lenteur de la réaction *3-alpha*.

² Une particule alpha est une autre dénomination du noyau d'hélium (chap. 3).

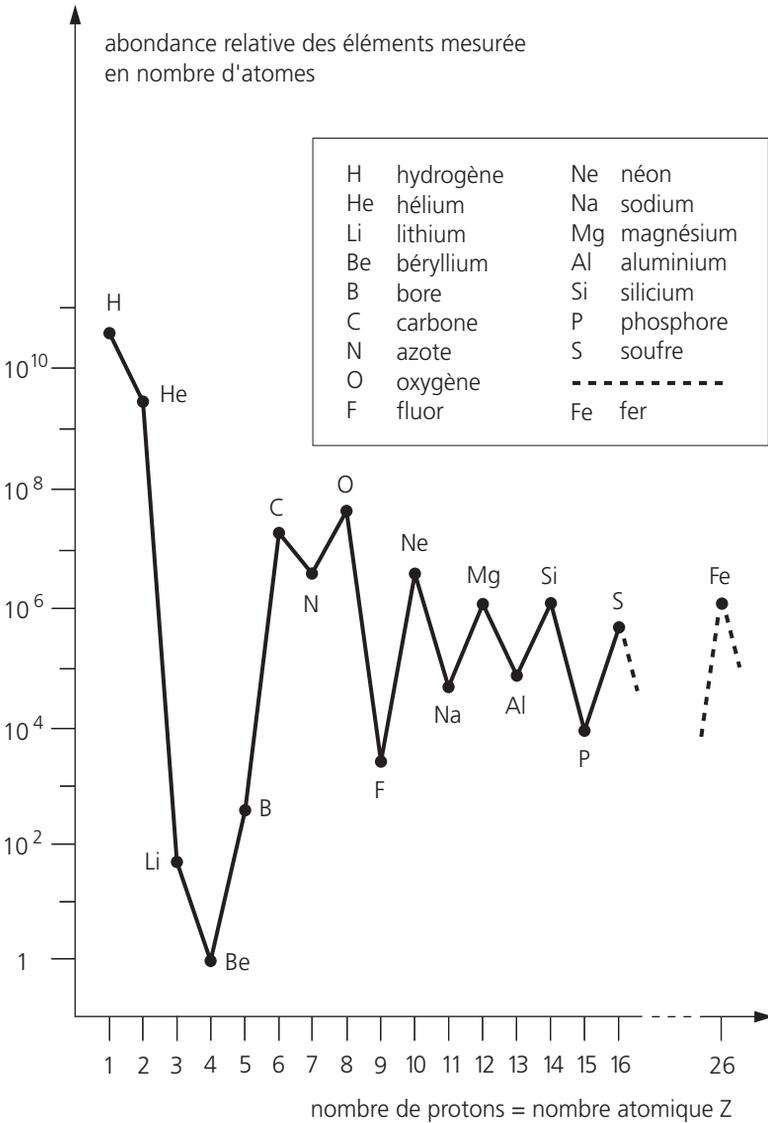


Fig. 6.3 Abondance relative des éléments. Sur l'axe vertical, l'abondance des éléments est représentée en nombre d'atomes présents dans l'univers. L'abondance du silicium est arbitrairement fixée à 1 million. L'échelle est logarithmique: chaque fois que l'on s'élève d'une graduation, l'abondance est multipliée par dix. Le nombre atomique Z est reporté sur l'axe horizontal. Seule l'abondance des éléments les plus légers est représentée. Elle tend à diminuer à mesure que Z croît tout en présentant un maximum secondaire lorsque l'on arrive au fer (Z = 26).

La réaction 3-alpha

Plus haut, on a tenté de convaincre le lecteur que la production de l'hélium devait résulter d'une série de réactions ne mettant chaque fois en jeu que deux particules. Or la collision simultanée de trois alpha reste un processus hautement improbable, même au centre d'une géante rouge qui ne contient que de l'hélium et où, malgré tout, la densité est trente mille fois supérieure à celle de l'eau [18].

Pour apprécier la rareté d'une triple collision, il faut tenir compte du fait qu'une collision entre deux particules alpha ne peut avoir lieu que si leur vitesse relative est assez grande. Elles doivent surmonter la répulsion entre les charges positives qu'elles portent. Au centre de la géante rouge que sera devenu le Soleil, seule une petite fraction des noyaux d'hélium sera assez rapide pour que le feu d'artifice puisse avoir lieu. Dans des conditions aussi extrêmes, la collision ne dure que 10^{-21} s, du moins si les noyaux se comportent comme deux minuscules boules de billard. Pendant un intervalle de temps si court, la distance que peut franchir la lumière est inférieure au centième du rayon d'un atome d'hydrogène, une distance ridicule si l'on songe qu'il faut à peine plus d'une seconde à la lumière pour passer de la Terre à la Lune. Puisqu'une collision entre deux particules alpha est si brève, il est très peu probable qu'une de leurs semblables surgisse et parvienne à s'intégrer aux deux autres pour former un noyau de carbone: un processus aussi rare ne saurait expliquer l'abondance actuelle du carbone. Il faut trouver autre chose.

Salpeter montre le chemin

Le physicien d'origine autrichienne Edwin Salpeter est né en 1924 à Vienne. Après quelques années indolentes dans une école peu stimulante, il bénéficie provisoirement, si l'on peut dire, d'une catastrophe politique. En 1938, l'Anschluss – l'annexion de l'Autriche par le Troisième Reich – provoque un séisme chez les élèves juifs qui sont exclus des écoles publiques, à moins qu'ils ne soient en tête de leur classe. Dans ce cas, on les envoie dans la seule école juive de Vienne où, par la force des choses, ils trouvent un climat intellectuel favorable. Il est triste de constater que le jeune Salpeter ait dû à un abominable changement de régime politique une amélioration considérable de ses conditions d'étude. [77]

La cruauté nazie ne permet pas à Salpeter de bénéficier plus de deux mois de *conditions avantageuses*. La Nuit de Cristal du 9 au 10 novembre 1938 doit son nom aux autorités nazies. Il évoque le verre brisé des devantures des 7500 boutiques juives pillées et l'incendie d'une centaine de synagogues. Les voyous n'ont pas le sens du ridicule: à l'issue du pogrom, la communauté juive devra payer une amende considérable pour tapage nocturne. 35 000 juifs seront arrêtés et envoyés dans des camps. La plupart seront libérés contre rançon. Les vastes plaines d'Europe de l'Est, non encore conquises, ne sont pas encore constellées de camps d'extermination. Bien qu'il n'ait pas encore 14 ans, le jeune Salpeter manque d'être arrêté. Pour Edwin, qui doit se cacher,

l'école est finie. La famille entière s'enfuit en Australie, trois mois à peine avant le déclenchement de la Deuxième Guerre mondiale.

Dès cet instant, les études d'Edwin Salpeter suivent un cours moins aventureux. Il se fait remarquer pour ses aptitudes en mathématiques et, en 1946, il obtient une bourse pour Birmingham où il aura la possibilité de faire une thèse, et surtout de côtoyer les plus grands noms de la physique théorique. Il aura ainsi la possibilité d'émigrer encore, à l'Université de Cornell cette fois. Sise à Ithaca dans l'Etat de New York, cette institution jouit d'une très grande réputation. Salpeter s'y fixe pour le reste de ses jours. Dans son autobiographie, Salpeter insistera sur le fait qu'il est un généraliste de la science: à côté de la physique et de l'astrophysique, il fait des recherches en neurobiologie avec sa femme et s'intéresse avec l'une de ses filles à l'épidémiologie de la tuberculose. [77] En 1952, l'astrophysique nucléaire est une discipline encore très neuve. Salpeter se consacre au problème de la fusion de l'hélium qui bute toujours sur le problème de la réaction 3-alpha.

Un bon chercheur doit avoir la chance d'être au bon endroit au bon moment. «Bon endroit» n'a pas de connotation géographique mais sociale: un scientifique doit chercher le contact avec des collègues qui puissent le stimuler et l'informer de l'avance de leurs propres recherches. C'est ce qui arrive à Salpeter. Invité par le physicien américain William Fowler (1911-1995), la grande figure de l'astrophysique nucléaire, Salpeter apprend que ${}^8\text{Be}$ n'est pas aussi instable que l'on aurait pu le craindre: les expériences ont montré que sa demi-vie s'élève à 10^{-16} s. A celui qui serait étonné qu'une telle durée de vie puisse être considérée comme longue, on répondra que, en physique, des adjectifs comme «long», «grand» ou «distant» n'ont qu'un sens relatif. La durée de vie du béryllium 8 est longue en comparaison de celle de particules encore plus fugaces. Cette circonstance facilite grandement la formation de carbone. Il vaut la peine de s'y arrêter.

Les résonances

«Un atome neutre est constitué d'un certain nombre d'électrons en révolution autour du noyau.» Cette phrase simplificatrice souligne l'analogie entre l'atome et le système solaire, une analogie qui a des limites strictes. Alors que le système solaire peut comporter un nombre arbitraire de corps en orbite autour du Soleil, le nombre d'électrons d'un atome neutre est nécessairement égal au nombre de charges positives que porte le noyau. Mais la différence ne s'arrête pas là. Tandis que les planètes sont à peu près libres de «choisir» leur orbite, les électrons n'ont pas cette faculté. Ils ne peuvent adopter qu'une série de *configurations* bien déterminées, chacune d'elles étant caractérisée par un *arrangement particulier de l'ensemble des électrons*. Pour les désigner, on parle volontiers de *niveaux d'énergie*. L'énergie est minimale quand les électrons occupent le niveau le plus bas, ou *état fondamental*, le seul état stable. Quand l'énergie de l'arrangement électronique est supérieure, on dit que l'atome est *excité*. Tôt ou tard, si rien ne s'y oppose, l'atome retourne à l'état fondamental. L'énergie ainsi gagnée est emportée par un rayonnement électromagnétique fréquemment situé dans la bande du visible.

Le comportement du noyau est très analogue, à ceci près que ce sont les nucléons qui jouent le rôle dévolu aux électrons dans l'atome. En général, un noyau stable possède une série de niveaux excités. Le passage à l'état fondamental s'accompagne de l'émission d'un rayonnement gamma. Les noyaux instables présentent également un état fondamental, mais tôt ou tard ils émettent une particule chargée, changeant ainsi d'identité (fig. 4.6 et 4.7). Si l'on ajoute l'énergie de masse du noyau nouvellement formé à celle de la particule émise, on constate que cette somme est inférieure à l'énergie de masse du noyau instable initial. Rien d'étonnant à cela, puisque la conservation de l'énergie l'exige. Ces observations sont particulièrement importantes si l'on veut comprendre le mécanisme de la fusion de l'hélium.

Le noyau de béryllium 8 est instable. Au bout de 10^{-16} s, il se décompose en deux particules alpha qui emportent l'énergie ainsi gagnée sous forme d'énergie cinétique. Le mécanisme du processus inverse découle de cette disparité énergétique. Pour pouvoir former un noyau de béryllium 8, deux particules alpha doivent posséder une énergie cinétique suffisante: comme elles portent des charges électriques de même signe, une fraction de cette énergie cinétique leur permet de surmonter la répulsion électrostatique. Mais ce n'est pas tout. Quand elles sont en contact, elles doivent encore payer une contribution supplémentaire les autorisant à former un noyau de béryllium. Conformément aux règles qu'impose la conservation de l'énergie, la dépense totale est égale à la différence entre l'énergie de masse du noyau de béryllium 8 et celle de deux particules alpha. Ces deux obstacles sont si rigoureux que ce n'est que lorsque le centre de la géante rouge atteint 100 millions de degrés que la formation de béryllium 8 peut commencer.

Il est commode de se représenter les particules comme de petites boules de billard qui entrent en contact lors d'une collision. Mais cette image passe sous silence une observation très importante. Deux particules alpha convergeant en un point ont bien plus de chance de fusionner si, une fois le noyau de béryllium 8 formé, l'énergie totale des deux particules alpha est entièrement consumée. Pour décrire cette situation, les physiciens parlent de *section efficace*, qui est une mesure de la probabilité de fusion. A la figure 6.4, on distingue clairement que, pour toute réaction nucléaire, la section efficace présente un pic quand l'énergie totale des particules ou des noyaux incidents approche celle d'un niveau particulier du noyau nouvellement formé. Pour désigner ces pics, on parle de *résonances*. Elles sont d'autant plus marquées que la durée de vie de l'état correspondant est grande.

Quand Salpeter apprend l'existence d'une résonance associée à la formation du béryllium 8, il a deux raisons d'être satisfait. La durée de vie de ce noyau est relativement longue en comparaison du temps de collision, ce qui trahit l'existence d'une résonance marquée, et donc d'une amplification notable de la probabilité de formation d'un noyau de béryllium. De plus, une adhérence aussi prolongée laisse le temps à une troisième particule alpha de s'immiscer dans le couple nouvellement formé et de constituer ainsi un noyau de ${}^6_6\text{C}^{12}$. Curieusement, contrairement à ce que l'on observe chez les êtres humains, le ménage à trois est parfaitement stable, à moins qu'une quatrième particule alpha ne se fonde avec le noyau de carbone, donnant ainsi naissance à un nouveau noyau, celui de ${}^8_8\text{O}^{16}$.

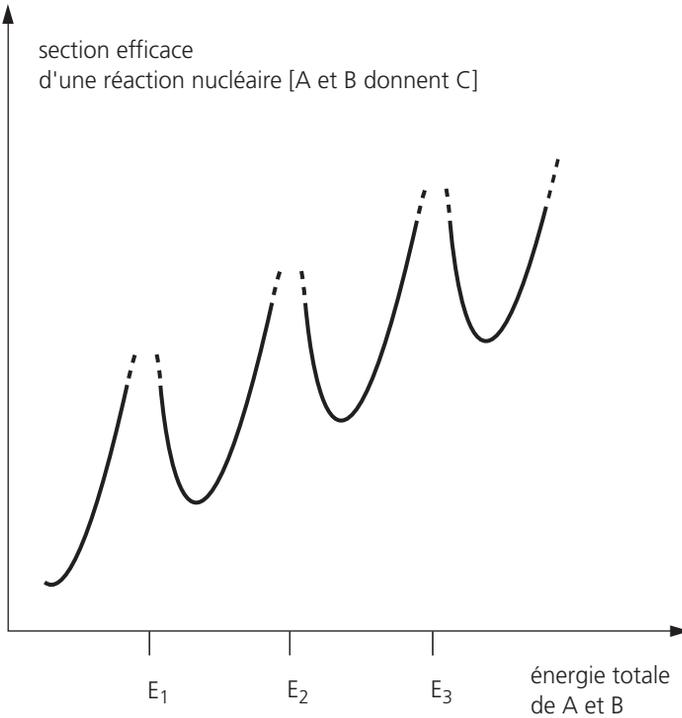


Fig. 6.4 Section efficace et résonances. Deux particules ou noyaux A et B arbitraires forment un noyau C lors d'une collision. La section efficace de la réaction est représentée en fonction de l'énergie totale E de A et B . Elle présente des maxima chaque fois que E est proche de l'énergie E_1 , E_2 ou E_3 d'un niveau particulier du noyau C . A chaque pic correspond une résonance.

Le processus peut se poursuivre par la production de ${}_{10}\text{Ne}^{20}$... Il n'y a pas de raison de s'arrêter. Salpeter publie un article dans lequel il évalue l'action de la résonance du béryllium sur le taux de formation du carbone 12. Il mentionne également la production possible d'oxygène 16, de néon 20 et d'autres éléments plus lourds. [78] Quant aux détails de ces processus et aux taux de production des divers éléments, Salpeter reste dans le flou car, à cette époque, on connaît mal les sections efficaces relatives à la formation des différents noyaux.

Le travail de Salpeter ouvre une nouvelle voie, mais ce n'est pas encore une théorie puisqu'il n'est pas en mesure d'expliquer l'abondance actuelle des éléments. Si le carbone 12, sitôt formé, peut se muer en oxygène 16, pourquoi reste-t-il tant de carbone dans l'univers? La même question se pose pour l'oxygène 16 qui peut se transformer en néon 20. Et la chaîne d'interrogations se poursuit à mesure que l'on avance le long du tableau périodique... Ces questions ne se posent ni pour l'hydrogène, ni pour l'hélium car ils ont été créés en surabondance peu après le Big Bang. Le calcul montre que, depuis que l'univers a été créé, toutes les étoiles qui ont gaiement brûlé de l'hydrogène et de l'hélium ont à peine modifié l'abondance initiale de ces deux gaz.

Décidément, il manque une idée pour aller plus loin.

Astronome controversé

Le Big Bang est un terme forgé par l'astronome britannique Fred Hoyle (1915-2001). [79] Hoyle n'a jamais cru à la naissance explosive de l'univers. C'est par dérision qu'il a utilisé cette expression au cours d'une émission radio-phonique. Suivant en cela d'autres spécialistes de la cosmologie, Hoyle rejetait l'idée d'un univers qui aurait eu un commencement. Mettre une borne à la durée de l'univers peut être choquant, même si cette borne n'existe que dans le passé. Einstein avait tenté d'éviter une telle limitation. C'est dans cet esprit que, avec les astronomes Hermann Bondi et Thomas Gold, Fred Hoyle propose en 1948 une version «douce» de l'expansion de l'univers. Les trois astronomes suggèrent que la dilution de la densité de matière-énergie qu'entraîne l'expansion est compensée par une «création continue» de matière qui remplace la création violente associée au Big Bang.

Aujourd'hui que l'on a découvert le rayonnement fossile et que l'on connaît avec une bonne précision l'abondance des éléments légers – ceux qui se sont formés juste après le Big Bang – les preuves de la réalité du Big Bang se sont accumulées (chap. 5). Les astronomes comprennent mal que Fred Hoyle se soit enfermé sa vie durant dans un rejet obstiné du Big Bang. Ils ont souvent mis son attitude sur le compte d'un caractère querelleur. En témoigne la polémique qu'il a déclenchée à propos de l'éviction de Jocelyn Bell de l'attribution du prix Nobel 1974 (chap. 7).

Il faut bien admettre que, si la théorie de la création continue semble absurde – d'où vient la matière constamment créée? – la cosmologie est loin d'avoir dit son dernier mot. Il est bon que certains esprits restent vigilants face aux conceptions actuelles des débuts de l'univers car, quand il s'agit de l'origine du monde, l'idéologie s'empare souvent des esprits. L'article nécrologique que *La Recherche* consacrait à Hoyle en 2001 en fait foi: «Ceux qui osent affirmer sans nuances [que Hoyle s'est trompé] reconnaissent qu'il a eu raison de chercher la petite bête dans une théorie du Big Bang dont se satisfont trop bien les esprits religieux.» [80] Si l'on comprend bien l'auteur de cette phrase, il est dommage que la théorie du Big Bang soit correcte. Elle pourrait être prise comme un argument en faveur du récit biblique de la Création...

Quelle que soit la personnalité de Hoyle, sa plus grande découverte ne saurait être sous-estimée. Elle nous a donné la clé de l'évolution des étoiles et de l'histoire des éléments chimiques. Elle a également ouvert un débat sur la nature des lois de la physique.

En 1939, Hoyle est élu *fellow* du St. John's College. Durant la guerre, il se consacre à la défense de la Grande-Bretagne. Avec d'autres physiciens, il améliore la technique du radar. Dès 1945, il peut revenir à Cambridge où il enseigne les mathématiques. Quelques années plus tard, il donne un sujet de recherche prophétique à un étudiant de doctorat. Il s'agit d'étudier la réaction 3-alpha et les perspectives qu'elle offre en tant que mode de production du carbone, de l'oxygène et du néon. On est en 1949, si bien que l'article de Salpeter n'a pas encore paru.

Malheureusement pour Hoyle, l'étudiant abandonne son travail à mi-parcours sans annuler son inscription au doctorat, une situation qui a des conséquences funestes pour le malheureux tuteur. Bien qu'il soit convaincu que le sujet proposé est capital et qu'il ait envie de reprendre la recherche abandonnée, il n'a pas le droit d'y toucher tant qu'un certain délai n'est pas écoulé. Une telle mesure de protection à l'égard des étudiants de doctorat est une conséquence de la structure particulière de l'Université de Cambridge et de la manière étrange dont elle a évolué. En attendant, Hoyle se sent très frustré de cette situation, et son malaise atteint un niveau critique lorsque Salpeter publie l'article dont il a été question plus haut. [81]

Au cours d'un séjour de six mois aux Etats Unis, Hoyle reprend le problème là où Salpeter l'avait abandonné. Rappelons-en les données.

L'action se déroule à l'intérieur d'une étoile dont le cœur atteint 100 millions de degrés. Les acteurs sont multiples. Au début de la pièce, il y a là des particules alpha, le pseudonyme des noyaux d'hélium 4, et quelques noyaux de béryllium 8 produits par les collisions entre particules alpha. Les noyaux de béryllium ont la fâcheuse tendance à se désintégrer très rapidement mais, malgré tout, ils vivent assez longtemps pour absorber parfois une troisième particule alpha. Il y a alors formation d'un noyau de carbone 12, qui se transforme lui-même en oxygène 16 quand intervient une nouvelle particule alpha. Très vite, Hoyle se heurte à une difficulté que Salpeter avait sous-estimée. Quand il tente de calculer avec précision les taux respectifs de formation de carbone et d'oxygène, Hoyle s'aperçoit que, avec les données dont il dispose, il ne peut expliquer pourquoi le carbone, aussitôt formé, ne se transforme pas en oxygène. Pour résoudre le paradoxe, Hoyle propose une solution relativement simple, mais purement spéculative.

Le niveau excité du carbone 12

Hoyle part d'une évidence. *La masse d'un produit de fusion stable est toujours inférieure à la somme de celles des noyaux qui ont fusionné*, sans quoi la réaction se ferait en sens inverse. En se servant d'une table similaire au tableau 4.1, il peut calculer l'énergie produite lors de la réaction en faisant appel à la formule d'Einstein: la perte de masse doit être multipliée par c^2 . Lorsqu'un noyau de carbone est formé par fusion d'un noyau de béryllium et d'une particule alpha, ce sont 0,0079 unités atomiques qui partent en «fumée» – en «énergie» serait plus approprié. On n'a pas tenu compte de l'énergie cinétique des noyaux.

Le remède proposé par Hoyle pour accélérer, sur le papier, le taux de production du carbone est purement spéculatif. Il imagine que, lors de la réaction, la particule alpha et le noyau de béryllium 8 ne forment pas immédiatement un noyau de carbone 12, mais plutôt un état excité de ce même noyau. Qui dit état excité dit résonance, qui dit résonance dit section efficace accrue et taux de formation accéléré, à condition toutefois que l'énergie du niveau hypothétique coïncide avec celle des noyaux qui fusionnent. Pour que le carbone 12 soit réellement produit, il faut encore qu'une fraction des noyaux excités passent à l'état fondamental en émettant un rayonnement gamma.

L'hypothèse de Hoyle est loin d'être banale. Pour qu'elle soit recevable, il faut d'abord que le niveau existe! Or il n'est pas répertorié dans les tables. Si son existence était avérée, il faudrait encore que la différence d'énergie entre le niveau excité et l'état fondamental vaille exactement 7,65 MeV.³ La tolérance est très faible (quelques centièmes de MeV), sans quoi l'effet bénéfique de la résonance est perdu.

Il est bien beau de se plonger dans une spéculation, encore faut-il vérifier sa validité. Or c'est au California Institute of Technology de Los Angeles (Caltech) que Hoyle médite sur les réactions nucléaires stellaires et c'est là que William Fowler mène des recherches expérimentales sur les réactions nucléaires susceptibles de se dérouler dans les étoiles. C'est justement Fowler qui avait invité Salpeter peu auparavant. Hoyle l'interroge aussitôt sur l'existence possible d'une résonance du carbone à 7,65 MeV. Il ne s'attend guère à une réponse favorable: «A mon plus grand étonnement, Willy ne rit pas quand je lui expliquai mon problème!» [82] Quant à Fowler, il ne se rappelle pas avoir ri, mais avoir pensé: «Fiche-moi la paix, Hoyle, tu m'embêtes!» Finalement, il fait venir dans son bureau tous les membres de son groupe susceptibles de donner une réponse à la question de Hoyle. On finit par admettre qu'il n'est pas impossible qu'un niveau excité 0^+ ait échappé jusqu'ici à la sagacité des chercheurs⁴, si bien que la chasse à la résonance hypothétique s'ouvre immédiatement. Les jours suivants, c'est Hoyle lui-même qui est maintenu à un certain niveau d'excitation.

La réaction de Fowler est remarquable. Les expérimentateurs sont sans cesse harcelés par des théoriciens venus de partout qui leur proposent sans cesse une nouvelle expérience. Compte tenu de l'investissement que cela représente en temps et en argent, ils n'accueillent pas toujours ces suggestions d'un cœur joyeux. Mais Fowler connaît la valeur de Hoyle et il a confiance en lui. La compétence du groupe qu'il dirige fait le reste: on sait immédiatement où et comment chercher la résonance inconnue. Pendant ce temps, Hoyle attend nerveusement le verdict de l'expérience. Se remémorant l'état d'esprit qui était alors le sien, Hoyle le compare à celui d'un accusé qui attend au tribunal le verdict du jury. A cela près, précise Hoyle, que l'inculpé sait s'il est coupable et que, au cas où il l'est effectivement, il espère que le jury va se tromper sur son compte. Le physicien, quant à lui, a tendance à faire confiance au jury des expérimentateurs, mais il ne sait pas s'il est coupable ou non. Ce sont les juges qui vont le lui apprendre.

L'attente de Hoyle ne dure qu'une dizaine de jours et le verdict est parfaitement clair: le niveau supposé existe bel et bien. Ce jour-là, affirme Hoyle, «la senteur des orangers était plus suave que jamais.» [81] D'un seul coup, il apporte la démonstration définitive que le carbone est produit dans les étoiles et confirme la validité de la réaction 3-alpha amendée par Salpeter et par lui-même.

³ Un eV (*électronvolt*) est une unité d'énergie utilisée en physique atomique. C'est l'ordre de grandeur de l'énergie qui sépare deux niveaux atomiques successifs. Si l'on a affaire à des noyaux, l'énergie entre deux niveaux proches est de l'ordre du MeV: le préfixe «méga», symbolisé par la lettre M, correspond à la multiplication par 1 million.

⁴ Les spécialistes ont leurs propres notations quand ils veulent désigner les caractéristiques des divers noyaux.

Coïncidences

L'exploit de Hoyle ne peut être apprécié à sa juste valeur que si l'on prend conscience de certaines coïncidences numériques étonnantes.

L'étude de la structure et de l'évolution des étoiles montre que, si le béryllium était stable, la formation de carbone à partir de l'hélium se produirait si violemment que les astres qui en sont le siège exploseraient littéralement. En revanche, si l'instabilité était trop grande, la production du carbone ne pourrait démarrer.

On désigne sous le nom de spectre l'ensemble des niveaux énergétiques d'un atome ou d'un noyau. Hoyle a montré que le carbone 12 ne peut être abondant que si le spectre de son noyau présente un niveau résonant. Mais ce n'est pas tout. L'écart qui sépare l'énergie de ce niveau de celle de l'état fondamental est critique: si, d'un coup de baguette magique, on changeait sa valeur de quelques centièmes de MeV, la section efficace responsable de la production du carbone diminuerait de telle manière que le niveau résonant cesserait de jouer son rôle et que la formation du carbone deviendrait négligeable.

Bien plus, tout ceci ne servirait à rien si, une fois formé, le carbone se transformait immédiatement en oxygène par absorption d'une particule alpha. Compte tenu de la température qui règne au sein du cœur d'hélium, l'énergie totale du couple constitué d'un noyau de carbone et d'une particule alpha surpasse de 7,19 MeV l'énergie de formation d'un noyau d'oxygène. Si ce dernier noyau possédait une résonance à la valeur correspondante, la section efficace en serait considérablement amplifiée et le carbone se transformerait rapidement en oxygène. Or il existe bien un niveau résonant dans le spectre du noyau d'oxygène, mais il ne surpasse l'énergie de l'état fondamental que de 7,12 MeV. Il n'y a pas d'amplification du taux de la réaction. Le boulet n'est pas passé loin...

Sans ces coïncidences remarquables, la formation du carbone et de l'oxygène serait gravement hypothéquée. Sans le carbone, les grandes molécules qui servent de briques à l'architecture de la vie ne sont pas concevables. Sans prendre de grands risques, on peut affirmer que la vie ne serait pas apparue dans l'univers. Car si le silicium possède comme le carbone la faculté de former de longues chaînes, il est difficile de le considérer comme un concurrent sérieux en tant que constituant essentiel de la vie. [18]

Le scénario de la formation des éléments fait penser à l'exploit d'Arsène Lupin qui, dans *Arsène Lupin, gentleman cambrioleur*, parvient sans effraction à voler tableaux, meubles et tapisseries dans un château médiéval défendu par quatre portes bardées de fer. Ce cambriolage ne serait que peu de chose pour le héros de Maurice Leblanc si, à l'époque du forfait, il n'était pas détenu à la prison de la Santé. Mais, du fond de sa cellule, Arsène Lupin ne chôme pas. Il se rend compte qu'il existe un moyen de réussir son coup. Par l'entremise de sa bande, avec laquelle il parvient encore à communiquer, il envoie une lettre recommandée au baron Cahorn, propriétaire du château, annonçant à la fois les objets dont il compte s'emparer et la date du cambriolage. Le châtelain demande l'aide de la police qui lui rit au nez: Lupin ne peut rien voler tant qu'il est incarcéré.

Deux jours plus tard, un entrefilet paraît dans la presse locale. On peut y lire que l'ennemi juré de Lupin, l'inspecteur Ganimard, passe quelques jours de vacances à taquiner le goujon dans les environs du château. Le baron se précipite à la recherche de l'inspecteur pour se mettre sous sa protection. Il le supplie de passer au château la nuit du cambriolage annoncé. Ganimard refuse tout net. Il est incapable d'imaginer que Lupin, si astucieux soit-il, puisse mener son entreprise à bien pendant qu'il est en détention. Il se gausse du châtelain apeuré dont l'angoisse ne fait que croître. Finalement, comme on lui offre une forte somme, l'inspecteur accepte une mission sans risques et fort rémunératrice. La nuit arrive, Ganimard et quelques-uns de ses hommes s'installent au château. Le lendemain, la surprise est grande. Les policiers ont été drogués, ils sont tous endormis. Le malheureux propriétaire ne peut que déposer plainte contre le sieur Arsène Lupin, détenu à la prison de la Santé...

Pour que Lupin réussisse son coup, plusieurs conditions sont indispensables. Il faut d'abord que le baron Cahorn soit terrorisé quand il reçoit la lettre. Il faut encore que la police, mise au courant, refuse de prendre ses craintes au sérieux. Et finalement, il faut que le baron, une fois qu'il a retrouvé l'inspecteur, ne pense pas à vérifier son identité. La Sûreté Nationale lui aurait appris que Ganimard était à Paris et que le pêcheur si difficile à convaincre n'était qu'un faux Ganimard, sans aucun doute un membre de la bande de Lupin. En le faisant entrer au château, le baron introduit lui-même le loup dans la bergerie. Tout le plan de Lupin s'écroulerait si un seul engrenage grippait. De manière analogue, la production des éléments nécessaires à la vie serait remise en question si un seul des noyaux des trois isotopes ${}^8_4\text{Be}$, ${}^{12}_6\text{C}$ et ${}^{16}_8\text{O}$ avait un spectre différent.

Changement de perspective

L'histoire tient souvent à des détails, n'en déplaise à ceux qui n'y voient qu'un combat entre pouvoirs économiques et sociaux, et qui pensent que son issue est prédéterminée. Jusqu'à la découverte de la résonance à 7,65 MeV, de nombreux astronomes croyaient encore que les éléments s'étaient formés dans les premières minutes qui avaient suivi le Big Bang. Le jour où l'existence du niveau excité est avérée, aucun chercheur du Caltech ne met plus en doute l'hypothèse selon laquelle les éléments autres que l'hydrogène et l'hélium se forment dans les étoiles. Encore un ou deux ans, et cette conviction est partagée par la planète entière. Comme le dit Hoyle: «Le moment décisif avait eu lieu à l'instant où Fowler avait retenu son rire.» [82]

Il se trouve que, à l'insu de Hoyle et de Fowler, le fameux niveau excité avait déjà été découvert en 1940. Mais en 1951, une étude à haute résolution du spectre du carbone 12 n'avait pas confirmé son existence. Admettons que la fameuse résonance ait été connue de Hoyle au moment où il se mettait à réfléchir à la production du carbone et de l'oxygène dans les étoiles. Il se serait servi de cette information comme *argument* en faveur de la production de carbone en affirmant que l'existence du niveau excité était propre à favoriser la formation de carbone. Le raisonnement se serait ensuite poursuivi sans changement et l'on aurait compris comment se forment l'oxygène et les

éléments plus lourds. Mais Hoyle a beaucoup gagné à ce que l'existence du niveau à 7,65 MeV soit ignorée en 1952: en physique, *une prédiction théorique vérifiée par l'expérience entraîne la conviction* avec une force sans pareille. Les choses se passent de la même manière dans une enquête policière. Sherlock Holmes parvient à reconstituer une série d'événements à partir d'indices matériels qui échappent à l'inénarrable Dr. Watson, mais Maigret fait beaucoup mieux. Après s'être mis dans la peau des acteurs d'un assassinat, il imagine un scénario du crime puis, au moment de confondre son auteur, il lance l'un de ses collaborateurs à la recherche d'une information susceptible de corroborer son hypothèse. Il entraîne ainsi l'aveu du coupable et la conviction du lecteur – plus importante que celle du tribunal...

Avant de poursuivre, nous ne pouvons abandonner le Soleil, devenu une géante rouge, sans dire un mot de son destin ultime.

Cadavres stellaires

Quand, après certaines péripéties, le Soleil aura définitivement épuisé son carburant nucléaire, il obéira à nouveau aux injonctions de Kelvin. Sa température diminuera peu à peu. Ayant perdu toute source d'énergie capable de résister à l'effondrement, il verra son rayon diminuer jusqu'à ce qu'il atteigne un dernier équilibre, celui de la mort. Le Soleil sera devenu une sphère formée d'un *gaz électronique dégénéré*, un gaz où seuls comptent les électrons, les noyaux ne servant plus qu'à assurer sa neutralité électrique. Quand la compression est suffisante, la physique quantique nous enseigne que ce gaz peut résister à l'effondrement, même quand la chaleur l'abandonne. Cet équilibre sera réalisé quand le rayon du Soleil sera comparable à celui de la Terre et que sa densité moyenne sera un million de fois plus grande que celle de l'eau. Le Soleil sera devenu une *naine blanche*.

Les étoiles de masse supérieure au Soleil ont des histoires différentes, mais leur destin final n'est pas très différent. Dans ces étoiles, le gaz électronique, incapable de résister à la pression d'une masse trop grande, fait place à un *gaz neutronique dégénéré*: les électrons et les protons se combinent pour former des neutrons qui se joignent à ceux qui constituent les noyaux. L'étoile est devenue un gigantesque noyau dépourvu de charge électrique. On rencontrera cet objet exotique dans le chapitre qui suit.

Et si la masse initiale est décidément trop élevée? Le gaz de neutrons, lui aussi, devient instable. Plus rien ne s'oppose à un effondrement final. Tout ce qui constituait l'étoile disparaît tout en modifiant dans son voisinage les propriétés de l'espace et du temps. Il ne reste plus qu'un *trou noir*... De l'étoile initiale, il ne subsiste que la masse et la quantité de rotation⁵.

En ce qui concerne la production des éléments chimiques, il ne suffit pas de comprendre comment le carbone et l'oxygène se forment au sein des étoiles.

⁵ Et la charge électrique, mais cette éventualité est sans intérêt pour un corps plus massif que le Soleil...

Les astrophysiciens doivent encore envisager la formation de tous les éléments que l'on connaît dans l'univers. Les éléments plus lourds que le fer posent un gros problème car ils ne peuvent se former par fusion. Et pourtant, comme en témoigne le cas du technétium, ils proviennent également des étoiles.

Obtenu en 1937 en bombardant le molybdène avec des noyaux de *deutérium*, nom que l'on donne à l'isotope ${}^2_1\text{H}$, le *technétium* est un élément très particulier. Son nombre atomique n'est que de 43, et pourtant c'est un *élément artificiel*, comme son nom l'indique⁶. La raison en est simple: les treize isotopes du technétium sont instables, leurs demi-vies allant de quelques secondes à quelques millions d'années. C'est largement insuffisant pour que l'on retrouve dans les roches terrestres des traces de cet élément, à moins qu'on n'aille chercher dans les produits de décomposition d'un élément à très longue demi-vie, tel l'uranium. C'est le cas du technétium: on s'est aperçu qu'il avait été découvert en 1925 sans pour autant que cette observation ait été confirmée. Or, en 1956, un astronome du nom de Paul Merrill démontre son existence dans certaines atmosphères stellaires. L'élément ne pouvait y avoir été créé que «récemment», et dans l'étoile elle-même. On ne pouvait espérer une meilleure preuve que les éléments lourds sont réellement produits à l'intérieur des étoiles. Finalement, Hoyle, Fowler et le couple Burbidge réussirent à établir un scénario crédible de la formation des éléments dans les étoiles. L'article qu'ils publièrent en 1957 est considéré comme un monument de l'astrophysique nucléaire [83].

Comment les éléments lourds sont-ils parvenus sur Terre? A certaines étapes de l'évolution des étoiles massives, il arrive que de grandes quantités de matière soient expulsées, ce qui permet d'expliquer comment de tels éléments se retrouvent dans les nuages interstellaires ou sur des planètes comme la Terre. C'est notamment ce qui arrive quand apparaît une supernova.

Coïncidences numériques et constantes universelles

«Je ne crois pas qu'un savant qui aurait étudié [le problème de la production du carbone dans les étoiles] puisse éviter la conclusion selon laquelle les lois de la physique nucléaire ont été délibérément choisies en fonction de leurs conséquences à l'intérieur des étoiles. Si c'est bien le cas, les coïncidences que j'ai découvertes font partie d'un plan obscur. Si ce n'est pas le cas, alors il faut se résigner à n'y voir qu'une série monstrueuse d'accidents.» Cette déclaration de Fred Hoyle date de 1959. On la trouve dans un texte intitulé *Religion and the Scientist* [84], si bien que le titre même de cette publication montre à quel point ces problèmes débordent du cadre de la science.

La première remarque que l'on peut faire, c'est que les coïncidences favorables à la vie n'ont pas attendu Hoyle pour se manifester. Un exemple bien connu suffira à convaincre le lecteur: les propriétés de l'eau en font une substance à part. C'est un dissolvant très puissant. Une nappe d'eau constitue

⁶ En grec, *technetos* signifie «artificiel».

un excellent réservoir de chaleur, sa température ne variant que lentement quand les conditions météorologiques changent. La glace est moins dense que la forme liquide de l'eau, si bien que les lacs et les étangs ne gèlent qu'en surface. La couche de glace est fréquemment séparée du liquide par une couche d'air isolante... On n'en finirait pas de citer les anomalies de cette substance à la fois commune et étrange dont les propriétés sont si importantes pour les êtres vivants. [18] Il faut pourtant rappeler que l'existence de l'eau a précédé celle des habitants de la Terre qui, au cours de l'évolution, ont dû s'adapter à leur environnement liquide. Nous risquons de mettre la charrue devant les bœufs si nous interprétons la faculté des êtres vivants à s'adapter aux propriétés aquatiques comme une préadaptation hypothétique du milieu à ses futurs hôtes.

Les coïncidences relevées par Hoyle, paraissent plus sérieuses. Sans elles, pas de carbone et pas de vie du tout. Mais s'agit-il réellement de coïncidences? Imaginons que vous emménagiez dans un immeuble de vingt appartements et que vous constatiez que dix-huit d'entre eux sont occupés par des gens qui portent le nom de Cartier. Il se peut que l'on vous dise que tous ces Cartier appartiennent à une même famille, farouchement opposée à la limitation des naissances. Vous cesseriez alors d'être surpris car il ne s'agirait que d'une fausse coïncidence. Mais elle deviendrait remarquable si ces homonymes n'avaient aucun lien de parenté et venaient des horizons les plus divers.

Les coïncidences relevées par Hoyle, relèvent-elles plutôt de la première ou de la seconde catégorie? Pour répondre à cette question, il faut procéder comme avec les Cartier et se demander ce qui détermine la valeur numérique de chacun des milliers de niveaux nucléaires. Ces valeurs sont-elles indépendantes les unes des autres?

La réponse est négative. La connaissance des valeurs numériques de quelques *constantes universelles* est suffisante pour que soient déterminés les spectres de l'ensemble des noyaux. Ces constantes sont les masses du proton et du neutron, la charge élémentaire e , la vitesse de la lumière c et la *constante de Planck* h , qui joue un rôle fondamental dans le monde microscopique où la mécanique quantique fait la loi. A cette liste s'ajoute une autre grandeur dont la valeur fixe l'intensité des forces attractives entre nucléons, ces forces qui assurent la stabilité de nombreux noyaux. Si ces constantes sont dites «universelles», c'est que leurs valeurs sont les mêmes d'un point à un autre de l'univers observable et qu'elles n'ont pas varié au cours de l'histoire de l'univers: quand on observe une galaxie située à cinq milliards d'années-lumière, on la voit telle qu'elle était il y a cinq milliards d'années. Cette circonstance permet de vérifier que les «constantes» sont réellement invariables. Il convient de remarquer que, même s'il est possible sur le principe, le passage de la valeur numérique des constantes universelles à celle d'un niveau nucléaire particulier nécessiterait des calculs d'une complexité immense.

Modifier les constantes

Dans un futur proche ou lointain, on peut imaginer que les physiciens seront en mesure d'expliquer pourquoi la vitesse de la lumière dans le vide vaut

300 000 km/s et non pas 900 m/s, pourquoi la charge élémentaire n'est pas 1000 fois plus grande, pourquoi la constante de Planck n'est pas deux fois plus faible... Jusqu'ici, on ne sait pas le faire et on ignore si la chose est possible.

A un apprenti sorcier recevant les clés de l'univers, son maître dirait sans doute: «Tu peux jouer avec les anneaux de Saturne et quelques comètes, mais ne t'avise pas de toucher aux constantes universelles. Ce serait un cataclysme épouvantable!» Si l'on modifiait au hasard – et *rétroactivement* – les valeurs numériques des constantes universelles, les coïncidences notées par Hoyle disparaîtraient, ce qui entraînerait une modification catastrophique de l'abondance actuelle des éléments dans l'univers et rendrait sans doute impossible l'apparition de la vie. Mais les conséquences ne s'arrêteraient pas là. La liste des catastrophes virtuelles qui s'ensuivraient serait à la fois longue et difficile à dresser. [18]

Imaginons l'apprenti sorcier dans la salle des coffres d'une improbable banque. La salle est illimitée, elle contient à perte de vue des coffres tous semblables, alignés les uns sur les autres. D'un coffre à l'autre, la combinaison permettant d'ouvrir la porte change aléatoirement. Toutes les combinaisons sont représentées, chacune d'elle correspondant à un coffre unique contenant sa propre «recette d'univers». Il n'y a qu'une combinaison qui donne la recette de l'univers que nous connaissons, un univers lourd de sa variété, de sa beauté et de sa cruauté. Si l'apprenti sorcier perd la combinaison, il peut en former une autre et l'essayer au hasard. Il finira bien par trouver un coffre dont la porte s'ouvre. Mais la recette qu'il y trouverait ne lui permettrait de construire qu'un univers sans forme et sans saveur, une copie du chaos⁷ décrit au début de la Genèse: «les ténèbres couvraient la surface de l'abîme», un abîme rempli d'un nuage d'hydrogène et d'hélium ou d'un trou noir gigantesque, ou de n'importe quel milieu dépourvu de structure et de variété.

La liste complète des constantes universelles est plus longue que celle qui a été esquissée plus haut. Dans quelle mesure ces constantes peuvent-elles être modifiées indépendamment les unes des autres? Et si, au lieu d'être arbitraires, ces constantes étaient fixées irrémédiablement par des règles inconnes? Nous l'ignorons. Il faut garder cette ignorance à l'esprit quand on spéculé sur ces étranges manipulations.

Quelle attitude prendre face aux coïncidences numériques?

Si l'on revient à Hoyle, on peut mesurer le choc qu'il a subi. Il s'imaginait peut-être que les valeurs numériques des constantes universelles étaient aléatoires. Probablement n'avait-il guère songé à la question. Et, brusquement, il se rend compte que, si ces valeurs étaient différentes, le monde que nous connaissons sombrerait dans le néant. Quelle réaction peut-on avoir face à une pareille situation?

⁷ Du latin *chaos*, «état de confusion ayant précédé l'organisation du monde». Chaos traduisait le mot hébreu connu en français sous la forme *tohu-bohu*. [85]

Une remarque s'impose d'emblée. Si la valeur des diverses constantes n'avait pas autorisé l'apparition de la vie, nous ne serions pas là pour en discuter. S'il s'agit d'une série (heureuse?) de coïncidences, il fallait bien qu'elle soit réalisée pour que nous nous interroguions sur sa signification. Cela dit, plusieurs attitudes sont possibles.

On peut imiter les cosmologistes qui s'interrogent sur la structure de l'univers au moment de sa naissance. Ils ne se contentent plus de remonter au premier centième de seconde, là où nous nous étions arrêtés au chapitre 5. Ils se rapprochent encore bien plus près du Big Bang. Cette période initiale semble avoir été le théâtre d'événements singuliers permettant peut-être d'expliquer la suite de l'histoire. [86]

On peut encore suivre les efforts des physiciens qui édifient ce qu'ils appellent le TOE⁸, pour *Theory of Everything*, littéralement «la théorie qui explique tout», un peu comme le faisaient hardiment les philosophes grecs présocratiques. [32] Le but n'est pas encore atteint: le TOE est comme l'arc-en-ciel qui recule à mesure qu'on cherche à s'en approcher.

On peut enfin se ranger sous la bannière des adeptes de la «version forte» du *principe anthropique*⁹ qui s'énonce ainsi: «L'univers doit avoir des propriétés telles que la vie puisse apparaître à un moment de son histoire.» [18] C'est là un des avatars du *principe de finalité* qui affirme que l'univers tend vers un but fixé à l'avance. Ce principe n'appartient pas aux sciences exactes ou naturelles. Leurs méthodes d'investigation et leur corps de doctrine n'ont pas besoin de la notion de finalité pour former un tout cohérent et harmonieux. Bien au contraire. Paul Davies résume l'opposition entre deux visions du monde inconciliables: «D'un côté se tient la science orthodoxe et sa philosophie nihiliste d'un univers sans signification [...], un cosmos dans lequel la vie et l'esprit, la science et l'art, l'espoir et la crainte ne sont que des ornements aléatoires d'une tapisserie [...] cosmique irréversible. Face à cette vision, il en existe une autre. Elle est indiscutablement romantique, ce qui n'exclut pas qu'elle puisse correspondre à la réalité. C'est la vision d'un univers qui s'organise et accroît lui-même sa complexité. Cet univers-ci est soumis à de subtiles lois qui favorisent l'évolution de la matière vers l'apparition de la vie et de la conscience.» [87] Le «plan obscur» que Hoyle entrevoyait [84] le range avec Davies parmi ceux qui préfèrent la seconde vision.

Hoyle a souffert de la position philosophique qu'il a fait sienne: «[...] Pour un chercheur scientifique, il vaudrait mieux porter une meule autour du cou que de reconnaître qu'il croit [au principe de finalité]. S'il fait cet aveu, ses publications seront rejetées, il ne recevra plus de subsides pour ses recherches, les éditeurs qui accepteraient de publier ses livres recevront des lettres de menaces et l'on houspillera ses enfants au retour de l'école.» [81] Cette citation de Hoyle a beau être formulée en termes généraux, elle a incontestablement un caractère autobiographique. Hoyle a souffert de l'intolérance de la communauté scientifique contemporaine qui, lorsque l'on évoque l'idée de Dieu, réagit comme le taureau devant lequel on agite la muleta. Si Hoyle avait

⁸ En anglais, «toe» signifie orteil.

⁹ Du grec *anthropos*, l'être humain.

des raisons objectives de se plaindre de l'attitude de ses pairs, si le rejet dont il affirmait être la victime est réellement dû à sa position philosophique, on ne peut que le déplorer. S'il est un cercle où la tolérance devrait être pratiquée, c'est bien celui de la communauté scientifique.

Finalité...

Dans les religions monothéistes, la pensée religieuse est dominée par la conviction que la création de l'univers répond à une finalité manifeste. Les versets de la Genèse qui figurent au début de ce chapitre en témoignent: l'univers a été créé par Dieu pour l'être humain. Mais la finalité a un sens plus général. C'est une conception selon laquelle l'univers évolue dans un but précis. Il tend vers une harmonie à venir. Le principe de finalité satisfait notre intuition mais il est incompatible avec la science telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui. Cela n'a pas toujours été le cas. La *théorie des quatre causes* d'Aristote (env. 384-322 av. J.-C) y est sans doute pour quelque chose. L'exemple de la statue en donne une idée.

La *cause matérielle* nous apprend de quelle matière est constituée la statue, le marbre par exemple. La *cause formelle* se rapporte à la forme de la statue, comme si la mise en forme se heurtait à la résistance du matériau brut. Nous restons perplexes devant ces deux concepts, bien distincts de la notion actuelle de cause. Leur manque de pertinence doit nous rappeler que la physique que nous connaissons n'existait pas à l'époque d'Aristote, bien qu'il fût lui-même l'auteur d'un ouvrage portant précisément ce nom... La notion de *cause efficiente*, en revanche, nous la reconnaissons parfaitement. Elle désigne en l'occurrence le sculpteur qui a tiré la statue du bloc de marbre.

Il reste un quatrième type de cause, sans doute celle qu'Aristote considérait comme la plus importante, la *cause finale*, autrement dit le but dans lequel la statue a été créée. De la notion de cause finale a émergé l'idée que le sens attaché aux objets et aux créatures doit être cherché dans leur «fin» plutôt que dans leur configuration actuelle. [18] L'observation de la nature et des êtres vivants offre un vaste théâtre où le principe de finalité trouve un emploi, qu'il soit justifié ou non. Nous ne cessons d'y recourir, aujourd'hui comme autrefois: l'oiseau possède des ailes «pour voler», le poisson a des nageoires «pour nager», le caméléon peut changer de couleur «pour échapper à ses prédateurs»... La liste ne s'arrête pas là. Darwin avait été charmé par l'argumentation d'un Paley qui mettait son talent d'écrivain au service de son hymne à la perfection de la nature. Il y décelait la preuve éclatante de l'existence d'un Grand Horloger (chap. 1). Même ce mécréant de Voltaire a écrit un jour

«L'univers m'embarrasse, et je ne puis songer
Que cette horloge existe et n'ait pas d'horloger.» [88]

Ce finalisme, que nous voyons sans cesse à l'œuvre, ne s'est pas relevé des coups que Darwin lui a assésés en substituant la sélection naturelle aux desseins du Grand Horloger. Selon le mot de Dawkins, le Grand Horloger a perdu de sa superbe en se transformant en un «Horloger aveugle». [16]

Depuis que l'homme a domestiqué le chien, il a procédé à la *sélection artificielle* et il a obtenu ainsi des lignées de limiers ou de gardiens de troupeaux. Rien ne diffère plus d'un minuscule Yorkshire qu'un gigantesque dogue allemand. Il n'y a guère plus de dix mille ans, pourtant, qu'ils se sont séparés de leur ancêtre commun, le loup. Comme l'éleveur de chiens, la sélection naturelle est chaque jour à l'œuvre. Elle est aveugle et ne dispose pas des mêmes armes que l'éleveur, mais elle a disposé d'un temps bien plus considérable pour créer de nouvelles espèces, si bien que la variété des organismes vivants est incomparable. Nous savons que la sélection naturelle agit sur toutes les espèces vivantes et nous sommes incapables de donner un seul exemple qui la mettrait en défaut. Le hasard est le seul moteur de son action et personne n'est parvenu à lui opposer une théorie concurrente crédible.

Les défenseurs de la théorie de Darwin ont longtemps souligné l'*augmentation de complexité* qui jalonne l'évolution. L'apparition des poissons précède celle des amphibiens et des reptiles. Les oiseaux et les mammifères sont venus plus tard et les primates ont précédé les premiers hommes. Qui dit complexité croissante dit progrès, une notion qui n'est pas si éloignée du concept de finalité. L'être humain vient en dernier, il est donc le couronnement de la création... et l'on se retrouve comme par enchantement renvoyé à la conception de la Genèse. Mais personne ne saurait affirmer aujourd'hui que cette augmentation de complexité a une autre origine que les lois du hasard.¹⁰

...ou déterminisme?

A partir de Galilée, et notamment avec Darwin, la science s'est efforcée de se dégager de l'emprise de la religion. Newton est considéré comme le plus grand physicien de tous les temps. En se consacrant à la physique et aux mathématiques, puis en se plongeant dans la théologie et l'alchimie, il a voulu pénétrer le dessein de Dieu. Ironie de l'histoire, il a été l'un des principaux architectes d'une méthode scientifique destinée à rejeter toute finalité.

La science s'oppose au principe de finalité parce qu'elle n'en a nul besoin. Comment démontrer qu'un tel principe est à l'œuvre? Il est à craindre que ce soit impossible. Certains veulent voir une finalité dans l'évolution à cause de l'augmentation de complexité qui la caractérise, mais une discipline historique ne se prête pas à l'expérience. Personne ne peut recréer la vie à partir des conditions qui régnaient sur Terre lors de son apparition, notamment parce que nous les ignorons, et sans doute parce que nous en serions incapables. Personne ne peut faire évoluer les poissons en espérant assister à l'émergence d'un quelconque amphibien ou d'un improbable reptile: l'expérience durerait deux cent millions d'années et il faudrait chasser des océans, des mers, des

¹⁰ Parmi les spécialistes de l'évolution, il existe aujourd'hui un courant important qui, pour éviter toute dérive idéologique, en vient à contester que l'évolution s'accompagne d'une augmentation de la complexité. C'est le cas de Stephen Jay Gould, le grand paléontologiste vulgarisateur qui, dans *L'éventail du vivant* [89], avance des arguments statistiques très contestables pour soutenir son point de vue.

lacs et même de la Terre ferme toute la faune et toute la flore actuelles et les remplacer par celles qui existaient à la fin du Cambrien (tab. 4.2). Nous en sommes réduits à constater que la sélection naturelle est un mécanisme parfaitement plausible de l'évolution, que nous connaissons des exemples précis où elle fonctionne bien et que nous n'avons rien de mieux à proposer. Tant que l'on n'aura pas démontré que l'évolution est incompréhensible sans la finalité, la science doit renoncer à associer ces deux notions. Or une pareille démonstration est incompatible avec la méthode scientifique qui se satisfait des causes efficientes et ne sait que faire des causes finales. L'adoption d'un principe de finalité dans l'évolution est une croyance et non un problème scientifique.

Pour ceux qui auraient de la peine à accepter une telle affirmation, il est bon de rappeler que la situation est la même en ce qui concerne les miracles. Même l'Eglise est restrictive quand il s'agit de les enregistrer. Se servir de la science pour démontrer qu'un phénomène mystérieux ne peut s'expliquer sans le recours à une intervention divine constitue une grave entorse à la logique. La science ne traite que des *phénomènes reproductibles*, les processus qui se produisent à chaque fois que des conditions prescrites à l'avance sont réalisées. Elle n'a rien à dire de ceux qui n'arrivent qu'une seule fois et qui ont lieu pour des raisons qui, précisément, lui échappent.

Dans les sciences exactes, les choses paraissent plus claires. Les objets inanimés n'échappent pas aux lois auxquelles ils sont soumis. Lors d'un concours de tir à l'arc, toutes les flèches obéissent aux mêmes lois; si les projectiles ne touchent pas la cible au même point, c'est que les *conditions initiales* diffèrent à chaque coup. En l'occurrence, il s'agit de l'orientation de l'arc et de la tension de la corde. Chaque archer s'efforce de fixer au mieux la vitesse et la direction initiales de la flèche car, une fois qu'elle sera lâchée, il ne pourra plus agir sur elle, *son évolution étant complètement déterminée*¹¹. Il y a un but – une fin – mais elle est le fait de l'archer lors de la visée. Elle échappe à la balistique.

Le *déterminisme* est l'extension de cette conception à l'ensemble des lois de la nature, illustrée par une phrase souvent citée du physicien français Pierre-Simon de Laplace (1749-1827): «Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.» [90]

Cette vue domine les sciences exactes du XIX^e siècle. Elle transforme l'univers en un gigantesque engrenage qui tourne sans états d'âme et moud notre avenir à partir de notre passé. La science moderne a tempéré cette image en introduisant la notion de probabilité au niveau de l'atome. Devant un noyau d'uranium, le physicien est partiellement désarmé. Il connaît la durée de sa

¹¹ On néglige ici le fait que les flèches peuvent différer entre elles, que le vent peut souffler par rafales et d'autres effets du même genre.

demi-vie, déterminée par l'observation d'un nombre considérable de désintégrations. Mais si, grâce à la statistique, il peut prévoir le destin collectif d'un grand nombre de noyaux, il est foncièrement incapable de prévoir l'instant de la disparition d'un noyau particulier. C'est une impossibilité de principe qui a fait couler beaucoup d'encre lors de l'avènement de la physique quantique puisqu'elle limite de manière partielle, mais inexorable, le déterminisme si bien défini par Laplace. Einstein n'a jamais voulu accepter ce point de vue. On lui attribue cette formule: «Dieu ne joue pas aux dés».

En définitive, si une certaine finalité est compatible avec la physique, c'est dans les conditions initiales qu'il faut la chercher. La position de Hoyle est illustrée par la citation dans laquelle il évoque «un plan obscur» pour expliquer les coïncidences qu'il a mises en évidence. *Elle consiste à voir à l'œuvre un principe de finalité dans le choix des constantes universelles de l'univers*. Sa position, faut-il le répéter, relève de la croyance et non de la science. Dans la situation actuelle de la cosmologie, il en est de même de celle de ses adversaires. On est tenté de dire que les choses ne sont pas près de changer.

Le meilleur des mondes possibles

«[...] Si nous étions capables de comprendre suffisamment bien l'ordre de l'univers, nous trouverions qu'il l'emporte sur tous les désirs du plus sage d'entre nous et qu'il est impossible de l'améliorer, non seulement pour le bien commun, mais aussi pour chacun de nous en particulier.» [91] Ces mots sont de Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716), philosophe allemand, mais aussi mathématicien, historien et juriste. Ils lui ont valu de survivre dans la mémoire populaire sous les traits de l'immortel Docteur Pangloss, le précepteur de Candide qui, malgré les malheurs qui l'accablent, ne cesse de répéter un aphorisme qui résume heureusement les mots de Leibniz, tout en trahissant sa pensée:

«Tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles.» [92]

Pour un auteur satirique comme Voltaire, un pareil credo constituait une véritable provocation. Or, indépendamment de Newton, Leibniz est le créateur du calcul différentiel et intégral, l'outil mathématique le plus important de la physique classique. Il ne peut avoir été le personnage farfelu et irresponsable tourné en ridicule par Voltaire. La formule attribuée à Leibniz a un sens profond que celui que lui prête Voltaire par la bouche de Pangloss.

Pour Leibniz, Dieu peut créer un univers de bien des manières, mais il doit respecter le principe de non-contradiction. Un objet qui serait à la fois un triangle et un cercle ne peut être créé. En revanche, tout ce qui est possible est susceptible d'exister. Dieu peut donner naissance à tous les univers dépourvus de contradiction, chacun d'eux se caractérisant par une histoire particulière. Il y a l'univers que nous connaissons, mais il y aussi l'univers dans lequel Antoine aurait battu Octave à la bataille d'Actium, l'univers où la bibliothèque d'Alexandrie n'aurait pas brûlé, l'univers où Newton, au lieu de se réfugier dans le Lincolnshire à Woolsthorpe et d'y découvrir la loi de la gravitation

universelle, aurait succombé à l'épidémie de peste qui dévastait l'Angleterre... Il y a un nombre inimaginable d'univers possibles que Dieu embrasse dans leur totalité, et entre lesquels il a choisi le nôtre, le seul qui soit parvenu à l'existence. Quelle est le critère de ce choix? C'est la perfection, mais Leibniz ne donne pas à ce concept le même sens que Pangloss: *Dieu cherche un monde pourvu de lois simples et présentant une diversité extrême*. Comme l'écrit Ivar Ekeland, «[...] le meilleur des mondes possibles doit avant tout être possible, [...] il doit accommoder [...] des êtres fort différents sous les mêmes lois. Cela ne peut que conduire à des compromis qui ne seront pas tous satisfaisants pour l'ensemble des personnes concernées. [...] *Le meilleur des mondes possibles n'est pas nécessairement un monde où il fait bon vivre*.¹²» [93]

Peut-être notre monde n'est-il pas seulement le meilleur des mondes possibles, mais tout simplement le seul... Dans ce cas, l'apprenti sorcier n'aurait pas à se soucier de la combinaison car le coffre serait unique et la combinaison inscrite sur la porte. La cosmologie théorique cherche des éléments de réponse à de telles questions.

Au-delà de la confusion

La science moderne rejette avec agacement les débats philosophiques issus des coïncidences révélées par Hoyle. Elles sont pourtant l'occasion de soulever des questions qu'elle ne peut éviter de poser, que ces coïncidences aient été révélées ou non. Il est important d'en dresser la liste.

La première question concerne la formation de l'univers dans l'infime fraction de seconde où tout s'est décidé, où les lois de la physique se sont peut-être constituées, «bien avant» le premier centième de seconde. Nous n'en avons pas parlé ici, le problème étant trop complexe et trop spéculatif pour qu'on puisse discuter ici de cette période initiale. [86]

La deuxième question est ancienne mais intéresse une part de plus en plus importante de la communauté scientifique. *Comment la vie est-elle apparue?* Nous n'avons que des fragments de réponses à lui apporter, ce qui sera fait au chapitre 10, et il y a fort à parier que les choses ne vont pas changer rapidement, tant notre ignorance est grande des débuts de cette incroyable aventure. [94]

La troisième interrogation suit de près la seconde. *La vie est-elle apparue ailleurs que sur Terre? Existe-t-elle sur une autre planète ou sur un satellite appartenant à notre système solaire? Peut-elle passer d'une planète à l'autre?* Cette dernière question a été effleurée au chapitre 5. On a des raisons de croire que de nouvelles missions spatiales nous en apprendront plus à ce sujet. Il est même possible que, dans un avenir encore lointain, l'étude de l'atmosphère d'une planète extrasolaire nous révèle quelques indices à ce propos.

L'apparition de la vie implique-t-elle l'émergence d'une intelligence analogue ou supérieure à la nôtre? Les biologistes n'aiment pas cette idée, alors que les physiciens et les astronomes lui sont souvent favorables. Le chapitre 8

¹² C'est nous qui soulignons.

apportera un élément de réponse à une telle question, si importante pour l'image que nous nous faisons de notre place dans l'univers.

Quant à l'existence d'un principe de finalité dans notre univers, il constitue une résurgence du débat entre science et religion. La grande majorité des scientifiques sont convaincus que ces deux domaines de la pensée humaine ne se recoupent pas, qu'ils ne communiquent pas et qu'ils n'ont rien à se dire. Quant aux théologiens, ils n'ont pas de raison de défendre un autre point de vue. Il y a longtemps qu'ils ont dû renoncer à toute démonstration de l'existence de Dieu. Comment pourraient-ils l'attendre de la science? Mauriac est bien de cet avis: «[...] c'est l'évidence [...] que miracles et prophéties ne sont point des preuves suffisantes et qu'elles n'ont guère plus de valeur pratique pour vaincre le doute "que le cours de la lune et des planètes" dont Pascal trouve si ridicule l'abus qu'en ont fait tant d'apologistes.» [95]

«Alors l'Éternel Dieu fit tomber un profond sommeil sur l'homme, qui s'endormit; il prit l'une de ses côtes, à la place de laquelle il referma la chair. De la côte qu'il avait prise à l'homme, l'Éternel Dieu forma une femme qu'il amena à l'homme.»
[Genèse 2, 21-22]

Veiller le jour, dormir la nuit

En automne 1967, une jeune Irlandaise du Nord du nom de Jocelyn Bell est plongée dans un travail ardu de dépouillement des données que fournit jour et nuit le *radiotélescope* du Mullard Radio Astronomy Laboratory de Cambridge (Angleterre).

Aussi loin qu'elle s'en souvienne, Jocelyn a été fascinée par l'astronomie. Probablement parce que, dans son enfance, elle accompagnait son architecte de père quand il se rendait dans la ville d'Armagh. Il avait reçu pour mission d'en moderniser l'observatoire. Mais Jocelyn craignait de devoir renoncer à cette vocation précoce car, il y a quelques décennies, tout astronome devait, comme la chouette, dormir le jour et veiller la nuit. Jocelyn se sentait incapable de vivre ainsi à «contre-jour». Or l'avènement du radiotélescope lui permet de suivre son penchant: le radioastronome n'est pratiquement pas gêné par la présence du Soleil. Ses observations peuvent se faire de jour comme de nuit. Ce nouvel instrument va permettre à Jocelyn de découvrir des étoiles extraordinaires qui jettent un pont entre le monde subatomique et le cosmos:

«There are more things in the heaven and earth, Horatio,
Than are dreamt of in your philosophy.¹» [96]

Sept ans plus tard, le prix Nobel de physique couronne cette découverte. Il va au patron de Jocelyn, Anthony Hewish, le directeur du projet de recherche auquel elle participait. Lors de la cérémonie d'attribution du prix, le nom de Jocelyn est à peine mentionné et son rôle est outrageusement réduit. Pourtant, dans la masse des données quotidiennes qu'elle devait dépouiller, c'est Jocelyn qui a découvert un signal inhabituel. Sans être rebutée par le peu d'intérêt que Hewish avait d'abord accordé à sa trouvaille, c'est elle qui a démontré que le signal provenait d'une source stellaire. Dans cette affaire, la communauté scientifique voit une injustice. Elle est choquée du peu de cas que le comité Nobel a fait du rôle de Jocelyn lors cette découverte. Bien malgré elle, Jocelyn se retrouve au cœur d'une polémique à laquelle participe

¹ Il y a plus de choses sur la Terre comme au ciel, Horatio, que tu n'as pu faire de rêves dans ta philosophie.

la presse populaire: «Etes-vous plus grande ou plus petite que la princesse Margaret?» Jocelyn ne perd pas sa sérénité: «Nous avons de drôles d'unités de mesure en Grande Bretagne!» [27]

Un examen sélectif très précoce

Jocelyn Bell est née à Belfast en 1943 d'une famille appartenant à la *Société des Amis*, un mouvement protestant créé en 1652 par George Fox (1624-1691). Comparaisant devant un tribunal, Fox aurait apostrophé le juge: «Tremble devant la colère de Dieu!» Le juge aurait alors dit: «Vous n'êtes que des trembleurs!» En anglais, trembleur se dit *quaker*, ce qui expliquerait l'origine du nom sous lequel sont connus les membres de cette société. Les quakers font confiance à l'Esprit Saint plutôt qu'à l'autorité de l'Écriture: ils croient à l'esprit plus qu'à la lettre. Ils pratiquent la philanthropie, un terme tombé en désuétude. Les quakers ne reconnaissent pas le droit de légitime défense et se proclament objecteurs de conscience. Durant la Seconde Guerre mondiale, au lieu de se battre, ils mirent sur pied le Secours Quaker International, ce qui leur valut le prix Nobel de la paix 1947. Ce comportement qui domine la vie de Jocelyn Bell ne se rencontre que rarement chez les politiciens, les artistes ou les savants chez qui l'*ego* est bien souvent hypertrophié. Les quakers n'ont jamais été très nombreux; aujourd'hui, on en compte environ 200 000 de par le monde. Compte tenu de leur effectif réduit, leur contribution à la science a été considérable. La liste des savants fameux appartenant à la Société des Amis comporte notamment le chimiste anglais John Dalton (1766-1844), un des pionniers de la théorie atomique, le chirurgien anglais Joseph Lister (1827-1912), promoteur de l'antisepsie, et l'astronome et physicien anglais Arthur Eddington, dont il a été question plus haut. D'après Sharon B. McGrayne, un quaker anglais a cinquante fois plus de chances que ses compatriotes d'être élu à la prestigieuse Royal Society, l'académie des sciences du Royaume-Uni [27]. Ce qui suggère que, dans les sciences tout au moins, la réussite dépend considérablement des valeurs prisées et cultivées dans l'environnement de l'enfant, et notamment dans sa famille.

Même si son enfance est heureuse, Jocelyn subit un choc à l'âge de onze ans: elle échoue à l'*eleven-plus*, l'examen qui, en Grande Bretagne, décidait de la carrière des enfants. Ils devaient le réussir pour entrer au lycée public. Aujourd'hui, cet examen sélectif précoce a disparu. Bien qu'ils aient quatre enfants et que leurs moyens soient limités, les parents de Jocelyn décident de l'envoyer dans une école privée de York dirigée par des quakers. Elle y entre à l'âge de 13 ans. Désormais, son parcours scolaire se déroule sans heurts. En 1961, elle s'inscrit à l'Université de Glasgow. Malgré sa préférence pour l'astronomie, elle y étudie la physique puis, en 1965, ses études terminées, elle commence une thèse en radioastronomie à la fameuse Université de Cambridge. Son patron, Anthony Hewish, est né en 1924. Avec l'aide de son groupe, Hewish est en train de construire un radiotélescope permettant d'étudier des sources radio très éloignées mais très puissantes.

Avant d'aller plus loin, il convient de comprendre en quoi le télescope usuel et le radiotélescope différent, et pourquoi le second fonctionne aussi

bien le jour que la nuit. La réponse à cette question passe par une comparaison entre ondes lumineuses et ondes radio.

Ondes radio et lumière: une question de fréquence

Les ondes radio présentent de nombreuses analogies avec les ondes lumineuses (chap. 2). Quand elles sont dues à l'activité humaine, elles résultent de l'oscillation rapide du courant électrique dans une antenne. Elles transportent alors les messages émis par les émetteurs de radio ou de télévision. Mais les ondes radio ne sont pas exclusivement dues à l'action de l'homme. Durant un orage, les éclairs sont la source d'ondes radio. Le Soleil et certains corps célestes peuvent également en émettre.

Comme la lumière, les ondes radio se propagent dans le vide à la vitesse de 300 000 km/sec. Nombreux sont ceux qui se souviennent des missions Apollo au cours desquelles des astronautes se sont posés sur la Lune. Bien que le son et les images fussent mauvais, les explorateurs de notre satellite pouvaient communiquer avec la base de Houston par l'entremise des ondes radio. Quand le véhicule en orbite lunaire passait derrière la Lune et devenait invisible, la communication radio était également interrompue. Décidément, les ondes radio et la lumière ont bien des propriétés en commun. Cependant, alors que notre œil est sensible aux ondes lumineuses, nous n'avons pas d'organe des sens susceptible de capter les ondes radio. C'est que les fréquences qui les caractérisent sont approximativement comprises entre 10 000 et 10 milliards de hertz, un domaine bien inférieur à celui auquel appartiennent les ondes lumineuses (fig 2.1).

Si nous envisageons les relations que les ondes électromagnétiques entretiennent avec notre propre corps, nous notons des différences considérables selon la valeur de leur fréquence. Alors que les ondes radio n'ont aucun effet direct sur nous, les micro-ondes peuvent littéralement nous faire cuire. Les infrarouges nous communiquent de la chaleur, les ultraviolets nous permettent de bronzer et sont à l'origine de nos coups de soleil, les rayons X donnent aux médecins la possibilité de déceler nos fractures et nos tumeurs. Comme le rayonnement gamma, ils deviennent dangereux en cas d'exposition prolongée. Mais la bande du visible, si restreinte, est bien plus extraordinaire que tout le reste du spectre. Nous disposons de deux petits organes capables de transformer l'information contenue dans le rayonnement lumineux. Ces organes sont nos yeux et nous appelons *image* le résultat du traitement de l'information par notre cerveau.

Notre œil est un récepteur incomparable. De jour, il nous donne une image à la fois précise et colorée de notre environnement. En revanche, si nous dirigeons notre regard vers le ciel, le soleil nous masque pratiquement toutes les autres sources lumineuses de l'espace en embrasant l'atmosphère. De nuit, tout change et nous percevons

Bien plus, les performances de notre œil sont telles que nous sommes capables de distinguer deux astres séparés d'une seule *minute d'arc*, une mesure de notre *acuité visuelle*. Elle caractérise la richesse des images qui se forment sur notre rétine. Les lunettes et les télescopes réalisent des performances encore supérieures. On caractérise l'instrument d'optique par son *pouvoir séparateur*, l'équivalent technique de l'acuité visuelle. Peut-on expliquer qu'une fenêtre minuscule du spectre des ondes électromagnétiques, la bande du visible, joue un rôle si exceptionnel chez les animaux – à travers la vision – et chez les plantes – grâce à la photosynthèse?

Pourquoi la bande du visible jouit-elle d'un tel privilège en biologie?

Une réponse à cette question, même partielle, déborderait largement du cadre de cet ouvrage. On se contentera d'une remarque très générale.

La *longueur d'onde* est la distance parcourue par une onde durant une oscillation. Pour s'en faire une image simple, le lecteur peut s'imaginer l'eau calme d'un étang au bord duquel un pêcheur observe paresseusement le flotteur qui oscille au passage des rides qui animent la surface de l'eau. Ce sont des ondes, l'étymologie en est la preuve. Entre le passage de deux crêtes successives, le bouchon oscille une fois et la distance qui les sépare n'est autre que la longueur d'onde d'un train de rides.

De manière générale, quand une onde électromagnétique se propage dans le vide, le produit de sa fréquence par sa longueur d'onde est égal à la *vitesse de la lumière* dans le vide. Pour caractériser cette onde, on peut tout aussi bien se servir de sa longueur d'onde que de sa fréquence puisque la connaissance de l'une entraîne automatiquement celle de l'autre. Pour des raisons de commodité, on préfère parfois étiqueter les ondes électromagnétiques à l'aide de leur longueur d'onde.

Dans la bande du visible, la longueur d'onde va de 400 nm (violet extrême) à 700 nm (rouge extrême), un nanomètre (nm) étant égal à 10^{-9} m. Quand on passe successivement des IR aux micro-ondes et aux ondes radio, la longueur d'onde augmente. Dans le dernier cas, elle peut aller de quelques décimètres à plusieurs centaines de mètres. Et si l'on passe par les UV pour atteindre les rayons X et le rayonnement gamma, la longueur d'onde diminue sans cesse pour atteindre des valeurs comparables à la dimension du noyau atomique (fig. 2.1).

Selon la théorie de l'évolution, le monde vivant s'est transformé progressivement sous l'effet de la sélection naturelle, de nombreuses espèces disparaissant au profit de nouveaux groupes d'animaux ou de plantes. Pendant plus d'un milliard d'années, les *unicellulaires* ont été sur Terre les seuls êtres animés. Pour autant que les archives fossiles ne nous trompent pas, il n'y a que six cents millions d'années que les *métazoaires*, ou pluricellulaires, ont commencé à jouer un rôle significatif sur notre planète. Depuis lors, ils se sont diversifiés sans trêve. Certains d'entre eux ont manifesté une remarquable capacité à innover et à développer des organes de plus en plus complexes. L'œil en constitue un exemple remarquable.

La sélection naturelle favorise l'adaptation des espèces à l'environnement. Elle en fait de même des organes des sens et l'œil ne fait pas exception. Le choix qu'a fait l'évolution des fréquences qui caractérisent la bande du visible n'est pas le fruit du hasard, même si, dans ce domaine, on en est réduit aux hypothèses. Pourquoi l'évolution a-t-elle adapté notre œil à une vision dans la bande des longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm? Pourquoi n'a-t-elle pas choisi un domaine de longueurs d'onde supérieures ou inférieures?

Il faut d'abord savoir que l'atmosphère absorbe une bonne partie du spectre d'émission solaire. Elle ne lui ménage que deux fenêtres. La première se situe dans le domaine des ondes radio, pour des longueurs d'onde supérieures à 1 cm. La seconde encadre la bande du visible (fig. 7.1). En d'autres termes et au risque de simplifier outrageusement, seules les ondes lumineuses et les ondes radio traversent aisément l'atmosphère. Voilà un argument qui favorise la bande du visible et les ondes radio. Pour les départager, imaginons que, au lieu d'être sensible à la lumière visible, notre appareil visuel soit constitué d'antennes radio comme un Martien de bande dessinée. Ce changement ne nous favoriserait pas.

Tout d'abord, l'émission solaire n'est pas très importante dans le domaine des ondes radio: le Soleil, au lieu d'être un astre resplendissant, ne nous apparaîtrait plus que comme une source faiblement lumineuse. Phœbus serait bien incapable de supplanter les autres sources radio qui peuplent le ciel, si bien que le jour et la nuit ne se distingueraient guère.

Mais ce n'est pas tout. Notre vision se brouillerait instantanément. Au lieu des images précises auxquelles nous sommes accoutumés, notre environnement ne nous offrirait plus qu'un spectacle flou, peuplé d'ombres imprécises. Notre acuité visuelle se détériorerait au point qu'il nous faudrait recourir aux autres sens pour recueillir les informations nécessaires à notre survie. Nous ne serions plus que des taupes vivant à l'air libre, victimes de la valeur trop élevée de la longueur d'onde des ondes radio.

Ainsi équipés d'antennes, nous serions à l'image des radioastronomes que le soleil ne gêne pas, mais que défavorise le faible pouvoir séparateur de leurs instruments.

L'avènement des radiotélescopes

On voit tout de suite ce qui a poussé Jocelyn Bell à s'intéresser aux radiotélescopes. N'étant pas gênée par la présence du Soleil, la future radioastronome peut faire ses observations de jour comme de nuit. Mais, avant de recueillir des données, la jeune thésarde doit d'abord participer pendant deux ans au montage d'un nouveau radiotélescope.

Le lecteur peut ici se poser une question légitime. Si le monde des ondes radio manque à ce point de netteté, quel avantage y a-t-il à observer le ciel avec un radiotélescope? Grosso modo, le pouvoir séparateur est donné par le rapport numérique entre l'*ouverture* de l'instrument et la longueur d'onde qui caractérise les ondes utilisées. Plus ce rapport croît, plus la netteté des images augmente.

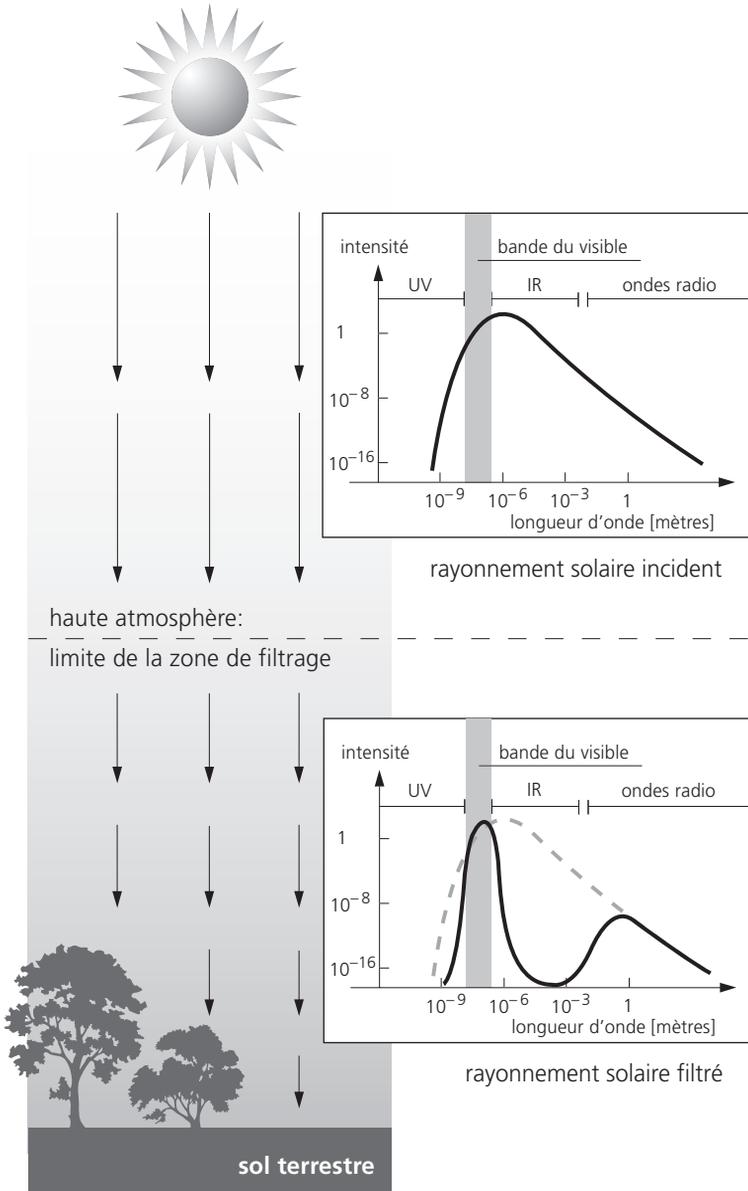


Fig. 7.1 Le *spectre solaire* est le nom que l'on donne à la décomposition du rayonnement du soleil selon les différentes longueurs d'onde. Il présente un maximum proche de la bande du visible (les courbes effectivement observées présentent nombre d'accidents non reproduits ici). On a représenté le spectre tel qu'on l'observe avant son entrée dans l'atmosphère, puis tel qu'il est à l'arrivée au sol. La différence entre les deux courbes provient de l'absorption due à l'atmosphère. Elle s'exerce essentiellement sur les ultraviolets et sur une grande part des infrarouges. Les deux zones du spectre pour lesquelles le rayonnement traverse aisément l'atmosphère sont la «fenêtre du visible» et la «fenêtre-radio».

L'ouverture d'un télescope optique se confond avec le diamètre de son miroir, qui est de l'ordre du mètre pour un instrument respectable. Le radiotélescope que construit Anthony Hewish va travailler avec des ondes radio dont la longueur d'onde (3,7 m) est plus de 5 millions de fois plus grande que celle de la lumière visible. Dans ces conditions, pour que son pouvoir séparateur soit équivalent à celui du télescope optique, il faudrait que sa taille augmente dans la même proportion. On y parviendrait en construisant une antenne parabolique ou un réseau d'antennes de 5000 kilomètres de diamètre!

Hewish se contente d'un réseau couvrant une surface équivalant à la réunion de dix-sept courts de tennis, ce qui correspond à un pouvoir séparateur bien réduit. L'intérêt du radiotélescope qu'il construit réside ailleurs. L'instrument permettra d'étudier des sources imperceptibles dans le visible mais qui émettent des ondes radio assez intenses pour être captées par un radiotélescope. L'information qu'elles portent est ensuite retranscrite sur un graphique. C'est notamment le cas lorsque l'instrument est dirigé sur des objets célestes mystérieux, les *quasars*, noyaux très actifs de galaxies situées aux confins de l'univers connu.

Le scintillement au secours du radiotélescope

Pour pallier la faiblesse du pouvoir séparateur du nouveau radiotélescope, Hewish trouve une parade. Puisqu'il se met à la recherche des quasars, il joue sur le caractère ponctuel² de ces radiosources en recherchant systématiquement celles qui sont affectées de *scintillement*. Ce phénomène ne se produit que lorsque l'angle sous-tendu par la source ne dépasse pas une seconde d'arc.

Quand nous observons le ciel, nous notons le scintillement des étoiles, mais nous en ignorons souvent son origine. Du fait de sa distance, une étoile autre que le Soleil est une source ponctuelle. Dans le vide, la lumière parcourt en une année $9,4 \cdot 10^{12}$ km, une distance qui définit l'*année-lumière*. Or nos voisines les plus proches, *Alpha* et *Proxima du Centaure*, sont distantes de 4,3 années-lumière, soit $4 \cdot 10^{13}$ km. Le rayon d'*Alpha* est comparable à celui du Soleil qui, avec ses 700 000 kilomètres, est dans la bonne moyenne des étoiles. Seuls s'écartent considérablement de cet ordre de grandeur les astres tout à fait exceptionnels, dont la démesure se manifeste aussi bien dans le gigantisme que le nanisme, catégorie à laquelle appartient la minuscule *Proxima*.

Compte tenu de son éloignement et de sa dimension, *Alpha* est à peu près équivalente à une orange placée à Tombouctou et que l'on chercherait à observer de Genève, étant entendu que l'on fait ici abstraction de la courbure de la Terre. C'est dire à quel point une étoile est lumineuse puisque nous pouvons l'apercevoir à l'œil nu, mais c'est dire aussi que, même pour les télescopes les plus puissants, *Alpha* constitue une source lumineuse strictement ponctuelle. Seule l'imperfection inévitable de nos instruments nous la fait

² Quand un astronome affirme qu'une source est ponctuelle, il ne rend pas hommage à son respect des horaires. Il veut simplement dire qu'elle peut être assimilée à un point.

apparaître comme une petite tache irrégulière. Dans l'oculaire d'un modeste télescope, les planètes principales, en revanche, apparaissent comme des disques. La lunette de Galilée, l'ancêtre des télescopes, permettait déjà de constater que la planète Vénus n'est pas une tache informe, pratiquement ponctuelle, mais plutôt un disque planétaire présentant des phases comme la Lune. Et pourtant la taille des planètes n'est rien en comparaison de celle des étoiles. Ramenée à la dimension d'une orange, Jupiter, la planète géante, devrait être placée à 500 m d'un observateur pour que son diamètre apparent soit respecté!

C'est là que le scintillement apparaît. Dû aux variations fluctuantes de la densité de notre atmosphère, il n'affecte que les sources ponctuelles que sont les étoiles. Les planètes ne sont pas touchées car elles ne peuvent être assimilées à des sources ponctuelles. Pour s'en convaincre, il suffit de les observer au travers d'une simple lunette: les plus grosses d'entre elles prennent la forme d'un disque ou d'un croissant.

Il se trouve qu'en radioastronomie le scintillement des sources ponctuelles existe aussi. La cause doit en être cherchée non dans l'atmosphère terrestre mais dans les régions de l'espace où existent des charges électriques libres, et notamment au voisinage du Soleil. Notre étoile est entourée d'un halo de particules chargées qui s'en éloignent dans toutes les directions. Ce *vent solaire*, célèbre depuis les missions Apollo, présente lui aussi des irrégularités de distribution. Quand ces fluctuations de densité sont traversées par un faisceau d'ondes radio issu d'une source ponctuelle, il y a scintillement pour le radiorécepteur.

A bit of scruff

C'est ici que l'on retrouve Jocelyn Bell. A Cambridge, elle doit participer pendant deux ans au montage d'un nouveau radiotélescope. En juillet 1967, quand l'instrument est prêt, elle est chargée de la prise des données, une besogne routinière qui, en principe, n'offre pas de difficultés. On la réserve au «thésard» le plus fraîchement engagé, à l'image de l'apprenti relieur qui passe le plus clair de son temps à balayer l'atelier. Jocelyn n'y voit pas d'inconvénient. Puisque la recherche du scintillement d'une radiosource ponctuelle est plus favorable quand le Soleil est à proximité, elle trouve là une possibilité de concilier travail diurne et recherche en astronomie.

La besogne peut sembler ingrate: il s'agit de dépouiller des informations inscrites sur quatre rouleaux de papier. Quatre plumes tracent sur chacun d'eux une ligne saccadée rappelant l'enregistrement d'un sismographe. Malgré l'avantage que présente la proximité du Soleil, l'acquisition des données se fait nuit et jour, au rythme de 30 m de rouleau par 24 h. Les encreurs sont capables de reproduire une oscillation d'un dixième de seconde, de sorte qu'ils peuvent enregistrer un scintillement.

Le dépouillement est compliqué par la présence d'innombrables parasites d'origine terrestre. La TV française, un démarreur de voiture ou l'enclenchement d'un réfrigérateur risquent constamment de laisser des traces sur le ruban de données. Le travail est à la fois fastidieux et exaltant: à chaque instant

Jocelyn peut espérer découvrir un nouveau quasar. Sa tâche consiste à scruter attentivement le déroulement uniforme des rubans. Du fait de la rotation de la Terre, le radiotélescope pointe vers une direction de la voûte céleste qui change à mesure que se succèdent les heures du jour et de la nuit. L'opérateur peut modifier dans la direction nord-sud l'inclinaison de l'instrument.

Au début d'août, Jocelyn remarque une trace inaccoutumée qui réapparaît de temps à autre. Ce «bit of scruff»³ ne ressemble ni au scintillement d'un quasar ni à un parasite d'origine terrestre. Mis au courant, Hewish ne manifeste guère d'émotion: les parasites sont multiples et différent entre eux.

Pas complètement convaincue, Jocelyn se remet au travail. Et une semaine plus tard, alors que le télescope vise le point de la voûte céleste où elle avait remarqué l'étrange signal, celui-ci réapparaît. Non pas à la même heure, mais une demi-heure plus tôt. C'est exactement ce qu'on attendrait d'une source stellaire ou extragalactique. Chaque soir, à cause de la révolution annuelle de la Terre, le lever d'une étoile se produit quatre minutes plus tôt que le soir précédent: l'origine du signal observé par Jocelyn a peu de chance de se trouver sur Terre. Si c'était le cas, comment expliquer que sa position soit fixe par rapport à celle des étoiles? Un satellite artificiel ne ferait pas non plus l'affaire.

Hewish a encore un doute: les observatoires astronomiques vivent au rythme céleste. Pour eux, un jour ne dure que 23h56 min. L'un d'eux serait-il à l'origine du mystérieux parasite? Hewish procède à une enquête rapide auprès de ses collègues, enquête qui ne donne rien.

La conviction de Hewish est faite. Il faut s'intéresser de plus près à cette source. On décide de remplacer l'enregistreur par un système plus sensible, capable de réagir à une oscillation de 50 millisecondes. Mais ce nouvel appareillage ne peut être installé en permanence. On doit le fixer sur le télescope juste avant le passage du signal mystérieux. Et qui est chargé de cette tâche? Jocelyn, évidemment.

Hélas, depuis l'installation du système sensible, la source se tait. En août déjà, elle ne faisait que de rares apparitions. On est maintenant en novembre. La radiosource supposée qui, en août, passait de nuit dans le champ de l'instrument, devrait se manifester en fin d'après-midi, ce qui arrange Jocelyn.

Enfin, le 28 novembre 1967, la source signale à nouveau sa présence. Grâce à la sensibilité du nouvel enregistreur, Jocelyn Bell et Antony Hewish constatent qu'il s'agit d'une source émettant des impulsions périodiques. On note que la régularité de l'émission est prodigieuse. Il s'agit d'une horloge céleste d'une précision inconnue jusqu'alors. On connaissait déjà certains types d'étoiles dont la luminosité varie périodiquement, les *étoiles variables*. Leurs périodes ne tombent jamais en dessous de quelques heures alors que la nouvelle source envoie des impulsions séparées par un intervalle de 1,37 sec. Bien plus, la suite le montrera, on peut mesurer cette période avec une précision d'un milliardième de seconde. C'est une montre d'une extrême précision, à cela près que la «durée séparant deux battements» augmente très lentement au cours du temps: le mécanisme de l'horloge se ralentit comme un ressort qui se détend.

³ Une saleté.

Les petits hommes verts

Rétrospectivement, la réaction de Hewish à la périodicité du signal n'est pas étonnante: il est convaincu qu'il est artificiel. C'est du moins le terme édulcoré que l'on trouve dans l'exposé fait à Stockholm à l'occasion de la remise de son prix Nobel. [98] Mais le premier nom de baptême de la source mystérieuse est plus explicite: il est constitué des initiales LGM pour «Little Green Men»⁴.

L'hypothèse d'un signal artificiel n'était pas à écarter d'emblée. Puisque l'astronomie stellaire d'alors ne pouvait expliquer l'existence d'un objet aussi rapide et aussi régulier, il n'était pas déraisonnable de songer à une civilisation lointaine cherchant à entrer en contact avec la nôtre. Deux arguments de poids renvoyèrent bien vite les petits hommes verts aux oubliettes de l'histoire. Hélas!

Si une civilisation lointaine nous envoie un jour de tels signaux, on ne peut éviter de penser qu'elle habitera une planète plutôt qu'une étoile, lieu de séjour bien inhospitalier en raison de sa température élevée et de sa structure gazeuse. Une telle planète ne peut manquer d'accomplir une révolution autour d'un astre central, source de chaleur. Aujourd'hui que tant de planètes extrasolaires ont été découvertes, nous en sommes encore plus convaincus que Hewish et Jocelyn ne pouvaient l'être en 1967. Il se trouve que ce mouvement de révolution se manifeste nécessairement sous la forme d'une *modulation* du signal: sa fréquence varierait périodiquement.

Le verdict des observations est sans appel: la seule modulation observée provient du mouvement de la Terre elle-même. Il porte un coup sévère aux petits hommes verts qui disparaissent définitivement de la scène en janvier 1968 quand Jocelyn découvre dans d'autres régions de l'espace deux nouvelles sources pulsantes pratiquement identiques à la première. Ce sont donc trois radiosources pulsantes, plus connues aujourd'hui sous le nom de *pulsars*, que Jocelyn Bell a décelées.

La découverte est annoncée en février 1968 dans une lettre à la revue *Nature* [99]. Elle porte les signatures de cinq chercheurs. Dans l'ordre, A. Hewish, J. Bell et trois autres radioastronomes ayant contribué à l'analyse du signal. Dans cette lettre, les cinq chercheurs décrivent leur découverte. Comme interprétation possible de la nature du pulsar, ils font déjà appel à un objet céleste extraordinaire: l'*étoile à neutrons*. En 1967, elle fait partie des objets célestes, certes hors du commun, mais surtout non identifiés et, pense-t-on, non identifiables. Comme il arrive souvent dans les sciences physiques, certains physiciens et astronomes avaient spéculé sur l'existence d'astres analogues, sans pouvoir en donner une description précise. L'observation est seule capable de révéler les détails d'un objet dont on avait prédit l'existence avant d'en faire la découverte. De toutes façons, personne n'imaginait pouvoir observer un astre aussi exotique: sa taille est trop faible.

⁴ Petits hommes verts.

Landau

Au début des années 1930, le physicien soviétique Lev Davidovitch Landau (1908-1968) s'interroge sur le sort des étoiles. Du fait de l'attraction gravifique que l'étoile exerce sur elle-même, la matière qui forme la surface de l'étoile est si violemment attirée vers le centre que le cœur se comprime et que le rayon de l'astre diminue, ce qui augmente encore la force d'attraction sur la surface. Le processus pourrait s'emballer et un effondrement se produire à moins que, au cœur de l'étoile, ne règne une pression antagoniste dont l'origine est encore inconnue en 1932. Landau imagine que, à l'intérieur des étoiles comme le Soleil se forme un cœur de haute densité qui pourrait fournir aux astres lumineux l'énergie leur permettant de rayonner [100]. Ce serait possible à condition que, au sein de l'astre, la matière voie ses propriétés changer radicalement. Landau imagine l'apparition d'une substance incroyablement dense. A cette époque, on ne connaît qu'un seul exemple de matière aussi exotique: le noyau atomique. Landau ne va pas plus loin, mais il a franchi un pas important.

On a déjà rencontré Landau. Sa vie et son destin sont étranges. Il est unanimement considéré comme le plus grand physicien théorique soviétique. Après différents séjours dans les plus grands centres de physique d'Europe de l'Ouest, il retourne en URSS en 1932 où il crée une école prestigieuse de physique théorique. Avec son élève Evgeni M. Lifchitz, il entreprend la publication d'une série d'ouvrages d'enseignement universitaire qui deviendront fameux dans le monde entier. Dans ces textes, «il n'y a pas une ligne de Landau et pas une idée de Lifchitz». C'est du moins ce qu'affirment les collègues de Landau en ne plaisantant qu'à moitié. Connus et traduits dans le monde entier, ces ouvrages constituent des outils de recherche incomparables.

La langue de Landau est toujours restée très acérée, que ce soit à l'égard de ses collègues ou des dirigeants du régime communiste, ce qui lui vaut en 1938 de passer une année dans les geôles de Staline. Il ne doit sa libération qu'au courage du grand physicien expérimentateur Pyotr Kapitsa (1894-1984) qui ose plaider sa cause devant le dictateur fou.

En physique, les intérêts de Landau sont universels. Il serait vain de faire la liste de ses contributions; il suffit ici de dire qu'il reçoit en 1962 le prix Nobel de physique pour avoir expliqué une des grandes découvertes de Kapitsa, la mise en évidence des étranges propriétés de l'hélium liquide. Ce n'est qu'aux plus basses températures que cet élément, gazeux à température ambiante, accepte de passer à l'état liquide. A la pression atmosphérique, et contrairement à tous les autres corps, il reste liquide même au zéro absolu.

Les propriétés de l'hélium liquide sont surprenantes. Il se montre capable de fuir un récipient immobile en escaladant ses parois, un tour que le vin, par bonheur, ne joue que quand la main qui tient le verre manque d'assurance... Pour décerner le prix à Landau, l'Académie Nobel a une bonne raison de choisir l'année 1962: le 7 janvier, Landau a été victime d'un accident de voiture si grave que des chirurgiens de plusieurs pays sont sollicités pour le sauver. Il reste inconscient pendant six semaines; à plusieurs reprises, il est déclaré cliniquement mort. Il revient à lui, cependant, et vivra encore six ans. Mais le désir de vivre et de créer l'a abandonné.

Baade et Zwicky

C'est alors que deux grands astronomes entrent en scène. Ce sont l'Allemand Walter Baade (1893-1960) et le Suisse Fritz Zwicky (1898-1974). Ils vont s'intéresser aux plus grands cataclysmes observés en astronomie, ce qui n'étonne guère de la part de Zwicky. Alors que Baade est renommé pour son savoir encyclopédique et son tempérament paisible, Zwicky est connu pour son caractère difficile et explosif. Autour de personnalités aussi extrêmes que celle de Zwicky, les anecdotes fourmillent.

Zwicky n'accepte de travailler qu'avec les chercheurs qu'il considère comme des génies. Encore ne les respecte-t-il pas tous. Engagé au Caltech⁵ par l'Américain Robert Millikan (1868-1953) pour travailler dans le domaine de la physique du solide, Zwicky aurait reproché à son patron de n'avoir jamais eu une seule bonne idée. Un jugement excessif quand on sait que Millikan reçut le prix Nobel de physique 1923 pour avoir mesuré la charge électronique avec une précision inconnue jusqu'alors. Sachant que Zwicky s'intéressait à l'astrophysique, Millikan lui aurait proposé lui-même de s'intégrer dans le groupe du Caltech chargé de construire l'observatoire du Mont Palomar. Le caractère de Zwicky ne s'adoucit pas pour autant. Pour lui, ses collègues astronomes ne sont que des «spherical bastards»⁶. Quand on lui demande le sens de cette comparaison, il répond que, observés sous n'importe quel angle, ils offrent le même aspect. Ils restent toujours des saligauds.

Un caractère aussi difficile n'empêche pas Zwicky de se consacrer à des activités louables comme la reconstruction de bibliothèques détruites durant la Seconde Guerre mondiale ou la participation à une institution américaine venant en aide aux orphelins, la Fondation Pestalozzi, d'origine helvétique. Ce mépris pour tout ce qui est moyen a sans doute poussé Zwicky à s'intéresser aux événements hors du commun ou extrêmes de l'astronomie.

Dans cette discipline, les phénomènes remarquables ne manquent pas. Des aurores boréales aux comètes, des éclipses aux chutes de météorites, ils ont toujours frappé ceux qui ont eu le privilège de les observer. Plus rare et plus spectaculaire est l'apparition d'une «nova stella», une «étoile nouvelle». L'histoire en a gardé parfois la trace. Ce phénomène nous ramène aux préoccupations de Landau et Zwicky.

Une supernova est un phénomène spectaculaire

Les astronomes connaissent depuis longtemps les *novae*. Ce sont des étoiles qui, lors d'une explosion, voient leur luminosité augmenter rapidement et dans des proportions considérables, puis revenir à leur valeur initiale. Leur appellation provient du fait que, à l'origine, ces astres étaient effectivement pris pour des étoiles nouvelles: «novae» est le pluriel latin de «nova», l'abréviation de «nova stella». Il arrive qu'une même étoile passe plusieurs fois par

⁵ Le California Institute of Technology, sis à Pasadena près de Los Angeles.

⁶ «Des saligauds de forme sphérique.»

le stade de nova. Mais l'ampleur de certaines explosions stellaires dépasse largement celle des novae ordinaires. Pour marquer leur importance et leur origine spécifiques, on leur donne le nom de *supernovae*.

Une étoile comme le Soleil adopte une forme et une dimension qui sont le résultat d'un compromis. L'attraction gravifique tend à comprimer l'astre du jour, mais sa pression interne s'y oppose tant que, grâce à la combustion du «carburant solaire», la température interne du Soleil garde une valeur constante. Quand une étoile a épuisé la source de son énergie, son destin dépend notamment de sa masse. Certaines d'entre elles subissent un effondrement catastrophique qui déclenche une explosion si terrifiante que l'une d'elles fut aperçue en 1987 à l'œil nu par un astronome travaillant à l'observatoire de Las Campanas (Chili). Or elle s'est produite dans le *Grand Nuage de Magellan*, une petite galaxie satellite de la nôtre, dont la distance est de l'ordre de 170 000 années-lumière... Si l'explosion avait été plus proche, on imagine aisément le spectacle qu'elle aurait offert.

Le 4 juillet 1054, une «étoile nouvelle» apparaît dans le ciel de l'hémisphère nord. Elle est plus brillante que Vénus et visible en plein jour. On a retrouvé sa trace dans les littératures chinoise et japonaise alors que, curieusement, l'Occident reste muet à son sujet. Sa vie très courte (quelques mois) montre qu'il ne s'agit pas de l'apparition d'une étoile nouvelle mais plutôt d'une explosion. Grâce aux indications des Chinois, les astronomes en ont retrouvé les restes sous forme d'une masse de gaz en expansion, la *Nébuleuse du Crabe*.

En 1572, l'astronome danois Tycho Brahe (1546-1601) observe très vraisemblablement une explosion similaire: une étoile très brillante mais inconnue jusqu'alors apparaît dans le ciel; comme toutes les apparitions de ce type, elle perd peu à peu son éclat et disparaît au bout de quatre mois. Selon la doctrine aristotélicienne encore en vigueur à cette époque, seule la Terre – le *monde sublunaire* – est susceptible de modifications. L'étoile nouvelle de 1572 est donc interprétée comme un *météore*, autrement dit un phénomène atmosphérique. Mais lorsque Brahe montre que sa position est immuable relativement à celle des «étoiles fixes», l'interprétation «météorique» perd de sa crédibilité. En 1604, c'est au tour de Kepler d'avoir la même chance. Les nébuleuses qui constituent les restes des deux explosions sont encore visibles aujourd'hui.

Les supernovae de 1054, 1572, 1604 et 1987 étaient visibles à l'œil nu. Mais de telles explosions ne se produisent pas seulement «dans notre voisinage immédiat». Au moment où Baade et Zwicky s'intéressent au phénomène, on commence à comprendre que les «nébuleuses», où apparaissent les supernovae les plus lointaines, ne sont pas des masses de gaz appartenant à notre Galaxie. Elles constituent elles-mêmes des galaxies situées à des millions d'années-lumière, mais analogues à la nôtre. Une supernova à son apogée est aussi lumineuse que toute la galaxie à laquelle elle appartient. Les supernovae proches, très spectaculaires, sont rares. Celles qui ont été vues par Brahe et Kepler ont explosé dans notre propre Galaxie. Leur proximité explique leur luminosité extraordinaire.

Quand Baade et Zwicky prennent conscience de l'éclat prodigieux associé aux supernovae, ils l'interprètent comme une explosion qui accompagne l'ef-

fondrement d'une étoile. S'engageant dans la voie frayée par Landau, ils font l'hypothèse que, au cours du cataclysme, une étoile ordinaire se transforme en une étoile à neutrons, une de ces singularités que la nature tient en réserve pour nos yeux stupéfaits.

Quand la source d'énergie est tarie et que l'étoile s'effondre, un fragment important est expulsé mais, dans sa partie centrale, il se forme l'astre extraordinairement dense qu'avait entrevu Landau. Il est tellement comprimé qu'il forme une boule de quelques dizaines de kilomètres de diamètre à l'intérieur de laquelle peut prendre place une masse un peu supérieure à celle du Soleil, ce qui correspond à une densité moyenne mille milliards de fois supérieure à celle de l'eau. Un mm^3 d'étoile à neutrons aurait une masse de cent mille tonnes, l'équivalent d'un pâté d'immeubles. Dans l'idée de Baade et Zwicky, une étoile aussi exotique était destinée à rester à jamais inobservable par défaut de luminosité.

Aujourd'hui il est universellement admis qu'un pulsar est une étoile à neutrons qui tourne à toute vitesse sur elle-même. Arrivée en fin de vie, elle ne possède plus de source d'énergie lui permettant de résister à la gravitation. L'étoile se comprime au point que les atomes qu'elle renferme implosent. Les électrons s'écrasent sur les noyaux et se combinent avec leurs protons pour former des neutrons. Les noyaux se désagrègent et constituent une soupe d'une densité phénoménale. L'étoile se transforme en un noyau gigantesque constitué de neutrons.

On a découvert un pulsar au centre de la Nébuleuse du Crabe. C'est sans aucun doute le reste de l'effondrement de l'étoile qui a attiré l'attention des Chinois et des Japonais. Le *pulsar du Crabe* effectue 30 tours sur lui-même en une seconde. Au contraire d'une étoile ordinaire qui rayonne uniformément dans toutes les directions, le pulsar, semblable à un phare tournant, émet un faisceau concentré dans un secteur angulaire restreint. Et comme un phare tournant, le pulsar paraît clignoter pour celui qui l'observe. On attribue cette émission directionnelle à la présence d'un champ magnétique gigantesque, bien supérieur à tout ce que l'on peut produire dans un laboratoire terrestre (fig. 7.2).

Aujourd'hui, on connaît plus de 1300 pulsars. Le plus rapide d'entre eux a une période de 1,56 milliseconde: en une seconde, il tourne 641 fois sur lui-même.

Polémique autour d'un prix Nobel

En 1974, le prix Nobel de physique est décerné pour la première fois à deux astronomes britanniques. Martin Ryle (1918-1984) le reçoit pour avoir conçu et réalisé le radiotélescope à haute résolution. Le second lauréat, Antony Hewish, le patron de Jocelyn Bell, est couronné pour la découverte des pulsars. Les deux chercheurs méritent amplement cette distinction majeure. Tout le monde est d'accord. Mais une polémique se développe autour du nom de Jocelyn Bell Burnell. Pourquoi n'a-t-on pas également décerné le prix Nobel à Jocelyn? Dans une discipline comme la physique, il est arrivé bien souvent que le prix soit partagé entre trois lauréats.

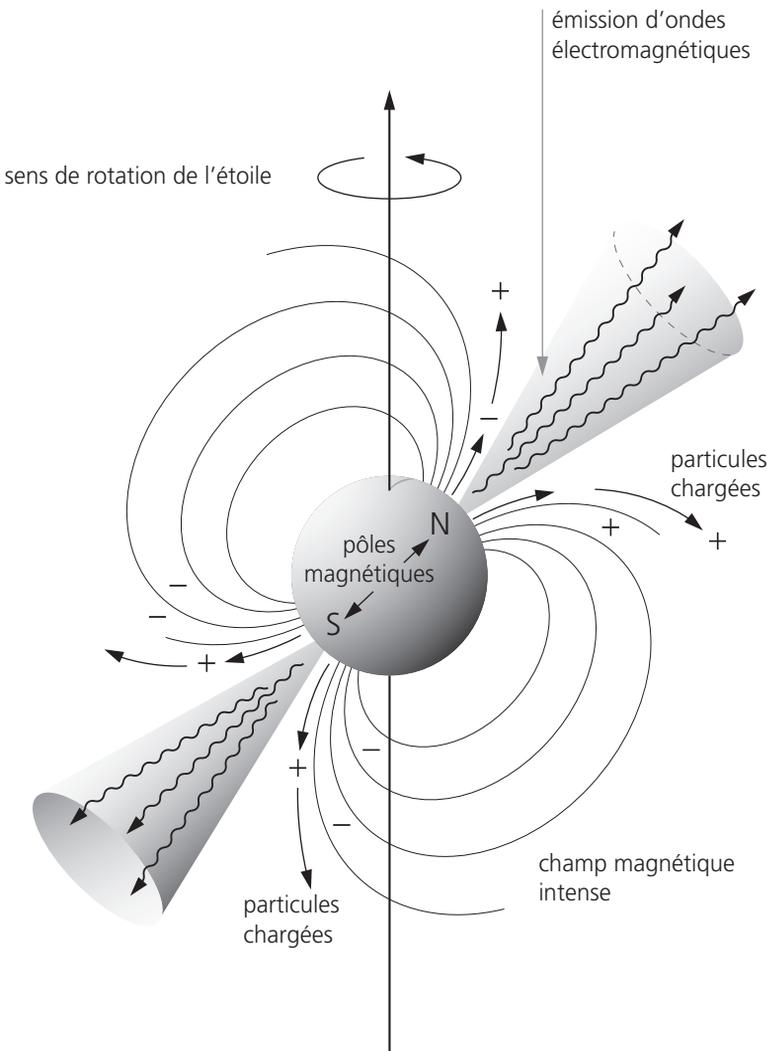


Fig. 7.2 Schéma d'une étoile à neutrons telle que nous pouvons l'imaginer. Le champ magnétique très élevé qu'elle produit accélère les particules chargées, notamment au voisinage des pôles magnétiques N et S. Ces charges deviennent alors sources de deux faisceaux d'ondes électromagnétiques qui balaient le ciel de l'étoile en rotation. Le pulsar n'est observable que si la Terre se trouve sur le passage d'un des faisceaux.

On peut toujours discuter de la signification du prix Nobel comme on raille la Légion d'Honneur, ce colifichet qui flatte la vanité humaine. Pourtant le prix Nobel de physique officialise toujours une réalisation prestigieuse dans cette discipline. Contrairement au prix Nobel de la paix, il n'a pas de caractère politique affiché. Chacun peut citer de nombreux chercheurs qui auraient pu ou dû le recevoir, mais il est plus difficile de nommer un lauréat qui ne l'aurait

pas mérité. On peut cependant se rappeler (avec quelque difficulté...) le nom du Suisse Charles-Edouard Guillaume (1863-1938), qui a reçu le prix Nobel en 1920 pour avoir découvert notamment l'*invar*, un alliage de fer et nickel caractérisé par une dilatation pratiquement nulle à température ambiante. Sans vouloir accabler le brave homme, on peut cependant suggérer que la recherche scientifique s'était passablement ralentie entre 1914 et 1918.

En tant que signal visible de la reconnaissance d'une réalisation par la communauté scientifique, l'attribution ou la non-attribution d'un prix Nobel est matière à discussion. En ce qui concerne le prix attribué en 1974, l'évolution de la polémique mérite d'être connue.

A chaque cérémonie d'attribution des prix Nobel de physique, un bref discours de présentation est lu par un des membres de l'Académie Royale des sciences. En 1974, c'est le professeur H. Wilhelmsson qui en est chargé. Il ne prononce pas le nom de Jocelyn. Hewish est récompensé pour «son rôle décisif dans la découverte des pulsars».

En mars 1975, Fred Hoyle fait une conférence à l'Université Mc Gill de Montréal. Nous avons déjà eu l'occasion de mentionner son penchant pour la provocation et la polémique. D'après le *Times* de Londres, il profite de son exposé pour déclarer que la découverte de Jocelyn a été tenue secrète pendant six mois. Selon Hoyle, c'est le temps qu'il a fallu aux astronomes de Cambridge pour chiper à Jocelyn la gloire de sa trouvaille. Or la victime du vol supposé répond au reporter venu l'interroger que tout le bruit fait autour de cette affaire est un peu ridicule, et que Hoyle a faussé l'affaire en la grossissant.

Quelques jours plus tard, Hoyle écrit au *Times* une lettre dans laquelle il affirme que ses propos ont été imparfaitement rapportés. Revenant sur son accusation, il insiste sur deux points.

Tout d'abord, il estime que la contribution de Jocelyn à la découverte des pulsars a été considérablement sous-estimée. Selon lui, c'est parce que «[...] il paraît si simple de procéder à un dépouillement d'une foule d'enregistrements. La valeur d'une découverte comme celle-ci doit être cherchée dans le courage qu'il a fallu pour considérer comme possible un phénomène que toute l'expérience passée conduisait à rejeter.» Enfin, il affirme que ce n'est pas tant à Hewish qu'il en a qu'au comité Nobel qui, avant de décerner le prix, ne se serait pas suffisamment informé. L'avis de Hoyle est partagé par l'astronome américain Thomas Gold, le premier à avoir donné un modèle acceptable de pulsar: «Burnell⁷ mérite une part importante de la gloire de la découverte si elle a réellement été la première à se rendre compte que le pulsar obéissait au temps sidéral.» [101] Gold veut dire par là que, les signaux du pulsar revenant chaque jour quatre minutes plus tôt, leur source se situait nécessairement en dehors du système solaire.

La communauté des astronomes aurait préféré que le prix Nobel 1974 revînt au trio Ryle, Hewish et Bell Burnell. Elle n'est pas la seule. En 1973, la médaille A. A. Michelson avait été octroyée conjointement à A. Hewish et J. Bell Burnell par le Franklin Institute de Philadelphie, une institution qui se targue de consacrer tout le temps nécessaire – près de deux ans – au choix de

⁷ Le nom de la femme mariée de Jocelyn Bell.

ses lauréats. Neuf ans plus tard, Hoyle aura une fois encore l'occasion de s'interroger sur la pertinence des décisions du Comité Nobel. Ce sera à propos de ses propres recherches (chap. 6). En 1993, finalement, on assistera à la parution d'un ouvrage historique consacré à 14 femmes ayant reçu ou failli recevoir le prix Nobel [27]. Parmi elles Marie Curie, bien sûr, mais aussi Jocelyn Bell Burnell...

Une conclusion en forme de jugement

D'une manière ou d'une autre, la question posée plus haut (Jocelyn aurait-elle dû recevoir le prix?) est oiseuse. Elle l'est parce qu'il n'y a d'autre réponse à cette question que celle que chacun se forme à la lumière de ses expériences, de ses sentiments, de ses préjugés et de ses convictions. On peut cependant tenter d'analyser le comportement des trois principaux protagonistes du «drame»: Jocelyn Bell Burnell, Antony Hewish et l'Académie Royale des Sciences de Suède.

Jocelyn Bell Burnell a commencé à rédiger sa thèse au milieu de janvier 1968. La découverte des pulsars y figure en appendice! Après avoir obtenu son doctorat, elle quitte Cambridge. Elle veut se marier et son fiancé est fixé au sud de l'Angleterre. Elle enseigne pendant cinq ans à l'Université de Southampton sans avoir de contact avec la recherche de pointe. Au moment de l'attribution du fameux prix, elle vient de retrouver une place au sein d'un groupe de recherche renommé, spécialisé en astronomie des rayons X. Mère d'un enfant handicapé, elle y travaille à mi-temps. Aujourd'hui, elle est *full professor*⁸ à l'Open University du Royaume-Uni dont elle dirige le département de physique. A ce titre, elle est la troisième femme professeur de physique de l'histoire britannique.

L'Open University est la plus grande Université du Royaume-Uni. Elle est ouverte à tous les adultes européens, quel que soit leur curriculum scolaire, et offre des cours par correspondance ainsi que par le truchement d'émissions de radio et de télévision nocturnes. Bien que les quatre cinquièmes des étudiants n'aient pas suivi une filière secondaire normale, plus de la moitié d'entre eux obtiennent un diplôme de fin d'études.

Le comportement de Jocelyn lors des circonstances qui ont permis la découverte des pulsars ne peut être que loué. Aux prises avec une masse impressionnante de documents, elle a parfaitement assumé sa tâche. Elle a remarqué le «bit of scruff» à l'origine de la découverte. Mieux: elle a fait preuve de «serendipity». Ce terme n'a pas d'équivalent en français. Il a été inventé par l'écrivain anglais Horace Walpole et désigne l'art de faire une découverte intéressante quand on cherche tout autre chose. Walpole avait lu un conte de fées intitulé «Les Trois Princes de Serendip» dont les héros «faisaient constamment des découvertes inattendues, grâce à un mélange de chance et de sagacité» [102].

⁸ Professeur titulaire

Durant la période qui suit immédiatement la découverte du mystérieux signal, et au moment où son origine est encore indéterminée, elle n'abandonne jamais complètement l'idée qu'une étoile en soit la cause. Et ce malgré le scepticisme de son chef qui interprète d'abord le signal comme un banal parasite. Dans un entretien avec le journaliste scientifique Nicholas Wade, elle va jusqu'à s'excuser: «Mes connaissances en astronomie n'étaient pas comparables à celles de Hewish et je n'évaluais pas correctement les risques de l'affaire. Hewish excluait la possibilité que ce fût une étoile [...]. Je continuais à penser que ce pouvait en être une jusqu'à ce que quelqu'un me fit remarquer à quel point les pulsations étaient brèves.» [101] Du point de vue déontologique également, son comportement ne donne lieu à aucune remarque négative: impliquée malgré elle dans une polémique autour de sa personne, elle refuse de critiquer quiconque alors qu'il est très tentant de se poser en victime. A tous points de vue Jocelyn Bell Burnell a le beau rôle de cette histoire. On pourrait lui appliquer cette phrase de Charles de Gaulle:

«Les étoiles me parlent de l'insignifiance des choses.» [103]

L'attitude de Antony Hewish peut être jugée différemment suivant que l'on discute de son comportement en tant que scientifique ou en tant que patron de thèse.

En tant que chercheur, on voit mal ce que Hewish pourrait se reprocher. Il fait preuve de scepticisme quand Jocelyn lui montre le fameux signal, ce qui est la moindre des choses. Le responsable d'un groupe de recherche doit rester prudent face à un élément nouveau. Il lui faut s'assurer qu'il est réellement en face d'une découverte significative avant d'ameuter les journalistes pour s'apercevoir ensuite qu'il ne s'agit que d'un artefact (un «canular» dans le jargon des chercheurs). D'autres en ont fait l'amère expérience dans un passé plus récent, lors des fameuses affaires de la «mémoire de l'eau» ou de la «fusion froide». [104] Après coup, il ne leur reste plus qu'à reconnaître pitoyablement leur erreur ou à persister et à se mettre ainsi en marge de la communauté scientifique. Garder la nouvelle secrète tant que l'on procède à des vérifications est une règle d'or pour le chercheur scrupuleux. Et réserver la priorité de l'annonce à une revue scientifique plutôt qu'à la grande presse figure en bonne place dans le code d'honneur du chercheur.

A l'égard de Jocelyn, l'attitude de Hewish mérite peut-être moins de compliments, si tant est qu'on ait qualité de les décerner. On peut relever trois points.

Tout d'abord, il n'est pas innocent que sa signature précède celle de Jocelyn dans l'article annonçant la découverte des pulsars [99]. L'ordre alphabétique voudrait qu'elle soit nommée en premier. Renoncer à cet ordre implique que la contribution de Hewish est la plus importante, aux yeux des auteurs tout au moins.

Par ailleurs, dans le discours prononcé lors de la cérémonie de remise des prix, il mentionne très précisément que c'est Jocelyn qui a remarqué le fameux signal. Mais cette remarque est précédée d'un compliment singulièrement tourné. Hewish affirme en effet que «[...] c'est tout à l'honneur de Jocelyn Bell d'avoir su se maintenir à jour parmi le flot de papperasse produit par les quatre

enregistreurs» [98]. Ce n'est heureusement pas le seul mérite de Jocelyn. Son nom est mentionné une seconde fois au cours de l'exposé: «En janvier 1968, alors que Jocelyn Bell était en train d'examiner tous nos enregistrements avec la persévérance et le soin qui la caractérisent, elle fit une liste des points de la voûte céleste susceptibles de correspondre à des pulsars.» Les mérites de la jeune thésarde sont très justement relevés. En même temps, Jocelyn est fermement maintenue à la place qui est la sienne: celle d'une subalterne.

L'impression que l'on ressent à cette lecture ne peut être que renforcée quand on prend connaissance de la phrase prononcée par Hewish à l'intention des lecteurs de la revue américaine *Science*: «Jocelyn était une fille drôlement bien («a jolly good girl»), mais finalement elle n'a fait que son boulot. C'était son boulot d'apercevoir cette radiosource. Si elle ne l'avait pas vue, elle aurait fait preuve de négligence...» [101]

Il n'y a rien d'extraordinaire dans ce comportement d'Antony Hewish. Nombreux sont les chefs d'un groupe de recherche qui réagiraient comme lui. Toutefois, en réduisant le rôle de sa collaboratrice à celui d'une exécutante particulièrement consciencieuse, il ne rend pas justice à ceux qui pratiquent la recherche scientifique à un rang subalterne. On peut le regretter pour tous les jeunes chercheurs, mais aussi pour le statut de la femme dans la société, et notamment dans la recherche.

Par ailleurs, il convient de relever que personne ne peut proposer son propre nom au choix de l'Académie des Sciences de Suède. Les règles en vigueur ne le permettent pas. Hewish n'est donc pas responsable de l'éviction de Jocelyn. C'est le comité Nobel chargé d'étudier les dossiers des candidats au prix qui a manqué une excellente occasion. Couronner Jocelyn aurait apporté de l'eau au moulin de ceux qui veulent que la position de la femme dans notre société continue à s'améliorer. On se demande si le fait que Jocelyn ait quitté Cambridge pour fonder une famille n'a pas joué son rôle dans le choix de l'Académie des Sciences de Suède. On veut espérer que cette hypothèse est incorrecte et que ces Messieurs ne se sont pas dit: «Puisqu'elle a préféré pouponner, elle n'a plus besoin de ce prix.»

Il faut reconnaître que, afin de suivre sans cesse son mari et de s'occuper chaque jour de son fils malade, Jocelyn Bell n'a pas pu mener une carrière propre à gravir les échelons les plus prestigieux de la recherche scientifique. Passant malgré elle d'une spécialité à l'autre, elle n'a pu rester fidèle qu'à ses conceptions religieuses et sociales. Il est assez significatif qu'elle n'ait publié qu'un seul ouvrage partiellement autobiographique [105]. Elle y parle de la maladie de son fils et de l'idée qu'elle se fait de la vie, mais ne mentionne pas la découverte des pulsars. Autre point éloquent: alors que Jocelyn avait publié ce texte sous son nom de femme mariée, son mariage s'est dissous peu après [27]. Ce n'est qu'à ce moment-là qu'elle a obtenu son titre de professeur...

«Le déluge se répandit sur la terre pendant quarante jours; [...] les eaux grossirent si prodigieusement sur la terre que toutes les hautes montagnes qui sont sous tous les cieus furent couvertes. [...] Alors périt toute créature sur la terre, oiseaux, bétail, animaux sauvages, et tous les reptiles qui rampent sur la terre [...].» [Genèse 7, 17-21]

La collision

Il y a 65 millions d'années, à la clôture de l'ère Mésozoïque ou Secondaire, caractérisée par l'abondance des conifères et le règne des dinosaures, une météorite de 10 kilomètres de diamètre est entrée en collision avec la Terre. Elle y a provoqué un cataclysme dont les traces sont encore visibles de nos jours. On admet que le choc a provoqué un séisme et un raz-de-marée gigantesques, qu'il a allumé des incendies et créé des tempêtes sur tout le globe. On pense également que, peu après l'impact, la surface entière de la Terre a été plongée pendant plusieurs mois dans le froid et la nuit à cause de la présence de débris pulvérulents en suspension dans l'atmosphère. Peu à peu, la nuit polaire fit place à un intense réchauffement par effet de serre. Plus grave encore, la météorite est soupçonnée de génocide. Elle aurait provoqué l'extinction d'un nombre considérable d'espèces incapables de résister à des conditions aussi extrêmes. La collision aurait brutalement mis fin au monde des dinosaures, symboles de l'ère Secondaire. L'ère Tertiaire qui allait suivre sera notamment celle de l'épanouissement des plantes à fleurs et des mammifères. C'est aussi l'ère qui a vu l'avènement de l'humanité. Les premiers mammifères avaient côtoyé les dinosaures mais leur taille était restée modeste jusqu'à la limite Crétacé-Tertiaire. Ils reprirent alors les niches écologiques abandonnées par leurs concurrents et occupèrent à leur tour le devant de la scène.

Aujourd'hui, la plupart des chercheurs reconnaissent l'existence de la fameuse météorite. D'autres s'opposent à cette vision des choses et attribuent la transition Crétacé-Tertiaire à des causes agissant graduellement. Une modification du niveau de la mer, un changement climatique ou un volcanisme intense et durable feraient mieux leur affaire. Cette polémique, qui se poursuit aujourd'hui encore, est un avatar de la réticence qu'ont longtemps éprouvée les géologues pour le catastrophisme, une vision de l'histoire de la Terre qui tend à attribuer aux catastrophes une importance jugée disproportionnée par ceux qui la récusent. On l'a vu au premier chapitre, la géologie, au début du XIX^e siècle, s'est battue contre un catastrophisme fondé par Cuvier. Cette conception a longtemps traîné derrière elle une réputation fâcheuse: on lui attribuait une origine biblique largement injustifiée. [7, 106]

Dans ce qui suit, on rappelle comment l'hypothèse d'une collision météoritique survenue à la limite Crétacé-Tertiaire a pris corps et comment la découverte d'indices convergents a peu à peu convaincu la grande majorité de la communauté scientifique, d'abord réticente. Il ne s'agit pas ici d'accuser ou

d'absoudre souverainement la météorite du crime de génocide. C'est au jury de se prononcer, et seul un jury de géologues, de paléontologues et de biologistes est en droit de le faire. Il n'en reste pas moins que l'histoire de la découverte de la météorite est inextricablement liée au destin des dinosaures et des espèces qui ont disparu avec eux si bien que, en la relatant, on ne peut occulter le problème de l'extinction. La liaison entre météorite et extinction a fini par s'imposer comme une évidence pour les acteurs principaux de cette histoire. On adoptera provisoirement leur point de vue, quitte à reprendre en conclusion une attitude plus critique.

Pour un physicien, l'histoire de l'enquête scientifique associée à cette découverte est fascinante. La limite Crétacé-Tertiaire a été marquée par l'une des cinq *extinctions majeures* de l'histoire de la Terre puisque, avec les dinosaures, 75% des espèces marines et tous les animaux terrestres de plus de 25 kilos ont disparu. La physique et l'astronomie sont sans cesse présentes dans ce récit: trois des quatre acteurs principaux sont un physicien et deux chimistes nucléaires. Le quatrième, mais le premier par ordre chronologique, est un géologue. D'un point de vue plus général, cette histoire constitue un témoignage exemplaire de la façon dont se construit la science. Rien n'est jamais simple lors d'une découverte. L'histoire de la météorite de Chixchulub est là pour nous le rappeler.

Dans un de ses ouvrages, Eric Buffetaut cite le paléontologue américain Glenn Jepsen qui, en 1962, avait dressé une liste de quarante-cinq causes avancées pour expliquer la disparition des dinosaures [106]. Certaines d'entre elles pouvaient sembler plausibles. Citons dans le désordre un changement de climat, dans un sens ou dans un autre, des épidémies, l'assèchement de marécages, des inondations ou de la poussière volcanique. Les appréciations que l'on peut donner à la grande majorité des autres hypothèses vont de «hautement improbable» à «totalement délirant». On peut notamment mentionner la stupidité due à la diminution du cerveau, le développement de tendances suicidaires, un excès d'oxygène, des fluctuations de la constante gravitationnelle, les rayons cosmiques, un déplacement de l'axe de rotation de la Terre, la dérive des continents, l'extraction de la Lune de l'océan Pacifique, les taches solaires, des raids de petits chasseurs verts dans des soucoupes volantes, et finalement le manque de place dans l'arche de Noé. De manière générale, si l'une des hypothèses suggérées était accompagnée d'un argument ou d'un embryon de justification, jamais son auteur n'apportait de preuve. Quant aux comètes et aux météorites, elles figuraient également dans la liste, mais, perdues parmi tant de propositions saugrenues, elles n'avaient aucune raison d'être prises plus au sérieux que les autres. Eric Buffetaut précise que, après 1962, la liste des propositions s'est encore allongée.

Dans ces conditions, avant 1980, personne n'imaginait sérieusement qu'une énorme météorite ait pu entrer en collision avec la Terre à la limite Crétacé-Tertiaire; si quelqu'un avait joué avec cette idée, il n'aurait pas pu produire le moindre indice à l'appui de sa spéculation. La découverte de l'existence de la météorite et l'accumulation des preuves en faveur de ce scénario font penser à une enquête policière démasquant un crime presque parfait. Les cadavres avaient été identifiés depuis longtemps mais on croyait à une mort naturelle. Et un jour, un géologue se mit à poser des questions troublantes...

L'art de poser une bonne question

Durant les années 1970, le géologue américain Walter Alvarez, né en 1940, étudie une falaise de calcaire située près de Gubbio en Ombrie. Ces couches datent du Crétacé et du début du Tertiaire, chaque couche étant déposée au-dessus de celle qui la précède dans l'ordre chronologique; dans un terrain accidenté, cette règle chronologique peut être violée si les roches sont soulevées et se plissent pour former un enchevêtrement complexe. Il peut aussi y avoir des lacunes dans ces archives rocheuses. Walter Alvarez se sert des informations magnétiques incluses dans les strates pour mieux comprendre leur chronologie.

Si l'on remontait le temps en emportant avec soi une boussole, on s'apercevrait que son aiguille indiquerait tantôt le sud, tantôt le nord, le changement de sens ayant lieu tous les cent mille ans environ. La boussole, en fait, n'indique pas la direction de l'un des pôles géographiques, mais celle du *pôle magnétique*; ce «troisième pôle» est actuellement voisin du pôle nord. Les roches portent une petite boussole incorporée qui a enregistré la direction du pôle magnétique au moment où elles se sont déposées (s'il s'agit de roches sédimentaires) ou quand elles se sont refroidies (s'il s'agit de roches volcaniques).

Dans ces archives de calcaire, la limite Crétacé-Tertiaire est représentée par une fine couche d'argile dépourvue de fossiles. Son épaisseur atteint tout juste un centimètre alors que celle de la paroi rocheuse se compte en dizaines de mètres, si bien qu'on ne peut guère distinguer la couche limite sur une photographie de la falaise. A la loupe, dans les couches blanchâtres déposées immédiatement au-dessous de l'argile – et qui datent ainsi de l'extrême fin du Crétacé – on peut distinguer de très nombreux fossiles de *foraminifères*, unicellulaires marins abrités dans une coquille calcaire. Les roches situées au-dessus de l'argile sont légèrement roses. Les foraminifères y sont aussi présents, mais ils ne sont visibles qu'au microscope en raison de leur faible taille: à la limite Crétacé-Tertiaire, il y a eu extinction des foraminifères de grande taille.

Les fossiles de dinosaures sont de très grande taille. Ils sont incomparablement plus rares que les foraminifères fossiles. Bien avant 1970, les paléontologues savaient que l'on ne trouve de dinosaures que dans les terrains secondaires mais, en raison de la rareté des exemplaires conservés, ils pouvaient à juste titre parler de disparition progressive. Le cas des foraminifères était beaucoup plus clair: l'extinction avait eu lieu pendant que l'argile se déposait. *Est-il possible d'évaluer cette durée et de distinguer ainsi entre une extinction brutale et une disparition progressive?*

La découverte de la météorite découle de la pertinence de la question que se pose Walter Alvarez et de sa volonté acharnée d'y trouver une réponse. Il y est parvenu grâce à l'aide de collaborateurs aussi décidés que lui. De par ses propres études de datation des roches, Walter est convaincu que l'argile n'a pu se déposer très longtemps, ce qui plaide pour une extinction plutôt rapide des foraminifères. Mais il veut en apprendre plus et il se demande comment mesurer avec précision le temps de déposition de la couche d'argile. En 1976, il commence à discuter de ce problème avec son père, Luis Alvarez, qui voit très vite l'intérêt d'une telle recherche et s'engage immédiatement aux côtés de son fils.

Physique expérimentale et éclectisme

Le physicien américain Luis Alvarez (1911-1988) est une figure marquante de la recherche du XX^e siècle. Chef d'un groupe de recherche au Lawrence Berkeley National Laboratory, professeur à l'Université de Californie de Berkeley, c'est un expérimentateur remarquable. Il a reçu en 1968 le prix Nobel de physique pour la construction de la *chambre à bulles à hydrogène liquide*, un détecteur remarquable qui a permis la découverte de plusieurs particules en physique des hautes énergies. Mais il est loin de se limiter à l'étude des particules, il s'est également fait connaître pour des recherches dans les domaines les plus variés de la physique. Avec un de ses collaborateurs, il a découvert ${}^3_2\text{He}$, l'isotope rare de l'hélium. L'hélium a le privilège d'être le seul élément dont les deux isotopes ont des propriétés physiques complètement différentes, tout au moins aux très basses températures¹. Bien plus, avant de rechercher avec son fils la cause de l'extinction des dinosaures, il s'était déjà fait connaître par deux projets tout à fait inhabituels pour un physicien. Non pas quant aux méthodes utilisées, qui ressortissent clairement à la physique, mais en ce qui concerne les objectifs visés.

La première enquête porte sur la pyramide de Chéphren, l'une des grandes pyramides de Gizeh. Alvarez raconte l'enthousiasme qu'il a éprouvé à la vue de ces monuments prodigieux et les questions qu'il s'est aussitôt posées à leur sujet [107]. Il apprend que, contrairement à celles de son père (Chéops) et de son grand-père (Snéfrou), la pyramide de Chéphren ne possède pas de salles emmurées. Les salles de la pyramide de Chéops ont été découvertes accidentellement en l'an 900 après Jésus-Christ, 3500 ans après la construction du tombeau. «L'idée selon laquelle Chéphren aurait négligé de construire une chambre emmurée allait à l'encontre de toutes mes conceptions de l'être humain.» [107] Alvarez entre en contact avec le professeur El Bedewi, chef du département de physique de l'Université Ein Shams du Caire et avec un groupe d'archéologues, si bien qu'un projet de recherche commun prend forme en 1966. Le principe de l'expérience consiste à se servir des muons issus de la haute atmosphère pour tenter de mettre en évidence la chambre hypothétique. Les muons jouent en l'occurrence le même rôle que les rayons X lors d'une radiographie... Hélas, la publication de 1970 ne laisse pas de place au doute. La pyramide de Chéphren ne possède pas de cavités similaires aux chambres emmurées trouvées dans les pyramides de Chéops et de Snéfrou [108]. A la décharge du groupe de chercheurs, on doit pourtant noter qu'*un résultat négatif ne saurait être confondu avec une absence de résultat!*

De ce point de vue, la seconde enquête de Luis Alvarez a d'autres mérites. Elle a considérablement clarifié les circonstances qui ont entouré l'assassinat de John Kennedy. Mais comme cette affaire a eu de profondes conséquences politiques et un retentissement médiatique immense, les conclusions d'Alvarez ont toujours été minimisées, voire ignorées. Etre lauréat du prix

¹ Il existe d'autres isotopes de l'hélium, mais ils sont si peu abondants qu'on ne connaît pas leurs propriétés physiques. Par ailleurs, comme l'hélium est une substance qui ne peut entrer dans une combinaison, ses propriétés chimiques sont inexistantes.

Nobel de physique ne suffit pas à faire admettre vos idées si vous proclamez une vérité que les gens se refusent à entendre. Quarante ans après les faits, même si vous n'avez aucun titre particulier à la recherche de la vérité, vous pouvez écrire n'importe quoi sur l'assassinat. Vous êtes sûr d'attirer l'attention de la presse pourvu que vous respectiez deux règles d'or. Tout d'abord, vous devez impérativement affirmer que l'enquête a été bâclée et que le monde politique, la police et la justice sont pourris et incompétents. En second lieu, si vous voulez qu'on accorde un quelconque crédit à votre hypothèse, vous devez affirmer qu'il y a eu conspiration.

Naïvement, en physicien responsable, Alvarez décide de conduire le plus honnêtement possible sa propre enquête. Au lieu d'interroger des suspects ou d'organiser des écoutes téléphoniques, il va reprendre le travail de la police scientifique. C'est probablement la première fois qu'un lauréat du prix Nobel de physique entreprend d'élucider les circonstances d'un assassinat. Dans un premier temps, il travaille seul, puis il sollicite le concours du FBI, une erreur fatale si son but était d'attirer l'attention.

Luis Alvarez enquête sur l'assassinat de Kennedy

Le 22 novembre 1963, le président John Kennedy entame à Dallas sa campagne électorale pour un deuxième mandat présidentiel. Dans une voiture découverte, il se tient debout derrière le gouverneur Harold Connally. Au moment où la voiture traverse Dealey Plaza, le président est frappé de deux balles. Quelques heures plus tard, la police arrête le meurtrier présumé, Lee Harvey Oswald, qui est à son tour assassiné devant les caméras de télévision, alors qu'il est aux mains de la police. Le tueur se nomme Jack Ruby; atteint d'un cancer, il sait qu'il n'a plus longtemps à vivre. Bien plus, c'est un tenancier de boîtes de nuit, pour ne pas dire de maisons closes...

La popularité de Kennedy est immense, son charisme intact après plus de deux ans et demi de mandat présidentiel. L'Europe était sous le charme. Un détail le montre qui, quarante ans plus tard, paraît stupéfiant: ce fameux 22 novembre, les équipes de Suisse et d'Allemagne de hockey sur glace disputaient un match amical. Quand la nouvelle de l'assassinat fut connue, on en était à la pose qui suit le deuxième tiers-temps. Le match fut aussitôt interrompu et c'est une speakerine très émue, pour ne pas dire en larmes, qui annonça la nouvelle à la radio.

Le choc de la mort brutale de cet homme en qui l'on fondait tant d'espairs et les circonstances très troublantes de la disparition de son assassin firent instantanément naître le soupçon d'une conspiration. Il se répandit comme une traînée de poudre en Europe, mais il n'épargna pas les Etats-Unis. Une commission d'enquête fut nommée, la *commission Warren*, chargée de faire toute la lumière. Ses conclusions parurent en 1964. Elles reposaient, notamment, sur la découverte de trois cartouches vides à côté d'une carabine abandonnée au sixième étage du BDB, le Book Depository Building, sorte de bibliothèque dominant Dealey Plaza. Elles s'appuyaient aussi sur un document précieux, le film qu'un spectateur du nom d'Abraham Zapruder avait pris au passage de la voiture avant, pendant et après les coups de feu. Pour l'essen-

tiel, les conclusions factuelles de la Commission Warren peuvent se résumer ainsi: *trois coups de feu* ont été tirés par un *tireur unique*, Oswald, qui se tenait au BDB, situé *derrière* la voiture au moment des faits. L'une des balles transperce le cou de Kennedy et blesse Connally, puis une autre balle tue le président en le frappant à la tête. On ne sait trop ce qui s'est passé avec le dernier projectile qui aurait été tiré directement après celui qui a frappé le président et le gouverneur.

Sitôt publiés, les 26 volumes qui contiennent les conclusions de cette enquête déclenchent un tollé. Ne relevant l'existence que d'un seul tireur, la commission Warren ne soutient pas l'hypothèse de la conspiration. Il apparaît alors un groupe de «Warren Commission Critics». Aujourd'hui encore, ces critiques ne se sont pas tues. Leur démonstration tourne autour du nombre des coups de feu et de la direction des tirs. Tout d'abord, même si la majorité des témoins déclarent avoir entendu trois coups de feu, l'unanimité est loin d'être réalisée sur ce point. Certains n'en ont perçu que deux, d'autres ont compté jusqu'à six détonations. Tout le monde est d'accord pour affirmer que la balle qui a frappé Connally avait *d'abord* traversé le cou de Kennedy, placé *derrière* le gouverneur. Mais les critiques mettent l'accent sur un point capital que montre clairement le film de Zapruder: lorsque le président a été atteint par la balle mortelle, sa tête a subi un brusque recul en direction du BDB d'où Oswald est censé avoir tiré. Dans ces conditions, la conclusion des critiques est formelle: outre Oswald caché au BDB, un second tireur – au moins – était embusqué à l'autre extrémité de Dealey Plaza. Pour eux, la conspiration est démontrée. En 1966, trois ans après l'assassinat, on ne compte pas moins de 35 théories distinctes avançant un scénario qui s'écarte d'une façon ou d'une autre de celui qu'avait proposé la commission Warren [109].

Tout ceci est connu du public quand, fin novembre 1966, Luis Alvarez ouvre un numéro de *Life* contenant un témoignage du gouverneur Connally et une sélection de prises de vue de couleur tirées du film de Zapruder. L'interview du gouverneur apporte de l'eau au moulin des critiques de la commission. Il affirme qu'il avait déjà entendu une détonation quand il a été atteint: ce ne peut être la première balle qui a simultanément blessé Kennedy et Connally.

Au cours de son activité professionnelle, Alvarez s'est entraîné à l'observation minutieuse des photos prises dans les chambres à bulles. Il décide de reprendre l'enquête en examinant soigneusement toutes les prises de vue de Zapruder. Par la suite, il se transforme en policier scientifique. Ses investigations ne cherchent pas à élucider toutes les interrogations qui se posent. Elles se contentent de répondre à deux questions: «Combien y a-t-il eu de coups de feu?» et «D'où ces coups de feu ont-ils été tirés?».

En ce qui concerne la première question, Alvarez confirme l'essentiel des affirmations de la Commission. Il y a bien eu *trois* coups de feu; c'est la deuxième balle qui a blessé Kennedy et Connally et c'est la troisième qui a tué le président. En ce qui concerne l'ordre chronologique des coups de feu, il appuie le témoignage du gouverneur plutôt que les conclusions hésitantes de la commission. A la deuxième question, Alvarez donne la même réponse que la commission. Les trois balles viennent du BDB.

De pareilles conclusions n'apportent aucun élément en faveur de la conspiration, même si, évidemment, elles ne peuvent l'exclure. C'est la raison

pour laquelle elles ont été ignorées par les critiques. Comment peut-on prendre au sérieux des affirmations qui apportent de l'eau au moulin des autorités? Ce qui intéresse les maniaques du complot, ce n'est pas de savoir comment les choses se sont passées. C'est qu'on leur révèle qui manipulait le ou les tireurs.

Et pourtant les réponses qu'Alvarez apporte aux questions posées sont assez précises pour exclure un certain nombre de scénarios, et notamment celui du deuxième tireur. C'est beaucoup pour un lecteur honnête, car Alvarez a prouvé que la commission Warren a correctement décrit ce qui s'est passé le 22 novembre à Dealey Plaza. C'est trop peu pour les critiques qui, de toutes façons, n'ont pas tenu compte de ses conclusions. Aujourd'hui encore, des films sont tournés et des livres paraissent qui les ignorent superbement.

Ce n'est pas l'objet de cet ouvrage d'entrer dans le détail de l'enquête d'Alvarez. Il vaut cependant la peine de revenir sur un point qu'il a contribué à clarifier, même si, aujourd'hui encore, on ne cesse de le présenter comme une «preuve» à l'appui de la présence d'un deuxième tireur. La tête de Kennedy pouvait-elle revenir en arrière lorsqu'elle a été frappée par une balle venant elle aussi de l'arrière? Les prises de vue de Zapruder ne laissent place à aucun doute: la tête du président, après avoir été atteinte par la balle, a été projetée en arrière, dans la direction du BDB où l'on a retrouvé par la suite une arme à feu.

Dans le texte qu'il ne va publier que dix ans plus tard dans une revue de physique [109], Alvarez explique que, s'il a hésité longuement à divulguer publiquement le résultat de ses recherches, c'est que l'analyse du recul de la tête du président risque de choquer la sensibilité du lecteur comme elle a choqué la sienne. Le physicien qu'il est n'est pas habitué aux spectacles impressionnants. Ces précautions liminaires formulées, Alvarez explique ceci. Sur une des prises de vue, on distingue clairement que, au moment de l'impact, de la matière cervicale a jailli de la tête de Kennedy vers l'avant. Par réaction, la tête a été rejetée vers l'arrière. Lors d'un coup de fusil, l'arme subit un bref recul contre l'épaule du tireur: il s'agit du même effet. Aidé du FBI, Alvarez se livre à de nombreuses vérifications à l'aide de mannequins dont la tête est remplacée par un melon enveloppé d'un ruban de fibres de verre dont la rigidité est semblable à celle d'un crâne humain. Le test est concluant. Alvarez n'en reste pas là. Il existe quantité de points fragiles dans le rapport de la commission. Les critiques se sont constamment acharnés à les attaquer. Alvarez s'est efforcé d'y répondre de la manière la plus complète [109].

Il ne faudrait pas s'imaginer que les partisans de la thèse de la conspiration se laissent désarçonner pour si peu. Ils accusent n'importe qui d'avoir organisé l'assassinat. Dans le désordre, Fidel Castro, la mafia, la CIA, le syndicat des camionneurs ou le vice-président Lyndon Johnson font pour eux des commanditaires présentables. Quant au rapport Warren, ils le mettent en pièces. Tantôt ils affirment que le film de Zapruder est un faux, tantôt ils contestent l'autopsie, prétendent bâclée, tantôt ils découvrent que la balle susceptible d'avoir blessé Kennedy et Connally a suivi une trajectoire contraire aux lois de la physique. Tout est bon pour faire parler de soi au travers d'une certaine presse qui tend une oreille complaisante à quiconque raconte une histoire à dormir debout. Comme la mort de Lady Diana et la destruction des tours jumelles du World Trade Center, l'assassinat de John Kennedy a déclenché une vague déferlante de littérature de bas étage.

L'éventualité d'une conspiration n'est pas écartée définitivement, mais c'est à l'histoire de trancher. Elle ne pourra y parvenir que si les recherches sont confiées à des historiens plus compétents et plus honnêtes que la majorité des critiques du rapport Warren.

Enquête sur un génocide

En 1976, onze ans après l'enquête que l'on a brièvement retracée, Luis Alvarez se remet à la tâche. Cette fois, il se met à la tête d'une brigade criminelle ayant pour mission de tirer au clair une affaire bien plus importante. C'est son fils Walter qui l'a mis sur la piste. Il restera jusqu'au bout une pièce maîtresse de l'enquête. Au lieu d'un assassinat, c'est à un génocide multiple que les deux Alvarez s'attaquent, et la liste des suspects est impressionnante. Cette nouvelle enquête est d'autant plus difficile à mener à terme qu'il n'y a aucun espoir de retrouver un revolver encore fumant dans la main du tueur: les cadavres sont fossilisés depuis longtemps. Au moment où commencent les investigations, Alvarez a soixante-six ans. Il est professeur émérite, c'est-à-dire retraité. La recherche qui l'associe à son fils va les mener tous deux à une découverte qui surpasse peut-être en importance toutes celles qu'il a faites jusqu'alors. Si elle est définitivement confirmée, elle constituera l'une des découvertes majeures du XX^e siècle.

Au moment où Walter associe Luis à ses préoccupations, personne ne parle de crime. Les dinosaures ou les ammonites – des cousines des nautilus actuels – n'ont pas survécu à l'ère Secondaire. Bien d'autres espèces ont connu le même sort, notamment les foraminifères de grande taille. La discontinuité qui en résulte dans les archives fossiles a incité les géologues à y situer la fin de l'ère Secondaire, mais ils n'y voient pas la marque d'un événement brutal. C'est dire que l'on n'a pas encore ouvert d'enquête criminelle; les victimes sont connues mais on attribue généralement leur disparition à un changement progressif du climat. Quant aux Alvarez, ils n'ont encore que de vagues soupçons. Ils aimeraient pouvoir évaluer le temps qu'il a fallu pour que se dépose la fameuse couche d'argile qui sépare les ultimes roches du Crétacé des premiers sédiments du Tertiaire. Il s'agit là d'une question difficile. Nul ne connaît de méthode pour y répondre. Luis, cependant, est une véritable encyclopédie des sciences physiques. On peut compter sur lui pour proposer une méthode intéressante.

Un premier projet échoue tout d'abord pour une raison inattendue. Luis avait suggéré d'utiliser la mesure de l'abondance du béryllium 10 dans la couche d'argile. L'idée paraissait excellente mais, malheureusement, telle qu'elle figurait dans les tables, la demi-vie de cet isotope comportait une erreur. La valeur correcte était trop courte pour que l'on puisse espérer mesurer quoi que ce soit dans une couche de la limite Crétacé-Tertiaire. Il fallait trouver autre chose [110].

L'iridium

Nous avons déjà rencontré les météorites. Ce sont des corps célestes qui tombent sur la Terre ou se désagrègent dans l'atmosphère. Certaines d'entre

elles sont de grande taille. Nous avons notamment mentionné la météorite de Canyon Diablo qui est à l'origine de Meteor Crater; on pense que son diamètre approchait trente mètres. Sur notre planète, les cratères météoritiques sont à la fois rares et peu visibles: les météorites de grande taille sont exceptionnelles et l'érosion détruit assez rapidement leurs traces. Sur la Lune ou sur Mercure, qui sont dépourvues d'atmosphère, rien ne peut faire disparaître les cratères résultant d'un impact météoritique. Leur surface en est criblée.

Un grand nombre de météorites ont la taille d'un grain de sable et ne parviennent pas directement à la surface de la Terre. En pénétrant à haute vitesse dans l'atmosphère, elles s'échauffent au point de devenir lumineuses et de s'évaporer. Ce sont les *étoiles filantes*. La poussière qui en résulte a de bonnes chances de se déposer sur le sol. Quant aux plus petites météorites, on ne les observe que par les traces de leur impact sur la surface de la navette spatiale. Leur diamètre n'atteint qu'un millième de millimètre; chaque seconde, plusieurs dizaines de milliers d'entre elles entrent dans notre atmosphère. Leurs débris peuvent également parvenir au sol. Les statistiques montrent heureusement que, plus la taille des météorites est importante, plus elles sont rares (fig. 8.1).

Les météorites proviennent de notre système solaire. Ce sont en général des fragments d'astéroïdes (fig. 8.2). Elles peuvent même provenir d'une planète (chap. 4). La Terre rencontre très rarement sur son chemin un astéroïde ou une comète, plus souvent un fragment rocheux et constamment de la poussière. Ces corps célestes diffèrent quant à leur composition mais ils sont tous issus de la condensation de la nébuleuse qui a donné naissance à notre Soleil. Certaines caractéristiques de ce nuage primitif ont subsisté dans la matière qui constitue aussi bien les planètes que les météorites.

Les cailloux ne sont pas seuls à tomber du ciel. À côté des météorites *pierreuses*, les plus abondantes, on rencontre des météorites *ferreuses*, constituées de fer, de nickel et de quelques autres métaux. C'est dans cette catégorie que l'on range Canyon Diablo. Les météorites ferreuses ont été liées à la naissance de la métallurgie du fer: en langue hittite, sumérienne, assyrienne ou égyptienne, le fer se nommait «métal du ciel, feu du ciel ou tonnerre du ciel». Les météorites ferreuses ont sans doute aidé les hommes à passer de l'âge du bronze à l'âge du fer. Dans la tombe de Toutankhamon, on a trouvé une dague dont le métal provenait d'une météorite [38]. Assez curieusement, le fer se nommait *sideros* en grec ancien alors que, en latin, *sidera* désignait les astres, mais le dictionnaire historique de langue française nie tout rapprochement entre ces deux termes [86].

À l'intérieur des météorites et de la poussière météoritique, six éléments aux propriétés chimiques proches sont présents en quantité très faible: ce sont les éléments du groupe du platine². Parmi eux, l'iridium, dont le rôle est central dans cette histoire. Ces métaux sont cependant dix mille fois moins abondants dans la croûte terrestre où l'on ne trouve en moyenne que 0,1 mg d'iridium par tonne de roche. On pense qu'ils sont beaucoup mieux représentés dans le noyau terrestre. Ce noyau, essentiellement composé de fer et de

² Le ruthénium, le rhodium, le palladium, l'osmium, l'iridium et le platine.

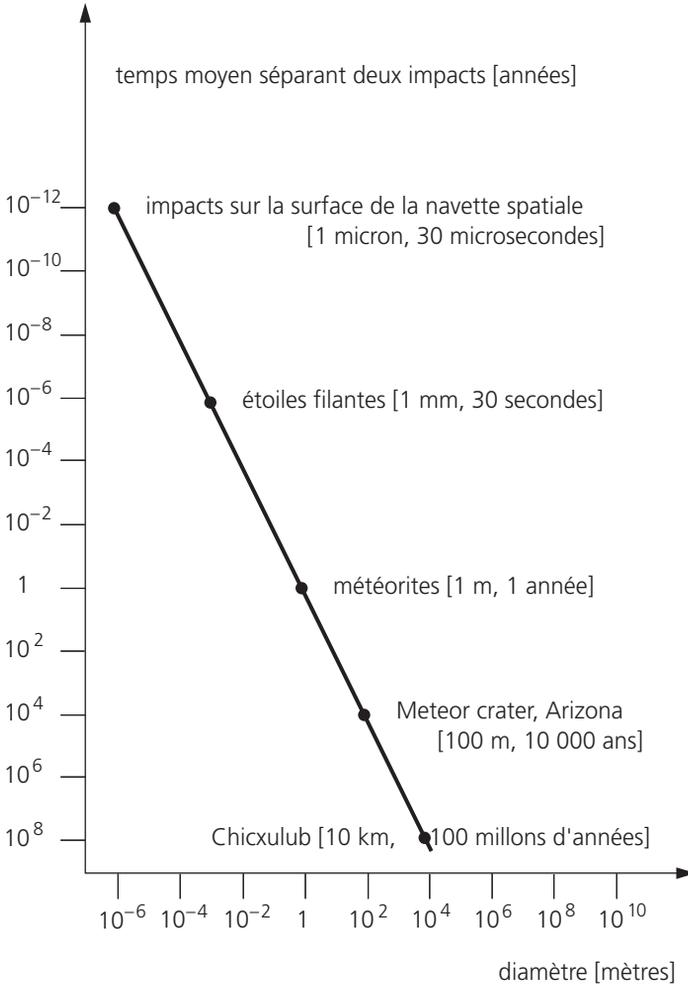


Fig. 8.1 Abondance des météorites en fonction de leur taille. Entre crochets, la taille de la météorite et le temps moyen séparant deux impacts de cette taille. D'après L. Alvarez [111].

nickel, s'est constitué quand la Terre, échauffée par un bombardement intense d'astéroïdes, était encore liquide. Du fait de leur poids, ces métaux lourds ont été entraînés au centre de la planète en formation, si bien que la petite quantité d'iridium que l'on trouve aujourd'hui dans la croûte terrestre est essentiellement due à l'apport des météorites. Elles amènent de l'iridium à la surface de notre planète à un taux presque uniforme.

Cette remarque suggère à Luis Alvarez une méthode de détermination du temps qui s'est écoulé durant le dépôt de la couche d'argile. On commence par mesurer la quantité d'iridium disséminé dans la couche. Les épaisses strates de calcaire qui entourent l'argile peuvent servir d'étalon: à côté d'une grande quantité de fossiles, qui permettent une datation indépendante des

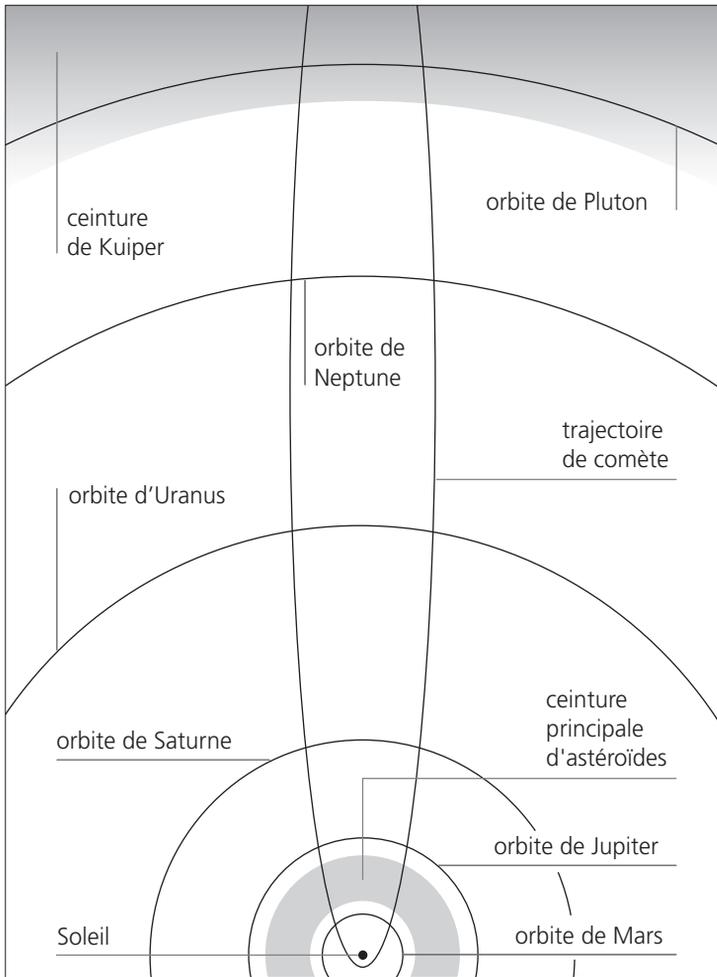


Fig. 8.2 Les astéroïdes proviennent de la ceinture principale ou de celle de Kuiper. Les comètes sont issues du nuage d'Oort, encore plus éloigné. Les orbites respectives de Mercure, Vénus et la Terre, trop proches du Soleil, n'ont pas été représentées. D'après Michel Mayor et Pierre-Yves Frei [112].

durées de sédimentation, elles contiennent un peu d'iridium. Si l'on compare les quantités respectives d'iridium que contiennent le calcaire et la fine couche d'argile, on aura accès au temps pendant lequel l'argile s'est déposée: une simple règle de trois devrait suffire. Luis Alvarez ne peut recourir aux méthodes de datation faisant appel à l'analyse des isotopes radioactifs. La raison en est simple. Un centimètre de sédiment, l'épaisseur de la couche d'argile, ne correspond en général qu'à un dépôt de quelques milliers d'années, une durée trop brève pour que la désintégration radioactive ait quelque utilité.

Puisque l'iridium est extrêmement rare dans les roches, son dosage dans la couche d'argile pose un problème majeur. Physicien des particules, Luis pense à une nouvelle méthode d'analyse, la sonde neutronique³, dont deux spécialistes, Frank Asaro et Helen Michel, sont justement fixés à Berkeley. Le principe en est simple: on soumet l'échantillon étudié à un flux de neutrons. Lorsqu'une de ces particules frappe un noyau présent dans l'échantillon, il peut être absorbé. Un rayonnement gamma est alors émis et ses caractéristiques permettent d'identifier l'isotope correspondant. Quand l'élément recherché n'est présent que sous forme de traces, les difficultés de l'entreprise sont considérables, car le rayonnement émis risque d'être masqué. C'est d'ailleurs pour cette raison que l'iridium s'impose aux autres éléments du groupe platine: il absorbe mieux les neutrons.

Y a-t-il eu crime?

Asaro reçoit les échantillons de Walter Alvarez en octobre 1977. Deux éventualités ont été envisagées. Tout d'abord, la quantité d'iridium contenu dans la couche d'argile pourrait se révéler comparable à celle que l'on trouve dans une couche de calcaire de même épaisseur. Cela impliquerait que le taux de sédimentation de l'argile a été à peu près le même que celui qui caractérise les roches précédant ou suivant la limite Crétacé-Tertiaire. Le dépôt de l'argile aurait alors duré quelques milliers d'années. En revanche, si l'argile s'est déposée très rapidement, signe d'un mystérieux événement catastrophique, l'iridium serait indécélable; c'est cette éventualité qui a la préférence des Alvarez [110].

Ce n'est qu'en juin 1978 qu'Asaro peut annoncer ses résultats. Ils ne correspondent à aucune des hypothèses envisagées: dans l'argile, l'iridium est environ trente fois plus abondant que dans le calcaire. On rejoint ici le vieux problème de Lyell qui avait fait une remarque importante en 1830: il y a plus de différence entre les fossiles des dernières strates du Crétacé et ceux des premières strates du Tertiaire qu'entre ces derniers et les animaux actuels [110]. Pour Lyell et pour les partisans de gradualisme, cette circonstance prouve qu'il s'est écoulé un temps immense de part et d'autre de la limite mais que, pour une raison ou une autre, les archives géologiques n'ont rien enregistré. Si l'on part de l'hypothèse que le taux de dépôt de l'iridium est uniforme, on donne raison à Lyell, mais on a bien de la peine à comprendre pourquoi nos archives paléontologiques et géologiques ont perdu toute trace des fossiles et des roches qui se sont nécessairement formés durant cette très longue période. L'horloge a tourné, l'iridium en témoigne, mais les archives sont devenues muettes.

Avant de forger des hypothèses susceptibles d'expliquer cette anomalie, il convient de vérifier les faits. Les Alvarez décident de doser l'iridium dans un autre site du globe où les roches de la limite Crétacé-Tertiaire affleurent. Il en est un qui convient: il est situé au Danemark et recèle également une abondance anormale d'iridium. La mesure faite à Gubbio se confirme.

³ En anglais: *neutron activation analysis*.

Quand les observations ou les expériences conduisent à une conclusion absurde, il est temps de revoir les hypothèses explicites ou implicites qui ont accompagné leur élaboration. Dans le cas de la couche d'argile, l'hypothèse la plus fragile est celle de l'uniformité du dépôt de l'iridium. Les Alvarez changent leur fusil d'épaule: l'abondance étonnante de l'iridium dans l'argile ne permet plus de mesurer la durée de sa sédimentation. En revanche, elle pourrait constituer l'indice d'un crime: les espèces disparues à la limite Crétacé-Tertiaire ont peut-être été victimes d'un génocide dont l'auteur a laissé une trace iridienne dans la couche d'argile.

Si l'on cesse de croire que l'iridium s'est déposé uniformément, il est légitime de conserver une autre hypothèse, celle de l'origine extraterrestre de l'iridium. L'abondance anormale d'iridium de la limite Crétacé-Tertiaire s'observe aussi bien au Danemark qu'à Gubbio, et bientôt dans plus de cent sites tout autour du monde. Il ne s'agit pas d'un phénomène local.

Si l'on admet qu'il y a eu génocide et que son auteur vient d'ailleurs, qui est l'assassin? Dès 1954, des voix isolées s'étaient élevées pour attribuer à une supernova la responsabilité de l'extinction survenue à la limite Crétacé-Tertiaire. Luis Alvarez décide de tester cette hypothèse en utilisant une technique similaire à celle qui a permis de doser l'iridium dans les roches. Il demande à Asaro et Michel de détecter la présence éventuelle de plutonium 244.

Sur Terre, le plutonium est entièrement artificiel car tous les isotopes de cet élément qui auraient été incorporés à la naissance de notre planète se sont désintégrés depuis longtemps. ${}_{94}\text{Pu}^{244}$ est le plus stable d'entre eux, mais sa demi-vie de 85 millions d'années n'est pas assez longue pour qu'il en subsiste dans les roches terrestres (fig. 9.4). En revanche, elle a exactement la valeur qu'il faut pour tester l'hypothèse de la supernova: de la dose de ${}^{244}\text{Pu}$ qu'une telle explosion aurait projetée sur Terre il y a 65 millions d'années, plus de la moitié serait encore présente dans la couche. Or les mesures sont dépourvues d'ambiguïté: la couche d'argile ne contient pas de ${}^{244}\text{Pu}$. La supernova n'est pas entièrement disculpée, mais il convient de chercher d'autres suspects.

Une nouvelle piste: une grosse météorite

Les météorites avaient mis Luis Alvarez sur la piste de l'iridium, mais son abondance inattendue dans la couche d'argile a brouillé les cartes. Juste retour des choses, l'iridium remet Luis sur la piste d'une météorite de grande taille.

Si l'on se réfère à la figure 8.1, on vérifie une évidence: plus les météorites sont grosses, plus elles sont rares. Le graphique présenté résulte d'une extrapolation: il est relativement aisé de dénombrer les météorites de faible masse tant elles sont nombreuses. Quant aux météorites de grande taille, elles sont si rares que l'on n'en fait qu'une statistique indirecte: on se sert des impacts relevés sur la Lune car ils ne s'effacent pratiquement pas. L'absence d'atmosphère supprimant l'érosion, il est possible, sur notre satellite, de comparer la fréquence relative des cratères d'impact de toute taille, et par là d'établir une statistique des météorites selon leurs masses. Or, qu'elles frappent la Lune, Mercure ou la Terre, elles ont même origine, donc même statis-

tique, à cela près que le taux d'impacts diminue avec l'âge du système solaire. Le réservoir météoritique s'épuise peu à peu.

Sur le graphique de la figure 8.1, on constate que, «actuellement», une météorite de 10 km de diamètre vient heurter la Terre tous les cent millions d'années. Comme il s'est écoulé 65 millions d'années depuis la limite Crétacé-Tertiaire, il est raisonnable d'attribuer à une grosse météorite l'anomalie d'iridium. Luis et Walter Alvarez hésitent cependant à adopter une telle hypothèse, car ils ne voient pas comment un tel choc, aussi violent soit-il, aurait pu provoquer une extinction de masse qui, par sa définition même, s'étend à toute la Terre.

Cette hésitation constitue une erreur de méthodologie courante. Elle est fréquente dans la vie de tous les jours, mais elle guette aussi les chercheurs, notamment dans les périodes de tâtonnement. En bonne logique, à ce stade de leur recherche, Luis et Walter ne devraient pas se préoccuper de l'extinction. Ils devraient s'efforcer de vérifier si l'abondance anormale de l'iridium dans l'argile peut être ou non la conséquence de l'impact d'une météorite. Si leur conclusion est positive, ou s'il s'avère que leur hypothèse est plausible, ils pourront ensuite revenir au problème de l'extinction. Contrairement à leur conclusion hâtive, l'existence d'un choc météoritique et celle d'une extinction ne sont pas nécessairement liées. L'absence d'un scénario simple reliant météorite et extinction ne devrait pas être un argument pour hésiter à accepter l'évidence d'un impact.

Finalement, après de longues discussions avec un astronome de Berkeley, Chris McKee, Luis Alvarez se met à consulter la documentation dont il dispose sur l'explosion du volcan Krakatoa qui s'est produite en Indonésie en 1883. La poussière projetée à cette occasion avait provoqué à l'autre bout du monde des modifications de l'atmosphère: pendant plusieurs mois, la couleur des couchers de soleil que pouvaient admirer les Londoniens avait changé. Luis se met alors à imaginer un scénario du cataclysme que constitue la collision de la Terre avec un bolide de 10 km de diamètre. La matière éjectée y joue un rôle central. Pendant des mois, elle a pu plonger la Terre dans une obscurité et un froid susceptibles de faire disparaître quantité d'espèces d'animaux et de plantes.

Si l'on veut reconstituer une collision avec une météorite géante, l'information que l'on peut tirer de l'étude de l'explosion du Krakatoa ou des quelques cratères météoritiques terrestres connus est insuffisante. Il en résulte que le scénario imaginé par les Alvarez et les partisans du lien direct entre la météorite et l'extinction Crétacé-Tertiaire est spéculatif. Plutôt que d'en décrire les détails, il vaut mieux se contenter d'énumérer quelques faits simples que la physique met à notre disposition.

La météorite sous l'angle de l'astronomie et de la physique

Lors de son entrée dans l'atmosphère, la vitesse de la météorite devait être de l'ordre d'une quinzaine de km/sec. Cette affirmation n'est pas due au hasard. Elle découle d'une hypothèse bien peu restrictive: la météorite provenait du système solaire sans avoir été préalablement installée sur une orbite terrestre. Cette dernière condition élimine les corps analogues à ces satellites artificiels qui, ayant décrit de nombreuses orbites autour de la Terre, finissent

par s'écraser sur celle-ci, de préférence au milieu de l'océan. Or, qui connaît la vitesse et la masse de la météorite peut évaluer la quantité d'énergie cinétique dissipée lors de l'impact dans l'atmosphère, dans la croûte terrestre, dans l'océan, et aussi lors de la vaporisation de la météorite et de la roche percutée. L'ordre de grandeur de la masse de la météorite est fixé si l'on a une idée de son diamètre (la densité est approximativement connue), et vice versa. On le verra plus bas, plusieurs évaluations indépendantes convergent vers une même valeur du diamètre, soit environ 10 km.

En comparaison des diverses expériences que l'homme a accumulées au cours de son histoire, l'énergie que l'on calcule ainsi correspond à un cataclysme totalement démesuré, celui que déclencherait l'explosion simultanée de cent millions de bombes à hydrogène. De tels chiffres ne parlent pas à notre imagination et ne font pas partie de l'histoire de l'humanité. On se contentera de répéter le scénario esquissé par d'autres: la météorite s'est évaporée instantanément; sur le lieu de l'impact, le choc a arraché la croûte terrestre sur une profondeur de 40 km et l'a projetée dans l'atmosphère; il a déclenché un raz-de-marée, ou plutôt un mur liquide de plus de cent mètres de haut, et a provoqué un séisme de magnitude 13 sur l'échelle de Richter. L'atmosphère a été littéralement trouée par le bolide qui n'a mis qu'une ou deux secondes pour la traverser. Derrière la météorite, l'air n'a pu combler la trace laissée par le projectile qu'à la vitesse d'une onde de choc, c'est-à-dire en une vingtaine de secondes. Durant cet intervalle, l'air contenu dans ce qui devait devenir la trajectoire du bolide a été comprimé à très haute pression entre la météorite et la roche percutée. Il est bien difficile d'imaginer la violence de l'ouragan qui a dû succéder à l'impact. La chaleur dégagée lors de la collision a mis le feu aux forêts proches ou éloignées du site de l'impact. Finalement, la matière pulvérulente de la météorite et la portion vaporisée de la cible se sont dispersées dans l'atmosphère tout autour de la Terre de sorte que, des mois durant, celle-ci a été plongée dans l'obscurité et le froid. Lorsque cette poussière est retombée au sol, le CO₂ dégagé lors des incendies a provoqué un important effet de serre.

Les événements qui sont retracés ici ont beau être spéculatifs, la Terre et même l'histoire humaine ont enregistré quelques événements cataclysmiques moins retentissants qui donnent une certaine crédibilité au scénario reconstitué par les Alvarez et d'autres chercheurs. L'existence d'incendies lors d'un impact météoritique violent est attestée. Le 30 juin 1908, dans la région de la rivière Tunguska (Sibérie), une boule de feu traverse le ciel sur 800 km puis disparaît en une série d'explosions. On pense qu'il s'agissait d'un bolide, astéroïde ou comète, qui s'est vaporisé avant de toucher le sol: aucun cratère n'a jamais été retrouvé. Le souffle de l'explosion a déraciné les arbres de la taïga sur une aire de plus de 2000 km². A la suite de la chaleur dégagée, la forêt a pris feu sur une superficie de 1000 km².

Reste le problème de la masse de la météorite. Comment Luis Alvarez a-t-il pu la déterminer? En réalité, il ne s'est livré qu'à de grossières estimations, mais toutes ses évaluations convergent, si bien qu'on peut penser que la valeur obtenue est raisonnable.

Selon le scénario adopté, l'iridium de la couche d'argile provient de la météorite. Luis Alvarez admet que la couche elle-même provient des poussières

res de la météorite et de la roche percutée, d'abord projetées dans l'atmosphère, puis déposées peu à peu sur le sol. Par comparaison avec l'explosion du Krakatoa, et compte tenu de l'importance relative de ces événements, on peut admettre que le dépôt des poussières a duré quelques mois, ce qui ne compte pas à l'échelle des temps géologiques et permet du même coup d'éliminer toute autre source d'iridium. La masse de la météorite géante s'obtient par une simple règle de trois: on évalue la masse d'iridium contenu dans une couche d'argile recouvrant uniformément la Terre entière et présentant la même composition qu'à Gubbio ou en d'autres sites correspondant à la limite Crétacé-Tertiaire. On admet encore que la météorite responsable de l'impact avait une composition comparable à celle des météorites usuelles, puis l'on corrige la valeur obtenue en tenant compte du fait que seuls les produits de l'explosion ayant atteint la stratosphère ont été disséminés par des vents assez violents pour avoir recouvert la Terre entière. Ce mode de calcul conduit à une météorite d'environ 10 km de diamètre.

Ce résultat est plausible si l'on se réfère à la figure 8.1 et à la fréquence des impacts de cette importance. Il ne s'agit évidemment pas là d'une preuve, mais seulement d'une confirmation statistique: l'hypothèse d'un bolide de 10 km est parfaitement compatible avec ce que nous savons de la fréquence des météorites en fonction de leur taille.

Si elle a été constituée par les débris transportés dans la stratosphère, la masse totale de la couche d'argile donne également la possibilité de calculer celle de la météorite, compte tenu des corrections mentionnées plus haut. Si cette évaluation est compatible avec celle que l'on obtient à partir de l'iridium, la validité des hypothèses faites s'en trouve renforcée. Or c'est bien le cas⁴, d'autant que l'étude de la nature de l'argile de la couche limite montre qu'elle diffère de celle que l'on observe, mêlée au calcaire, dans les roches voisines, formées au-dessus ou au-dessous de la couche correspondant à la transition.

Ces trois estimations de la masse sont indépendantes. Bien qu'elles ne permettent pas une évaluation précise de la taille de la météorite, elles ont le très grand mérite de conduire à des valeurs de la masse tout à fait compatibles. En 1980, Luis et Walter Alvarez publient avec Frank Asaro et Helen Michel un article très complet sur l'hypothèse de la météorite [114]. Cette publication initiale va déclencher un débat qui dure aujourd'hui encore.

Un point encore mérite d'être signalé. Il concerne l'origine de la couche d'argile que l'on attribue à une forte diminution de l'activité planctonique. Elle se traduit par l'arrêt presque complet de la production de carbonate de calcium dont sont formés les squelettes des foraminifères, très abondants dans les strates étudiées par Walter Alvarez [110].

⁴ Les choses sont en réalité très complexes, ne serait-ce que parce que la composition de la couche d'argile dépend du lieu où elle s'est déposée.

La recherche du cratère d'impact

C'est en juillet 1987 que Luis Alvarez écrit l'article mentionné à la référence [111]. Il bénéficie alors de l'abondante recherche qui a suivi la publication de l'article dans lequel L. et W. Alvarez, F. Asaro et H. Michel relataient la découverte de la présence d'une quantité anormale d'iridium dans la couche limite d'argile. Les résultats qu'il présente sont encourageants, si bien que Luis Alvarez déborde d'optimisme. Le titre de son article le montre bien: il est convaincu d'avoir élucidé l'énigme de l'extinction de masse de la fin du Crétacé. Il élude cependant une difficulté majeure: où se trouve le cratère d'impact?

D'autres chercheurs sont plus prudents que Luis, même parmi les partisans de l'hypothèse de la météorite. Parmi eux Walter, qui serait très heureux que la découverte d'un cratère d'impact vienne étayer le scénario de la collision. Il sera exaucé en 1991, alors que Luis, mort en 1988, ne saura jamais que le cratère tant espéré a fini par être retrouvé.

Les difficultés de la recherche du cratère de *Chicxulub*⁵ sont exposées en détail par Walter Alvarez [110]. Il suffit de dire ici qu'avant la mise en évidence de Chicxulub, aucune plateforme continentale ne gardait la trace d'un cratère d'impact ayant la bonne dimension (environ 200 km de diamètre) et datant de la limite Crétacé-Tertiaire. Si l'on croyait malgré tout à la collision météoritique, la disparition du cratère pouvait s'expliquer de deux manières au moins: le cratère cherché pouvait être enfoui sous les glaces de l'Antarctique ou dans les profondeurs de la mer. Or le diamètre de la météorite est comparable avec la profondeur maximale que peuvent atteindre les océans, si bien qu'un cratère d'impact aurait nécessairement dû se former au fond des mers. On peut le comprendre en imaginant un caillou tombant dans un pré à l'endroit où l'herbe est recouverte d'une flaque peu profonde: la chute va laisser une empreinte. Grâce à notre connaissance de la topographie sous-marine, un cratère formé au fond des mers serait visible. Mais, et c'est ce qui rendait l'hypothèse sous-marine attractive, il avait une chance de disparaître à jamais. En simplifiant à l'extrême, on peut dire que les continents flottent comme des radeaux sur le *manteau terrestre*. La croûte océanique qui constitue le socle d'un océan se modifie constamment. Elle est alimentée en son centre par des roches volcaniques issues du manteau tandis que ses bords s'enfoncent sous les continents: c'est là le phénomène de *subduction*. Il en résulte que le socle des océans émerge constamment du manteau pour y plonger ensuite. Les plaques continentales, tout en gardant à peu près leur individualité, se déplacent à la surface du Globe, fusionnant parfois ou se détachant les unes des autres. Ces mouvements, négligeables à notre échelle, sont importants à l'échelle géologique. On estime que, depuis le début du Tertiaire, un cinquième de la croûte océanique a été ainsi perdue. Si le cratère avait appartenu à cette portion enfoncée dans le manteau, la preuve directe de la collision aurait disparu à jamais.

⁵ Prononcer «Tchikchouloub»!

Cette argumentation a beau être correcte, elle est insatisfaisante pour un jury exigeant. Il est trop facile de se cacher derrière la subduction pour expliquer l'absence de cratère. Walter Alvarez et d'autres vont tenter par tous les moyens de retrouver la trace du forfait. Quand on y sera parvenu, on s'apercevra que la météorite a touché une région côtière du Yucatan et que le cratère résultant est à cheval sur le continent et sur le golfe du Mexique. S'il n'est pas répertorié dans la liste des cratères d'impact terrestres, c'est qu'il est enfoui à 2 km de profondeur.

Il se trouve que le cratère cherché n'était pas complètement inconnu. Dès les années cinquante, les géologues de la compagnie pétrolière mexicaine Petroleos Mexicanos avaient décelé l'existence d'une vaste structure circulaire ayant pour centre Puerto Chicxulub, sur la côte septentrionale du Yucatan, une vaste presqu'île mexicaine s'avancant dans le golfe du Mexique. Ils l'avaient interprétée comme les restes d'un volcan souterrain. On ne trouve pas de pétrole dans un volcan, si bien que les recherches avaient été abandonnées pour un temps, puis reprises par deux chercheurs de la compagnie, A. Camargo Zanoquera et G. Penfield. Ils furent les premiers à interpréter la structure circulaire de Puerto Chicxulub comme les restes d'un impact météoritique. Cependant, tenus à la confidentialité qui est de règle dans les entreprises commerciales, ils ne firent qu'une brève communication en 1981 dont ils ne publièrent qu'un résumé passé inaperçu. La méthode qui permet aux géologues de la compagnie pétrolière de retrouver le cratère peut surprendre le profane. Elle utilise les anomalies de la pesanteur (chap. 9).

Le nord du Yucatan offre un paysage plat, sans relief. Des géophysiciens à la recherche de l'or noir doivent dresser une carte de la densité des roches en profondeur. Selon la structure qu'elle révèle, ils peuvent se rendre compte s'ils ont une chance d'y trouver du pétrole. Une méthode efficace consiste précisément à étudier les variations locales de la pesanteur, ou accélération terrestre g .

Comme la Terre est légèrement renflée à l'équateur, le centre de la Terre y est un peu plus distant qu'aux pôles. A l'aide d'un *gravimètre* (fig. 8.3), un instrument de mesure très précis, on vérifie que g y est plus faible qu'aux pôles, ce qui se traduit par une légère diminution du poids d'un objet quelconque. La rotation de la Terre renforce cette différence entre hautes et basses latitudes; quant à l'influence du mouvement de la Lune et du Soleil, elle a ceci de particulier qu'elle se manifeste sous la forme très complexe des marées. Toutes ces sources de variation de g sont parfaitement prévisibles et calculables. A ces conséquences globales de l'attraction universelle et de la mécanique, il faut ajouter des modifications locales provenant du relief environnant et de la densité des roches au voisinage du point de mesure. Comme ces variations sont très faibles, la sensibilité de l'instrument doit être considérable.

Un cratère météoritique présente nécessairement un certain relief. Durant les 65 millions d'années qui se sont écoulées depuis l'impact du Yucatan, des sédiments plus légers se sont déposés sur une profondeur d'un kilomètre. Ils n'ont pas complètement éliminé le profil du cratère qui, pour les géologues de la compagnie pétrolière, est apparu comme une énorme structure circulaire. Son centre est situé à la verticale de Puerto Chicxulub.

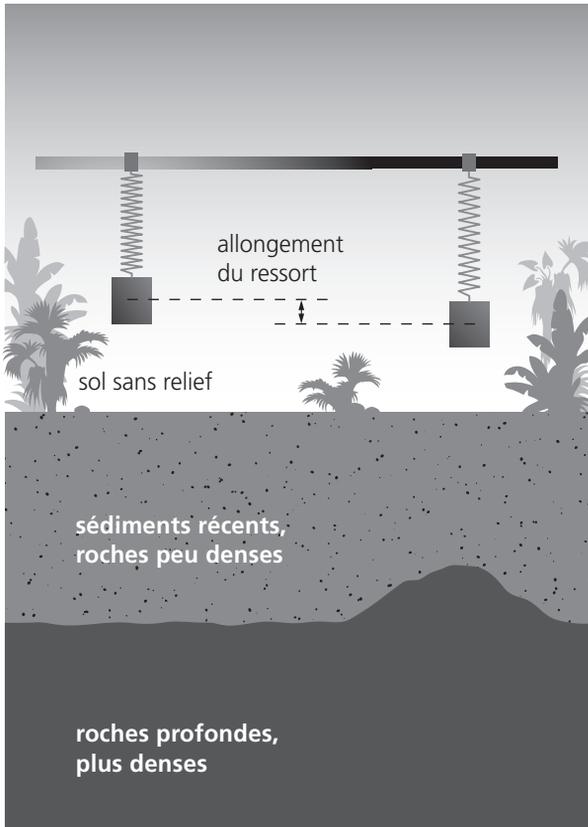


Fig. 8.3 Pour mesurer la pesanteur g en un point de la surface du globe, le géologue se sert d'un gravimètre, un instrument qui peut mettre en évidence des variations relatives de l'ordre de un cent millionième. Il est symbolisé ici par un bloc fixé à l'extrémité d'un ressort, un avatar du gravimètre. Quand la valeur de g s'accroît, le ressort s'allonge: c'est le principe du pèse-personne, à cela près qu'un bon repas pris la veille de la mesure a plus d'effet que la structure géologique du sous-sol.

Le cratère finit cependant par être retrouvé par une autre voie. Les géologues cherchant des affleurements de la limite Crétacé-Tertiaire autour du golfe du Mexique furent surpris d'y découvrir des structures spéciales que l'on ne retrouvait pas en d'autres points du globe. Ils attribuèrent ces anomalies à un raz-de-marée gigantesque qui aurait accompagné la chute de la météorite. De là à imaginer que l'impact avait eu lieu dans cette vaste région, il n'y avait qu'un pas, qui ne fut pas facile à franchir. Finalement, en 1991, ceux qui recherchaient les traces de la météorite et les géologues de la compagnie pétrolière mirent leur expérience en commun et la découverte du cratère fut officiellement annoncée [115]. Un peu plus tard, on retrouva les carottes qui avaient été prélevées lors des sondages initiaux. Elles montrent que le cratère de Chicxulub date effectivement de la limite Crétacé-Tertiaire.

La météorite au tribunal des sciences de la Terre

Aujourd'hui, la communauté scientifique est acquise à la réalité de la météorite de Chicxulub. De nouveaux indices parlent en faveur de l'origine météoritique de la couche d'argile marquant la limite Crétacé-Tertiaire [106]. Sur une grande partie des continents, on pense même avoir retrouvé des traces des incendies que l'impact aurait déclenchés [116]. Les géologues sont cependant partagés sur un point très important: est-ce vraiment à la météorite que l'on doit attribuer la responsabilité de l'extinction de masse? Pour la plupart d'entre eux, la réponse est affirmative; quelques irréductibles cherchent d'autres causes à la disparition de tant d'espèces.

Ce n'est pas à un physicien de trancher ce débat de spécialistes. Il peut cependant tenter de l'éclairer en invoquant les règles plus ou moins codifiées de la démarche scientifique. Pour simplifier la discussion qui suit, on se contentera de mentionner, parmi les thèses en concurrence avec celle de la météorite, celle qui attribue au volcanisme la responsabilité de l'extinction de la limite Crétacé-Tertiaire. Le principal indice en sa faveur est constitué par les *trapps*⁶ du Deccan, une énorme coulée de lave basaltique apparue au nord-ouest de l'Inde il y a à peu près 65 millions d'années. Elle occupe la surface de la France et a duré au moins un demi-million d'années [117, 118]. Si le volcanisme constitue un suspect dans l'affaire de la disparition des dinosaures, c'est que, en 1983, on a découvert que quelques grammes d'iridium avaient été rejetés dans l'atmosphère lors d'une éruption sur l'archipel d'Hawaïi [119]. Entre ces deux théories, l'enjeu est clair: l'extinction a-t-elle été instantanée ou graduelle?

Avant de passer à la liste des mérites ou des défauts de la théorie de la météorite, il est nécessaire de souligner certains aspects psychologiques qui n'ont pu manquer de peser sur le débat.

Les extinctions de masse étaient connues depuis longtemps au sein des sciences de la Terre. Elles étaient attribuées à des causes diverses, agissant graduellement. Ce point de vue gradualiste constituait une sorte de règle de vie pour les géologues dont on a mentionné plus haut les réticences à l'égard du catastrophisme, la thèse opposée. Il est donc bien naturel que les géologues aient d'abord accueilli avec méfiance le «scénario catastrophe» de la météorite, d'autant plus que, pendant plus d'une dizaine d'années, aucun cratère d'impact n'était venu le corroborer. Il est vraisemblable que cette réticence se prolonge aujourd'hui encore chez certains des opposants au scénario catastrophe. Par ailleurs, le fait que le promoteur le plus actif et le moins hésitant fût un physicien âgé et sans formation en géologie était susceptible de hérisser des gens qui avaient passé des années à appliquer des méthodes éprouvées. Enfin, et c'est un point qu'il est nécessaire de souligner, la science de la nature est très conservatrice. On dit que lorsqu'une théorie ancienne est supplantée par une concurrente plus jeune, ce n'est pas parce que les adeptes de la première version se laissent convaincre par les promoteurs de la seconde,

⁶ En néerlandais et en suédois, ce mot signifie «escalier». Dans la littérature, on le rencontre aussi orthographié avec un seul p.

mais seulement parce qu'ils finissent par mourir. Ce conservatisme, loin de n'être que la malheureuse conséquence des effets du vieillissement sur le cerveau, est un rouage indispensable au bon fonctionnement de la méthode scientifique. Il oblige celui qui veut faire triompher des idées nouvelles à accumuler les preuves en leur faveur et à affûter ses arguments. Ce que ne comprennent visiblement pas les charlatans ou les illuminés qui cherchent à imposer les diverses manifestations des pseudo-sciences, qu'elles se nomment astrologie, spiritisme, voyance ou chiromancie. La liste de ces absurdités de mauvais aloi, loin d'être close, s'allonge chaque jour.

Dans ce qui suit, on passe d'abord en revue les avantages et les inconvénients du scénario de la météorite. Chaque point que gagne ce scénario est perdu par la théorie concurrente, et vice versa. Le lecteur se doit d'avoir constamment en tête que les jugements qui suivent sont le fait d'un non-spécialiste.

Le scénario de la météorite est convaincant

Le premier mérite de ce scénario est immense. Toute théorie qui prétend supplanter une version plus ancienne doit avoir un *caractère prédictif*. On entend par là que la théorie nouvelle doit permettre la prédiction d'un fait nouveau et inconnu jusqu'ici. Il faut aussi que la version ancienne ne puisse en expliquer l'existence. Dans le cas de la météorite, c'est le cratère de Chicxulub qui constitue le fait nouveau (une fois de plus, les enquêtes scientifique et policière se rejoignent). Bien d'autres faits pourraient être rangés dans la même catégorie, mais ils sont plus techniques et les experts ne s'accordent pas toujours quant à leur signification; ils ne sont pas discutés ici.

La *coïncidence temporelle* est parfaite entre la chute de la météorite et l'extinction de certaines espèces fossiles. Ce deuxième argument est très fort, lui aussi. Le volcanisme du Deccan s'est étendu sur un demi-million d'années, période instantanée si l'on parle de dinosaures, dont les fossiles sont rares et difficiles à dater avec une précision supérieure à un million d'années. Cette même période, en revanche, est très longue à l'échelle des fossiles de foraminifères: certaines espèces ont disparu sans conteste de part et d'autre du dépôt de la couche d'argile⁷. C'est là une simultanéité que le volcanisme ne saurait expliquer. Les chercheurs sont comme les policiers: ils se méfient des coïncidences. De ce point de vue, la théorie de la météorite tueuse marque un point important, même si, pour quantités d'autres espèces disparues à la limite Crétacé-Tertiaire, le lien temporel entre météorite et extinction est plus difficile à établir. Par ailleurs, dans le Deccan, l'anomalie d'iridium a été retrouvée entre deux coulées de laves issues du volcanisme accusé de l'extinction. Cette découverte prouve que l'iridium rejeté par les volcans dans l'atmosphère et celui qui est contenu dans la couche d'argile sont dus à des phénomènes indépendants [119].

⁷ Charles Frankel narre une expédition organisée en commun par les partisans et les adversaires de la disparition brutale des foraminifères [118]. Dans l'esprit de chacun des participants, elle permet d'éliminer la thèse d'une extinction progressive.

Le troisième mérite de la thèse de la météorite n'est pas moins grand. Autrefois, on affirmait volontiers que les dinosaures avaient disparu parce que les mammifères mangeaient leurs œufs. Il s'agit là d'une spéculation invérifiable qui a peut-être quelque mérite quand il s'agit des dinosaures, mais qui n'explique pas la disparition des ammonites ou celle de certaines espèces de foraminifères. Le scénario catastrophe de la météorite, en revanche, n'a rien d'une spéculation gratuite. Il s'est imposé comme une *réponse crédible à une découverte inattendue*, celle de l'abondance anormale d'iridium dans la couche limitrophe d'argile. Depuis la découverte du cratère de Chicxulub (et dans la mesure où la datation de ce cratère n'est pas remise en cause), une théorie concurrente comme celle du volcanisme est dans une situation défavorable. Elle ne peut se contenter d'apporter des arguments en sa propre faveur. *Elle doit démontrer que ce que le volcanisme peut faire, la théorie de la météorite ne le peut pas.* A elle incombe, en somme, le fardeau de la preuve. Une telle entreprise est toujours aléatoire: les méthodes des sciences de la nature permettent plus aisément de démontrer l'existence d'un fait ou d'un objet que son inexistence: il est plus aisé de trouver une aiguille dans une botte de foin que de démontrer qu'il n'y en a pas!

Sur certains points, les scénarios de la météorite et du volcanisme sont à égalité, le scénario de la météorite ne faisant pas appel à des hypothèses invérifiables, un point où il est à égalité avec la théorie du volcanisme dévastateur. De très nombreux groupes de chercheurs ont consacré leur temps et leurs forces à accumuler divers indices permettant de retrouver d'autres endroits du globe où la limite Crétacé-Tertiaire était visible, pour y chercher de l'iridium, pour découvrir le cratère creusé par la collision et pour amasser d'autres indices en faveur du scénario de la météorite. Pour leur part, les partisans d'une extinction due au volcanisme peuvent présenter les mêmes certificats de bonne conduite scientifique. Ce dernier point confère un avantage certain aux deux scénarios concurrents sur d'autres explications de l'extinction majeure de la fin du Crétacé, mais ne permet pas de les départager.

Il est enfin des points où la thèse de la météorite est en ballottage défavorable face au volcanisme ou à d'autres scénarios concurrents.

Le groupe des ammonites semble avoir commencé à dégénérer avant la limite fatidique. Leur disparition à cette date aurait pu n'être qu'une coïncidence accentuée par les incertitudes des datations. Même si les coïncidences ont mauvaise presse auprès des sciences de la nature, rien ne les empêche de se produire. Dans le cas des ammonites, une cause encore indéterminée aurait pu les fragiliser (le refroidissement graduel des océans à la fin du Secondaire pourrait en être un exemple). La météorite leur aurait porté – peut-être – un dernier coup.

Depuis l'aube du Cambrien, qui marqua il y a 570 millions d'années le début de l'ère Primaire, on compte cinq extinctions majeures, celle de la limite Crétacé-Tertiaire étant la dernière en date (tab. 8.1). Si l'on admet qu'une météorite de la taille de celle de Chicxulub frappe la Terre en moyenne tous les 100 millions d'années, la statistique nous autorise à associer chacune de ces extinctions majeures à une collision. Pour que cette liaison soit avérée, il faudrait que l'on retrouve des traces d'impact à chacun des niveaux associés. Jusqu'ici les résultats sont maigres, parce que les indices disparaissent avec le

Tableau 8.1 Les cinq extinctions majeures des six cents derniers millions d'années. D'après Charles Frankel [118].

ÈRES	PÉRIODES	GROUPES AFFECTÉS
Ere Paléozoïque ou Primaire	Cambrien 570 - 505	Extinctions majeures Coraux, trilobites, brachiopodes Flore, coraux, plancton, invertébrés, poissons Flore, reptiles, plancton, coraux, poissons... Reptiles, invertébrés marins Dinosaures, reptiles, plantes, plancton, coraux, poissons invertébrés
	Ordovicien 505 - 438	
	Silurien 438 - 408	
	Dévonien 408 - 360	
	Carbonifère 360 - 286	
	Permien 286 - 248	
Ere Mésozoïque ou Secondaire	Trias 248 - 213	
	Jurassique 213 - 144	
	Crétacé 144 - 65	
Ere Cénozoïque ou Tertiaire		

temps. C'est notamment le cas des cratères d'impact [120]. Dans certains cas, on a découvert les indices d'une collision météoritique, mais ils ne sont pas déterminants et peuvent prêter le flanc à la polémique. En contrepartie, on pense avoir retrouvé des traces d'impacts à des niveaux ne correspondant pas à une extinction. Comme les recherches d'impacts sont plus difficiles à mesure que l'on remonte dans le passé et que la chasse aux indices se poursuit, toute conclusion abrupte est prématurée. La situation actuelle suggère de manière insistante qu'il existe un lien étroit entre l'extinction de masse et le choc météoritique, mais l'erreur judiciaire n'est pas exclue.

En décembre 2001, une équipe de géologues a commencé de forer un tube vertical de plus de mille mètres de long et de 7,6 cm de large au travers du cratère de Chicxulub. Les échantillons que l'on a ainsi retirés permettront d'éclairer encore notre lanterne, et peut-être de répondre définitivement à la question: la météorite est-elle responsable de la disparition des dinosaures? Nul ne peut encore l'affirmer aujourd'hui. Seule l'accumulation de faits nouveaux parviendra un jour à mettre un terme au débat.

Hasard ou nécessité?

En tout état de cause, il convient de distinguer entre faits et hypothèses. Qu'avons-nous appris depuis le jour où Walter Alvarez a tendu à son père un morceau de roche de la limite Crétacé-Tertiaire?

On peut d'abord affirmer qu'il y a réellement eu collision à la fin du Crétacé. Nous connaissons le lieu de l'impact et la taille approximative de la météorite. Nous avons la preuve que certaines espèces ont été anéanties au moment même du choc: c'est le cas des foraminifères de grande taille. En d'autres termes, une collision doit être envisagée comme la cause probable d'une extinction majeure.

Cette moisson est incomparable, même si les lignes qui précèdent ont été, à dessein, formulées avec prudence. Le flou qui subsiste, en effet, délimite un vaste domaine de recherche présent et futur. L'enjeu en est une question centrale de l'évolution: dans quelle mesure celle-ci est-elle le fruit du *hasard*? L'importance des changements climatiques ou de la dérive des continents sur l'évolution des espèces n'est contestée par personne [106]. C'est dire que le hasard influence l'évolution. Mais s'il s'avère que chaque extinction de masse est la conséquence d'un événement aussi fortuit et imprévisible que la collision avec une météorite géante, c'est une preuve encore plus forte du *caractère aléatoire de l'évolution darwinienne*. Il faut garder à l'esprit un fait important. L'apparition de formes nouvelles est de règle après une extinction majeure. En disparaissant, les dinosaures ont fait place nette pour les mammifères qui, sans doute, n'auraient jamais pu se développer comme ils l'ont fait au Tertiaire si les monstres reptiliens s'étaient perpétués.

Dans ces conditions, il faut considérer l'avènement tardif de l'être humain comme le résultat d'innombrables événements imprévisibles. Il serait notamment la conséquence inattendue d'un événement aléatoire, la collision d'un astéroïde avec la Terre. Une telle remarque est en contradiction flagrante avec la conception de Hoyle et selon laquelle l'apparition de l'être humain est le résultat d'un plan inscrit dans le choix des constantes universelles.

On ne peut cependant omettre le rôle de la *nécessité* dans le tracé de l'évolution, dans la mesure où les contraintes imposées par la physique et par la biologie n'autorisaient certainement pas n'importe quelle trajectoire. Mais qui a fixé les lois de la physique? Faire soigneusement et sans parti pris la distinction entre les apports respectifs du hasard et de la nécessité est une tâche formidable qui nous attend encore. Trancher péremptoirement entre les deux conceptions relève de la croyance.

Il se peut aussi que chaque extinction majeure n'ait été que le résultat d'une vulnérabilité particulière de la biosphère et de son environnement. Le climat, la composition de l'atmosphère, la distribution des continents et celles des espèces animales et végétales se modifient sans cesse, même sans intervention extraterrestre. Il se peut que, de temps en temps, ce système incroyablement complexe devienne très instable, très vulnérable. Dès lors, un événement qui, en d'autres temps, ne créerait que des perturbations locales, pourrait déclencher une catastrophe planétaire et une extinction majeure. Cela s'est-il passé ainsi à la fin du Crétacé? L'évolution darwinienne acquerrait alors un autre statut. Il serait certes encore impossible de prédire sa trajectoire future, mais il se pourrait qu'elle soit soumise à des contraintes plus étroites. Si cette éventualité est correcte, la nature de l'événement capable de déclencher une extinction serait moins décisive que celle de l'instabilité de la biosphère. On arriverait ainsi à une sorte de synthèse du gradualisme et du catastrophisme.

Sans Alvarez père et fils, il n'est pas sûr que la météorite de la limite Crétacé-Tertiaire aurait été découverte, que la liaison avec l'extinction de masse aurait été envisagée et, surtout, que le problème de la *contingence*⁸ dans l'histoire de la vie aurait été posé de façon aussi nette.

En guise de conclusion

Même si l'histoire de la météorite de Chicxulub n'est pas terminée, il vaut la peine d'en tirer quelques conclusions.

La première remarque qui vient à l'esprit, c'est que Luis Alvarez a démontré qu'un physicien nucléaire pouvait encore faire une découverte majeure dans une discipline éloignée de la sienne et à un âge où, prétendent les physiciens, ses collègues ne s'intéressent plus qu'à la thermodynamique, à l'histoire des sciences et aux bons vins. Le cas d'Alvarez est probablement unique. Il est cependant un encouragement pour ceux qui craignent que les scientifiques ne soient usés quand ils franchissent le cap de la trentaine.

Il vaut également la peine de se pencher sur la polémique soulevée après la publication du premier article avançant l'hypothèse de la météorite tueuse [114]. Plus de vingt ans après, elle n'est pas éteinte. L'historien William Glen remarque notamment qu'il était prévisible que l'hypothèse de la météorite tueuse serait accueillie fraîchement [121]. Pour un géologue, l'hypothèse d'une catastrophe d'origine extraterrestre était rangée avec les histoires de soucoupes volantes et de petits hommes verts. Cette réaction était à la fois inévitable et saine. Les chercheurs les plus difficiles à convaincre furent ceux qui avaient déjà proposé une autre explication de l'extinction de masse. Depuis que le cratère de Chicxulub a été découvert, nombreux sont les représentants des sciences de la Terre qui ne nient plus l'existence de la météorite tout en minimisant ses effets: encadré dans l'article cité à la référence [116], on trouve un texte d'une demi-page qui n'apporte qu'une seule information nouvelle. Elle concerne le système de défense des opposants plutôt que la cause des extinctions majeures. Les auteurs de l'encadré reconnaissent l'extinction soudaine des foraminifères: «Ceci montre que la crise [...] fut un phénomène complexe caractérisé par une combinaison d'extinctions soudaines entraînées par des cataclysmes, telle celle des foraminifères [...] et d'extinctions progressives, telles celles des dinosaures et des ammonites.» [122]

Une pareille attitude est carrément schizophrénique. Devant l'accumulation des faits nouveaux, on accepte que des catastrophes planétaires puissent avoir une influence sur l'évolution des espèces, mais on s'efforce encore d'en limiter la portée. Le désaccord cesse d'être factuel pour devenir purement verbal. On songe aux circonlocutions utilisées par un Etat refusant de reconnaître qu'un génocide a entaché son histoire nationale. Sans s'en rendre compte, les adversaires de la conception de la météorite tueuse se sont rangés sous la bannière de leurs adversaires, mais leur opposition irrationnelle au catastrophisme a dissimulé leur ralliement à leurs propres yeux...

⁸ On dit d'un événement qu'il est contingent s'il peut se produire ou non, ce qui implique que ses causes sont aléatoires. Contingence s'oppose ici à nécessité.

L'avenir tranchera et nous dira si, oui ou non, une collision météoritique peut déclencher une extinction majeure instantanée et modifier ainsi de manière irréversible le cours de l'évolution. C'est là, et là seulement, que se situe l'enjeu d'une branche nouvelle de la paléontologie.

«Dieu dit: Qu'il y ait des luminaires dans l'étendue des cieux, pour séparer le jour de la nuit: ils serviront de signes pour marquer les saisons, les jours et les années. Ils serviront aussi de luminaires dans l'étendue des cieux, pour éclairer la terre. Et il en fut ainsi.» [Genèse 1, 14-15].

Avant de porter les yeux au-delà du système solaire

L'Antiquité connaissait cinq planètes. Par ordre d'éloignement du Soleil, c'étaient Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. C'est Copernic, au XV^e siècle, qui a proposé, avec un certain luxe de précautions, d'ajouter la Terre à cette liste en la plaçant entre Vénus et Mars. Du même coup, il chassait notre planète de son propre jardin d'Eden, le centre de l'univers, où il installait le Soleil. Il faudra attendre le XVIII^e siècle pour qu'une septième planète, Uranus, soit découverte par hasard. Neptune et Pluton vont venir compléter la liste au cours des deux siècles suivants. Il est douteux que la série s'allonge encore, bien que l'on ne doive jamais dire «jamais».

Les planètes de notre système solaire se divisent en deux groupes. Les *planètes telluriques*, denses et solides, sont les plus proches du Soleil. Les *géantes gazeuses* ont un noyau solide enveloppé d'une épaisse atmosphère gazeuse. Jupiter et Saturne en constituent les représentants les plus prestigieux alors qu'Uranus et Neptune sont un peu à la traîne. Si l'on reporte les distances moyennes au Soleil de chacune des huit planètes, on note que Mars et Jupiter sont séparées par une vaste zone que, jusqu'au XIX^e siècle, on croyait dépourvue de corps célestes. La découverte de la minuscule Cérès, le 1^{er} janvier 1801, fut rapidement suivie de celles d'un grand nombre de corpuscules de tailles encore plus réduites. Plutôt que d'en faire des planètes, on les considère aujourd'hui comme des membres de la *ceinture principale d'astéroïdes*. Quant à Pluton, découverte en 1930, elle constitue à elle seule une troisième catégorie de planètes. On la considère comme l'objet le plus volumineux de la *ceinture de Kuiper*, un groupe d'astéroïdes qui s'étend au-delà de l'orbite de Neptune (fig. 2.8).

Prises individuellement, les planètes telluriques diffèrent considérablement entre elles. Suivant que le Soleil l'éclaire ou non, un point de la surface désolée de Mercure voit sa température faire des bonds considérables. Les hautes pressions et les températures élevées dues à un effet de serre considérable ont transformé la surface de Vénus en une succursale de l'enfer. Quant à Mars, on y trouve un peu d'eau, reliquat d'une situation très ancienne où les conditions étaient peut-être propices à l'apparition de la vie. Les satellites géants des grandes planètes réservent aussi des surprises: Io est volcanique, Europe est couverte d'une couche de glace abritant peut-être de l'eau à l'état liquide. Chaque planète est un monde par elle-même. C'est dire à quel point la recherche de mondes planétaires extrasolaires est prometteuse. Elle ne

s'inscrit pas seulement dans l'univers de l'astronomie mais aussi, on l'espère, dans celui de la biologie. Quand cette question aura-t-elle une réponse? Aujourd'hui, il est impossible de se prononcer. Nombreux sont ceux qui pensent que la Terre n'est pas le seul havre de la vie, mais l'opinion contraire est également répandue.

Avant de quitter notre système solaire à la recherche de mondes nouveaux, il vaut la peine d'esquisser l'épopée qui a conduit à la découverte des planètes inconnues des anciens, ce qui nous permettra de broser le portrait d'un géant parmi les géants de la science, Isaac Newton.

Uranus, après des milliers d'années de disette

Personne ne sait qui a découvert Vénus, Mars, Jupiter, Saturne et Mercure. Les plus brillantes de ces planètes étaient sans doute connues des chasseurs de la préhistoire. A la fin du XVI^e siècle, grâce à Copernic, Kepler savait déjà que la Terre était également une planète. Il déploya en vain des trésors d'ingéniosité pour expliquer pourquoi l'univers comptait exactement six planètes et pourquoi leurs distances au Soleil ne pouvaient différer des valeurs observées. Il posait là une «mauvaise question» puisque les connaissances de son époque étaient insuffisantes pour que l'on pût y répondre. Au moment de la formation du système solaire, le hasard a certainement joué un rôle important, si bien que nous ne savons pas si la question a un sens.

Ce n'est qu'en 1781 qu'une nouvelle planète fit enfin son apparition. C'est le musicien et astronome britannique d'origine allemande, Sir William Herschel (1738-1832), qui découvrit par hasard Uranus. Au cours de sa longue vie, il construisit quantité de télescopes plus efficaces que tout ce qui existait jusqu'alors, ce qui facilita bien sûr la découverte: dans la lunette de Herschel, la nouvelle planète apparaissait, non comme un point lumineux comme le font les étoiles, mais comme une petite tache se déplaçant de nuit en nuit sur l'arrière-fond stellaire. Bien qu'elle soit tout juste visible à l'œil nu, elle est beaucoup moins brillante que les planètes connues dans l'Antiquité. Il est donc bien compréhensible qu'il ait fallu attendre la construction d'un instrument optique de qualité pour qu'elle puisse être observée et assurer ainsi la réputation de Herschel.

Quand une planète est découverte, les astronomes cherchent à en calculer l'orbite. Pour ce faire, ils ont besoin de connaître avec précision un certain nombre de positions successives du nouvel objet céleste. Ils doivent d'abord se convaincre que le nouvel objet est bien une planète et non une comète. L'un des critères retenus est la forme de la trajectoire. A peu près circulaire pour une planète, elle est en général très allongée pour une comète qui, au surplus, s'écarte volontiers du *plan de l'écliptique*, le plan dans lequel se déplacent peu ou prou les planètes et la Lune. Il s'agit là d'un souvenir du disque de poussières et de gaz à partir duquel s'est formé le système solaire. Il faut noter que la détermination de la trajectoire d'Uranus ne fut pas une sinécure car sa période de révolution s'élève à 84 ans. En quelques semaines ou quelques mois, la planète ne décrit qu'une bien faible portion de son orbite, et l'on peut faire passer bien des ellipses différentes par quelques points de la voûte

céleste trop proches les uns des autres, chaque observation étant entachée d'une incertitude inhérente au processus de mesure.

C'est alors que l'astronomie allait tomber sous l'emprise d'une variante de la numérogie, cette discipline ésotérique mal définie¹ qui attribue un sens magique ou prédictif aux nombres.

La loi de Titius-Bode

A la fin du XVIII^e siècle, rien n'était connu de la formation du système solaire, si ce n'est que l'hypothèse de la nébuleuse primitive se constituait peu à peu (chap. 4). La question de Kepler redevenait actuelle, mais sous une autre forme: était-il possible d'expliquer les distances respectives des planètes au Soleil? Puisque les planètes décrivent des trajectoires presque circulaires, le rayon de leurs orbites est une bonne mesure de ces distances.

Une «explication» des valeurs des distances aurait nécessité la compréhension détaillée du processus de formation du système solaire. En son absence, il restait le recours à une martingale, ce à quoi plusieurs astronomes se sont consacrés. Parmi eux, Immanuel Kant, mais surtout l'astronome allemand Johann Daniel Titius (1729-1796).

Comment imaginer une martingale permettant de reproduire les distances planétaires? Les mathématiciens ont une recette à disposition. Il suffit de trouver une *série* qui fasse l'affaire.

Une série est une suite infinie de nombres qui se construit à l'aide d'une règle très simple: les trois séries qui suivent ne devraient pas désarçonner le lecteur. S'il éprouve quelque difficulté à deviner leurs règles de formation, il peut consulter en fin de chapitre l'appendice qui leur est consacré:

1. 1,4,9,16,25,36,49,64,...
2. 1,3,6,10,15,21,28,36,...
3. 1,2,3,5,8,13,21,34,55,...

Quant à la quatrième série, c'est celle que Titius imagine en 1772, soit neuf ans avant la découverte d'Uranus. On l'obtient en deux temps; on commence par 0 et 3, puis on double à chaque fois le nombre précédent:

0,3,6,12,24,48,96,192

Finalement, à chaque membre de la série, on ajoute encore 4 et l'on obtient ainsi la

série de Titius-Bode: 4,7,10,16,28,52,100,196

C'est parce qu'il a beaucoup fait pour la populariser que le nom de l'astronome allemand Johann Elert Bode (1747-1826) a été incorporé à l'intitulé

¹ *Le Petit Robert* l'ignore alors que *Le Petit Larousse* en donne une définition.

de cette série. Elle reproduit en bonne approximation les distances moyennes respectives des planètes au Soleil. Le tableau 9.1 permet de juger si l'accord entre les observations et les prédictions est acceptable.

Tableau 9.1 Pour toutes les planètes connues à la fin du XVIII^e siècle, il y a bon accord entre la distance au Soleil et les prédictions tirées de la série de Titius-Bode, à cela près qu'il manque une planète entre Mars et Jupiter pour que la correspondance soit complète. Il est à noter que la mise en évidence de la série date de 1772, tandis que la découverte d'Uranus ne remonte qu'à 1781. Pour les besoins de la cause, chaque terme de la troisième colonne du tableau a été divisé par dix. On peut ainsi comparer sa valeur avec une distance exprimée en unités astronomiques (UA).

Planète	Distance observée en UA	Série de Titius-Bode
Mercure	0,38	0,4
Vénus	0,72	0,7
La Terre	1	1
Mars	1,52	1,6
–	–	2,8
Jupiter	5,20	5,2
Saturne	9,55	9,6
Uranus	19,2	19,6
–	–	38,8
–	–	77,2

Puisque la distance d'Uranus au Soleil s'insérait si bien dans la série, beaucoup en vinrent peu à peu à parler de la *loi de Titius-Bode* plutôt que d'une coïncidence numérique remarquable. Le statut de la loi était pourtant encore fragile. Au lieu de découler d'une hypothèse scientifique crédible, elle avait été inventée pour reproduire les valeurs observées. Sa construction simple constituait en fait son seul mérite: on peut toujours inventer une série qui reproduise approximativement quelques points d'observation, mais si sa construction est très complexe, elle perd toute crédibilité.

Un autre point faible de la loi de Titius-Bode provenait de la lacune séparant Mars de Jupiter. Aucune planète n'occupait la case correspondante. Et les espoirs étaient faibles d'en découvrir une puisque, à une distance relativement faible de la Terre, même une planète de rayon modeste aurait été connue depuis longtemps, probablement dès l'Antiquité.

Les petites planètes

A la fin du XVIII^e siècle, quelques astronomes allemands se mettent néanmoins à la poursuite de la planète manquante. Pour ne pas rester bredouilles, ils imitent les chasseurs en organisant une battue! Ils commencent par fonder une association qu'ils baptisent les «Déetectives de Lilienthal» et à laquelle ils attri-

buent une seule et unique mission: la découverte de la planète transmarienne. Ils projettent de découper en vingt-quatre secteurs la zone de la voûte céleste susceptible d'abriter la fugitive. Chaque secteur est attribué à un astronome européen différent. Il est chargé de passer au peigne fin son propre lopin.

A l'époque des guerres napoléoniennes, le courrier chemine lentement. Dans la nuit du 1^{er} janvier 1801, alors que l'astronome sicilien Giuseppe Piazzi (1746-1826) ignore tout des Détectives de Lilienthal et du secteur céleste qu'il aura à surveiller, il fête l'entrée dans le XIX^e siècle par la découverte d'un astre nouveau dont il pense que ce pourrait être une planète. Pendant plusieurs mois, le corps céleste cesse d'être observable: il est trop proche du Soleil. Ce qui donne l'occasion au philosophe allemand Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831) de publier un ouvrage dans lequel il se sert de la logique pour démontrer que le nombre de planètes ne peut pas dépasser sept. Il se moque des astronomes qui se servent d'une lacune dans une série arithmétique pour prédire l'existence d'une huitième planète... [123].

Les maigres mesures que Piazzi avait pu faire avant que la planète hypothétique ne s'éclipse n'étaient ni assez précises ni assez nombreuses pour qu'une trajectoire sûre puisse être calculée. A l'automne 1801, la planète inconnue ne peut être retrouvée, jusqu'au jour où Gauss met au point une méthode qui facilite la détermination de l'orbite. Il recommande de tracer toutes les ellipses ayant le Soleil pour foyer² et passant au voisinage des points d'observation, nécessairement affectés d'une certaine incertitude. Grâce aux outils statistiques qu'il crée pour l'occasion, Gauss montre ensuite comment déterminer l'ellipse qui a le plus de chance de correspondre à la trajectoire cherchée. La méthode générale mise au point par Gauss est utilisée aujourd'hui encore par les astronomes et par les expérimentateurs des sciences exactes.

La théorie de Gauss ne tarde pas à porter ses fruits. Le 1^{er} janvier 1802, l'objet céleste découvert par Piazzi est retrouvé. C'est bien une planète qui reçoit le nom de Cérès. Sa distance moyenne au Soleil est rapidement établie. Elle s'élève à 2,67 UA, bien près des 2,8 UA correspondant à la case vide séparant Mars de Jupiter dans le tableau 1.9. Les partisans de la loi de Titius-Bode peuvent exulter. Après Uranus, Cérès ajoute un témoignage précieux en sa faveur. La série est devenue une loi parfaitement légitime!

La Roche Tarpéienne n'est pas loin du Capitole. Deux points sont susceptibles d'alerter les partisans de la loi. Tout d'abord, Cérès est une très petite planète, une circonstance évidente lors de sa découverte. Selon les dernières mesures, son diamètre atteint 950 km. Il fait piètre figure face à celui de la Lune (3476 km), ce qui implique que le rapport entre le volume de Cérès et celui de notre satellite n'est que de 2/100. En second lieu, la trajectoire de la petite planète est passablement excentrique et fortement inclinée par rapport au plan de l'écliptique. Ces deux remarques auraient dû alerter les Détectives de Lilienthal: même si Cérès avait l'air de s'insérer dans le cortège planétaire et de confirmer la loi de Titius-Bode, quelque chose ne tournait pas rond. On n'allait pas tarder à comprendre la raison de ces anomalies.

² C'est la première loi de Kepler qui l'exige (chap. 3).

Au printemps 1802, le médecin et astronome amateur Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840) découvre une nouvelle petite planète. Baptisée *Pallas*, elle est une petite sœur de Cérès. Comme elle, elle suit une trajectoire excentrique et fortement inclinée par rapport au plan de l'écliptique. Sa distance moyenne au Soleil est comparable à celle de son aînée. Et sa taille est encore moindre! Herschel, perplexe, rejette la classification usuelle et donne le nom d'astéroïdes à Cérès et Pallas, une dénomination qui s'est conservée. Olbers fait alors une proposition ingénieuse: Cérès et Pallas pourraient être deux fragments de l'explosion d'une planète qui, dans le passé, occupait la case que lui avait attribuée la loi de Titius-Bode, ce qui sauvait du même coup la loi. Mais une telle hypothèse impliquait que l'on devait retrouver d'autres astéroïdes entre les orbites de Mars et de Jupiter. Ce qui fut rapidement fait pour les deux astéroïdes suivants, *Juno* et *Vesta*.

Aujourd'hui, on compte plus de 30 000 astéroïdes dont un certain nombre croisent l'orbite terrestre et, à l'image de la météorite de Chicxulub, constituent des menaces potentielles pour notre planète, si bien que la police astronomique les tient à l'œil! L'hypothèse d'Olbers n'a plus cours: on admet actuellement que les astéroïdes sont les témoins d'une planète qui n'a pu se former à cause de la proximité de Jupiter et de la force gravifique importante qu'elle exerce sur les objets passant à sa portée.

Les fantaisies d'Uranus

Vers 1810, la chasse aux astéroïdes n'intéresse plus grand monde et, grâce à l'hypothèse d'Olbers, la validité de la loi de Titius-Bode est universellement admise. Pour les «planétologues», il convient de revenir à Uranus et de déterminer complètement son orbite.

On pourrait s'imaginer qu'il s'agit là d'une tâche routinière et sans signification. On se moque parfois des professeurs Tournesol qui, leur vie durant, comptent et recomptent les étoiles d'un amas ou le nombre de raies d'une variété de zèbre. Il est vrai que de pareilles recherches semblent dépourvues d'intérêt mais leur utilité se manifeste le jour où, grâce à elles, il est possible de réaliser une synthèse importante. Que serait Darwin sans tous les zoologues et tous les botanistes qui l'ont précédé? Ces recherches obscures peuvent aussi conduire inopinément à une découverte importante. Après tout, la radioactivité a été mise en évidence au cours d'une série de recherches de routine sur la fluorescence, et le radium a été isolé à la suite d'une série impressionnante d'analyses chimiques sans grand relief. C'est une surprise de ce genre qui attendait les astronomes qui s'efforçaient de déterminer l'orbite d'Uranus.

Si l'on compare le début du XIX^e siècle avec l'époque qui avait précédé la découverte d'Uranus, plusieurs choses ont changé. La qualité des instruments d'optique est meilleure et, grâce à Gauss, on possède une méthode efficace pour déterminer une trajectoire planétaire à partir de quelques points d'observation. Or, très rapidement, une difficulté surgit.

En consultant d'anciens catalogues stellaires, on s'aperçoit que, si Herschel avait été le premier à se rendre compte qu'Uranus n'était pas une étoile, il était

loin d'être le premier à l'avoir observée. A partir de sa première inscription dans une table céleste, qui date de 1690, on peut suivre sa trace au travers des catalogues successifs où elle est toujours enregistrée comme étoile. Selon Morton Grosser, Uranus a été observée au moins quinze fois avant que Herschel ne la découvre réellement en 1781. Comme la planète accomplit sa révolution en 84 ans, on dispose en 1810 de toutes les indications nécessaires pour que l'orbite d'Uranus soit établie avec la précision voulue [123].

Et c'est là que les choses se corsent. Il faut réaliser que les lois de Kepler ne fixent pas seulement la forme de la trajectoire d'une planète, une ellipse ayant le Soleil pour foyer, mais aussi ses temps de passage en chaque point de l'orbite. Pour pouvoir affirmer que l'on a identifié l'orbite d'une planète, il faut avoir déterminé à la fois sa trajectoire et l'horaire de son passage en chaque point. Or, dans le cas d'Uranus, la tâche ne paraît pas possible: aucune orbite n'est compatible à la fois avec les anciennes observations et celles qui ont été faites depuis que Herschel l'a découverte. Avant 1820, la planète est en avance sur le plan de vol établi selon les lois de Kepler puis, dès 1830, elle est systématiquement en retard sur l'horaire prévu. Face à cette énigme, du pain bénit pour les chercheurs, les hypothèses ne manquent pas. Qu'on en juge.

Passons sur les suggestions les plus ahurissantes à nos yeux, notamment celle d'un fluide mystérieux emplissant l'espace. Une telle idée remontait au philosophe et mathématicien René Descartes (1596-1650). Y revenir constituait une véritable régression de la pensée et violait gravement le principe de parcimonie dès lors que Newton avait énoncé sa théorie de la gravitation. Quant à l'hypothèse selon laquelle Uranus avait été touchée par une grosse comète, elle expliquait que les observations anciennes étaient incompatibles avec les mesures plus récentes, à condition toutefois que le choc ait eu lieu à l'époque de sa découverte. Mais cette supposition était surtout un appel désespéré à un *deus ex machina*, un comportement qui ne saurait être légitimé que par l'accumulation de preuves solides. Ces suggestions ne furent pas longtemps prises au sérieux.

Deux autres explications restaient en lice. La première accusait la loi de la gravitation de s'écarter de la forme qu'en avait donnée Newton. La seconde, en revanche, ne la mettait nullement en cause. Elle invoquait l'existence d'une planète inconnue, dont la présence aurait perturbé l'orbite d'Uranus, par l'effet même de la gravitation [123]. Il est temps de se tourner vers Newton.

Il a changé notre vision du monde

Les conquêtes d'Alexandre, de César ou Napoléon ont changé le monde politique de manière durable. Leur action est jugée différemment selon la conception que les historiens ont de leur discipline. Certains ont tendance à minimiser l'empreinte que les grandes figures du passé ont laissée sur l'histoire, ne les voyant que comme des fétus de paille flottant à la surface du torrent qui emporte les peuples et les civilisations. Ils préfèrent mettre en évidence les lois socio-économiques qui seules, pensent-ils, marquent l'évolution historique. Il arrive qu'on en fasse de même avec l'histoire des sciences. Certains de ses représentants ignorent superbement le contenu scientifique dont ils préten-

dent parler et ceux ou celles qui ont participé à son élaboration. Ce point de vue ne heurte pas la logique mais il est si restrictif et si biaisé qu'il suggère irrésistiblement une métaphore, celle de l'aveugle de naissance écrivant un traité sur les couleurs.

Si Newton était mort dans sa petite enfance, ce qui a failli arriver, ses découvertes auraient été faites par d'autres et nous en serions probablement au même point aujourd'hui. Mais chaque être est unique et chaque créateur a son propre style. Newton a laissé une empreinte inimitable sur l'histoire des sciences et celle des idées. Ses découvertes ont changé notre vision du monde. Ne chercher à expliquer la démarche de Newton qu'au travers de l'environnement social, politique ou économique qui fut le sien serait faire preuve d'un parti pris extrême, voire extrémiste: on se doit de mettre en lumière une personnalité aussi déconcertante et démesurée que celle de Newton. Faute de quoi on pourrait donner l'impression que le phénomène Newton est compréhensible, voire même compris. Ce qui est tout simplement absurde. Quand il s'agit d'un Mozart, d'un Vinci ou d'un Newton, l'acte de création n'est pas accessible à notre entendement et à notre intuition. Un biographe récent de Newton, Richard Westfall, s'exprime ainsi: «Plus j'ai étudié Newton, plus Newton s'est éloigné de moi. J'ai eu, à diverses occasions, le privilège de rencontrer nombre d'hommes brillants, dont je reconnaissais sans hésitation qu'ils m'étaient intellectuellement supérieurs. Je n'ai jamais craint de me mesurer à eux [...]. Le résultat de mon étude de Newton a été de me convaincre qu'avec lui il n'y a pas de mesure possible. Il est devenu pour moi tout autre, l'un de cette minuscule poignée de suprêmes génies qui ont façonné les catégories de l'intellect humain, un homme finalement irréductible aux critères qui nous permettent de comprendre nos prochains [...].» [124]

Selon le calendrier julien, c'est le matin de Noël 1642 qu'Isaac Newton voit le jour dans le manoir de Woolsthorpe, hameau du Lincolnshire. On pourrait y voir le début d'un conte de fées, mais c'est bien loin d'être le cas. Le père d'Isaac était analphabète et mourut trois mois avant la naissance de son fils, un prématuré de santé fragile. Quand le petit est âgé de trois ans, sa mère épouse en secondes noces le Révérend Barnabas Smith. Ce riche personnage a eu le triste privilège de passer à la postérité en qualité de parâtre d'Isaac Newton, aux deux sens du terme. Conformément aux désirs de son beau-père, Isaac, confié à la garde de sa grand-mère, doit rester dans la propriété de Woolsthorpe. Pendant ce temps, la jeune Mrs. Hannah Smith va vivre dans la propriété de son second mari, qui décède à son tour en 1653. Isaac Newton ne nous a pas laissé de témoignage sur les sentiments qu'il portait à sa grand-mère. Quant à son beau-père, âgé de soixante-trois ans au moment de son mariage, il semble bien que l'enfant le haïssait, réaction bien naturelle au demeurant. Neuf ans après la mort du Révérend Smith, alors qu'il faisait l'inventaire de ses péchés, Isaac écrit: «Menacé mon père et ma mère Smith de les brûler, eux et leur maison.» A nouveau veuve, la mère d'Isaac revient à Woolsthorpe avec trois enfants de plus, mais le mal est fait: la personnalité d'Isaac Newton va être marquée pour le restant de ses jours par ce qu'il a nécessairement ressenti comme un abandon.

Dans ses jeunes années, Newton passe beaucoup de temps à confectionner d'étranges inventions mécaniques. On cite notamment une maquette de

moulin à vent qu'il équipe d'une roue tirée par une souris. Pour que celle-ci accepte son rôle de bête de somme, il la stimule en plaçant des grains de blé devant elle. Isaac Newton est également doué pour le dessin. Il trace des portraits et des figures géométriques sur les murs de la chambre qu'il loue à Grantham, au grand dam de son hôte, très soulagé quand il finit par quitter les lieux. Car s'il est en pension dans cette petite ville, c'est que l'on y trouve une école dirigée par des puritains de stricte obédience. Le petit Isaac y apprend le latin, la théologie, un peu de grec et d'hébreu, ainsi que les rudiments de l'arithmétique: l'institution forme des propriétaires terriens craignant Dieu.

Lorsque Newton a dix-sept ans, sa mère, qui sait à peine écrire, entreprend de le reprendre à la ferme familiale pour le préparer à son futur métier de propriétaire terrien. C'est un désastre. Newton est victime d'un monstrueux décalage culturel: il n'accepte pas d'abandonner l'étude. Pour lui qui ne s'intéresse qu'à ses livres et à la construction de maquettes mécaniques, toutes les occasions sont bonnes pour désertir. Il se montre insupportable avec sa famille. Heureusement que le maître de Newton à Grantham et le frère de Hannah parviennent à la convaincre que l'avenir de Newton est à l'Université de Cambridge et nulle part ailleurs. Après tout, puisqu'il n'est bon à rien, pourquoi ne pas l'envoyer là-bas?

Cambridge et les années merveilleuses

Isaac Newton arrive au Trinity College de Cambridge en juin 1661. Il est aussitôt immatriculé à l'université. Pour lui, ce pourrait être une seconde naissance. Mais les choses ne sont pas si simples. A Woolsthorpe, il est entouré de serviteurs tandis qu'à Cambridge il ne reçoit que fort peu d'argent, sa mère comptant l'avarice parmi ses défauts. Isaac doit solliciter une bourse. En contrepartie, il s'acquitte de tâches domestiques auprès des étudiants plus fortunés et des membres – *fellows* – du collège. Ce qui ne fait qu'accroître sa tendance à un isolement auquel son caractère le destinait de toute façon. Dès 1664, Newton est nommé «étudiant du collège», ce qui lui permet de rester à Trinity College comme membre permanent. A partir de ce moment, Newton n'a plus de soucis à se faire pour sa carrière et peut se consacrer entièrement à l'étude, au point d'en oublier de manger, ce qui impressionne fort son entourage. Quand un problème s'empare de son esprit, il ne se couche jamais à une heure considérée par d'autres comme normale. Même à la fin de sa vie, ses domestiques devront lui annoncer le dîner une demi-heure à l'avance et, lorsqu'il s'y rendra, si le hasard veut qu'il tombe sur un livre ou un document qui attire son attention, il délaissera son repas des heures durant. La gastronomie ne joue pas plus de rôle dans sa vie que les femmes. [124]

Newton a beau suivre l'enseignement de la philosophie aristotélicienne qui fait partie du cursus universitaire, il l'abandonne assez rapidement au profit de la philosophie «moderne», dont Descartes est un des chefs de file. Il se nourrit aussi de *philosophie naturelle*, cette belle expression qui désigne les sciences de la nature. Dans ce domaine, il doit se contenter de lectures: il est autodidacte par la force des choses. En mathématiques, en revanche, il pourrait avoir un interlocuteur à Cambridge, le mathématicien Isaac Barrow (1630-

1677), mais on ne sait pas quelles furent leurs relations. En 1669, quand il démissionnera de la chaire qu'il occupait, Barrow proposera que Newton lui succède.

A propos de Newton, on parle souvent de l'*annus mirabilis*, littéralement «l'année admirable». On devrait plutôt utiliser le pluriel et parler des *anni mirabiles* qui vont à peu près de 1664 à 1666. Il commence par inventer ce que l'on appelle le *calcul différentiel et intégral*³, l'outil fondamental de la physique dès lors que l'on décrit le mouvement ou le changement. En été 1665, deux épisodes d'une même épidémie s'abattent sur l'Angleterre. Cambridge ferme ses portes, ses étudiants ayant fui la menace.

«La peste (puisqu'il faut l'appeler par son nom),
Capable d'enrichir en un jour l'Achéron,
Faisoit aux animaux la guerre.» [125]

Newton se réfugie à Woolsthorpe. Après le calcul différentiel, il révolutionne l'optique, démontrant notamment que la lumière blanche résulte de la superposition des couleurs du spectre. Il établit encore les lois du mouvement, fondant ainsi la mécanique, et découvre enfin la loi de la gravitation universelle en observant la chute d'une pomme de son verger. Aussi étonnant que cela puisse paraître, il n'y a guère d'exagération dans ce tableau.

Newton ne publie que rarement, et très souvent à la suite de pressions exercées par ses collègues. En 1672, alors qu'il communique pour la première fois l'un des fruits de la période merveilleuse, ce sont ses études sur la nature de la lumière blanche qu'il choisit de rendre public. Il est en revanche très soucieux que la priorité d'une ou l'autre de ses découvertes soit reconnue, si bien qu'il envoie des résumés de certains de ses travaux à ses concurrents potentiels⁴. Ce qui ne l'empêchera pas de mener de longues et âpres querelles de priorité avec certains de ses contemporains, et notamment avec Leibniz. A partir de 1690, des accusations de plagiat sont formulées de part et d'autre à propos de la découverte du calcul différentiel et intégral. Il semble bien que les partisans respectifs des deux mathématiciens n'aient pas été étrangers à l'âpreté de la querelle. Cette guerre microcholine a laissé des traces. Longtemps, la science newtonienne ne quittera guère le sol britannique, les savants britanniques hésitant avant de communiquer les résultats de leurs recherches à leurs collègues continentaux.

Malgré la multiplicité des découvertes de Newton, la période qui va de 1664 à 1666 ne serait pas si merveilleuse s'il n'avait pas posé les fondements de la mécanique et médité sur les prémisses de la loi de la gravitation. Toute l'histoire des idées en sera bouleversée.

³ Newton utilisait une autre nomenclature. Il parlait de la *méthode des fluxions*.

⁴ Cette politique de la communication partielle complique le travail des historiens des sciences de l'époque et notamment celui des biographes de Newton. Les faits qui sont rapportés ici sont conformes à l'opinion générale mais on peut trouver ici ou là des affirmations contredisant certains points de détail de ce récit.

Ce fruit qui joue un si grand rôle dans l'histoire des hommes

Au jardin d'Eden, la pomme est le fruit de la connaissance; sur l'Olympe, avant la guerre de Troie, il est celui de la discorde et de la jalousie; au cœur des Alpes, il est celui d'une liberté que Guillaume Tell arrache au bailli autrichien. Dans le conte de Blanche-Neige, la pomme est source de mort parce qu'elle est empoisonnée. Ce symbole sera repris au XX^e siècle par le mathématicien anglais Alan Turing (1912-1954). Pourchassé par la vindicte victorienne des tribunaux de son pays qui en veulent à son homosexualité, Turing se suicide en croquant une pomme empoisonnée. Comme au jardin d'Eden, la *pomme de Newton* est le fruit de la connaissance. Il existe plusieurs versions de cette anecdote. L'une d'elle est rapportée par John Conduitt, le mari de Catherine Barton, une nièce de Newton: «Dans l'année 1666, [Newton] quitta de nouveau Cambridge [...] pour se rendre chez sa mère dans le Lincolnshire, et un jour qu'il méditait dans le jardin, il lui vint à l'idée que le pouvoir de la pesanteur (qui portait une pomme de l'arbre au sol) ne se limitait pas à une certaine distance de la Terre, mais que ce pouvoir devait s'étendre beaucoup plus loin qu'on ne le pensait d'ordinaire. Pourquoi pas aussi loin que la Lune [...]?» [126]

Pourquoi l'anecdote ne serait-elle pas vraie? Elle correspond à l'expérience que chacun peut faire: comme Vénus surgissant de l'écume, les meilleures idées naissent lorsque l'esprit détendu se livre à la méditation. Newton lui-même, nous dit-on, colportait le récit de la pomme. Keesing a démontré son extrême plausibilité [127], mais elle se heurtera toujours à l'incrédulité de certains. Rupert Hall fait partie de ceux qui mettent en doute cette anecdote [128]. Il ne faudrait pourtant pas en déduire que, sitôt la pomme tombée, la loi de la gravitation universelle est sortie tout armée de l'esprit de Newton comme Athéna de la tête de Zeus.

La pomme de Newton constitue le prologue anecdotique d'un récit narré par S. Chandrasekhar et qui repose sur l'existence d'un manuscrit de Newton, antérieur à 1669 [129]. Il révèle comment Newton a fait pour étendre à la Lune l'action qu'exerce notre planète sur les objets qui tombent sur le sol du fait de leur poids. Même si l'on n'a pas la preuve que les choses se sont exactement passées comme on le relate dans la section qui suit, le récit proposé ne saurait s'écarter beaucoup de la réalité.

De la pomme à la Lune, récit fictif mais néanmoins crédible

Du jour où Kepler énonce ses trois lois (chap. 3), le monde stupéfait peut constater que le Soleil soumet les planètes à un ballet parfaitement réglé. En 1610, Galilée découvre les quatre principaux satellites de Jupiter qui constituent un système solaire en miniature. Il les nomme «astres médicéens» en l'honneur de son protecteur Cosme II de Médicis. Cet usage ne s'est pas perdu. Un coureur de formule 1 porte aujourd'hui un assortiment de marques commerciales à faire pâlir d'envie un sapin de Noël: il faut savoir honorer celui qui paie. Mais les deux cas ne sont pas pareils. Galilée ne pouvait pas imprimer sur ses satellites la bannière du grand-duc de Toscane.

En présence de ces horloges minutieusement agencées, les plus imaginatifs se demandent quelle est la nature des engrenages invisibles qui assurent leur fonctionnement. Le médecin et physicien anglais William Gilbert (1544-1603) suggère que la Terre est pourvue d'un gigantesque aimant, ce qui expliquerait le comportement de la boussole, elle-même une aiguille aimantée. Kepler et d'autres lui emboîtent le pas et attribuent les mouvements planétaires à l'existence d'aimants hypothétiques [130]. La solution de Newton est plus simple et beaucoup plus élégante. Voyant tomber une pomme, il se demande brusquement si l'influence qui s'exerce sur les objets terrestres ne pourrait pas s'étendre à la Lune et expliquer la révolution de notre satellite autour de la Terre. La réaction saine d'un homme de science consiste dans ce cas à chercher un argument à l'appui de son hypothèse. C'est ce que fait Newton en comparant l'accélération de la Lune et celle de la pomme. Il se demandera ensuite ce qu'il peut tirer de cette comparaison.

Au moment où une pomme se détache de sa branche natale, sa vitesse est nulle. Quand elle arrive au sol, elle est animée d'une vitesse d'autant plus élevée que le point de départ est éloigné du sol: durant la chute, *la pomme a été accélérée*. Au chapitre 3, on a rencontré Galilée et les boules qu'il faisait rouler le long d'un plan incliné. Ce que le savant de Pise a démontré, c'est que, si un corps est en chute libre, sa vitesse a beau augmenter constamment, *son accélération est uniforme*: elle ne varie pas au cours de la chute.

Lâchées d'une hauteur de 5 mètres, une pomme ou une pierre atteignent le sol en 1 seconde et leur vitesse vaut alors 10 mètres par seconde ou 10 ms^{-1} . Au début de la chute, la vitesse était nulle, mais elle a constamment augmenté: la pomme ou la pierre ont bien été accélérées. Après Galilée et Newton, les physiciens affirment que, à la surface de la Terre, *l'accélération de la pesanteur g vaut 10 mètres par seconde par seconde*⁵. Comme une telle écriture n'est pas commode, on dit que g vaut 10 ms^{-2} ; c'est d'ailleurs une valeur approchée⁶. L'accélération terrestre est la même pour tous les corps. Il aura fallu attendre Galilée et Newton pour que l'humanité prenne conscience d'une vérité si simple à vérifier. Les anciens avaient une bonne excuse: ce n'est pas vrai pour une plume d'oiseau ou une feuille morte, c'est-à-dire dès que le frottement de l'air cesse d'être négligeable. On l'a déjà noté au chapitre 8.

Si un projectile, au lieu de tomber verticalement, est animé d'un mouvement quelconque, il subit encore une accélération verticale égale à g . On le voit bien sur la figure 9.1 qui met en scène deux objets pour lesquels le frottement de l'air est négligeable. Le premier, abandonné à lui-même sans vitesse initiale, est en chute libre. Le second, projeté horizontalement, décrit une parabole. La composante horizontale de son mouvement est arbitraire et ne doit rien à la présence de la Terre, mais uniquement à la vitesse qui lui a été communiquée au départ par une main humaine ou un canon de fusil. En contrepartie, *la composante verticale du mouvement des deux objets est identique*. Elle est uniformément accélérée et doit tout à notre planète. *L'accéléra-*

⁵ Ni Galilée ni Newton n'utilisaient le système métrique...

⁶ A la surface de la Terre, g varie légèrement d'un point à l'autre. Elle se mesure à l'aide d'un gravimètre (chap. 8). Sa valeur moyenne est de $9,81 \text{ ms}^{-2}$.

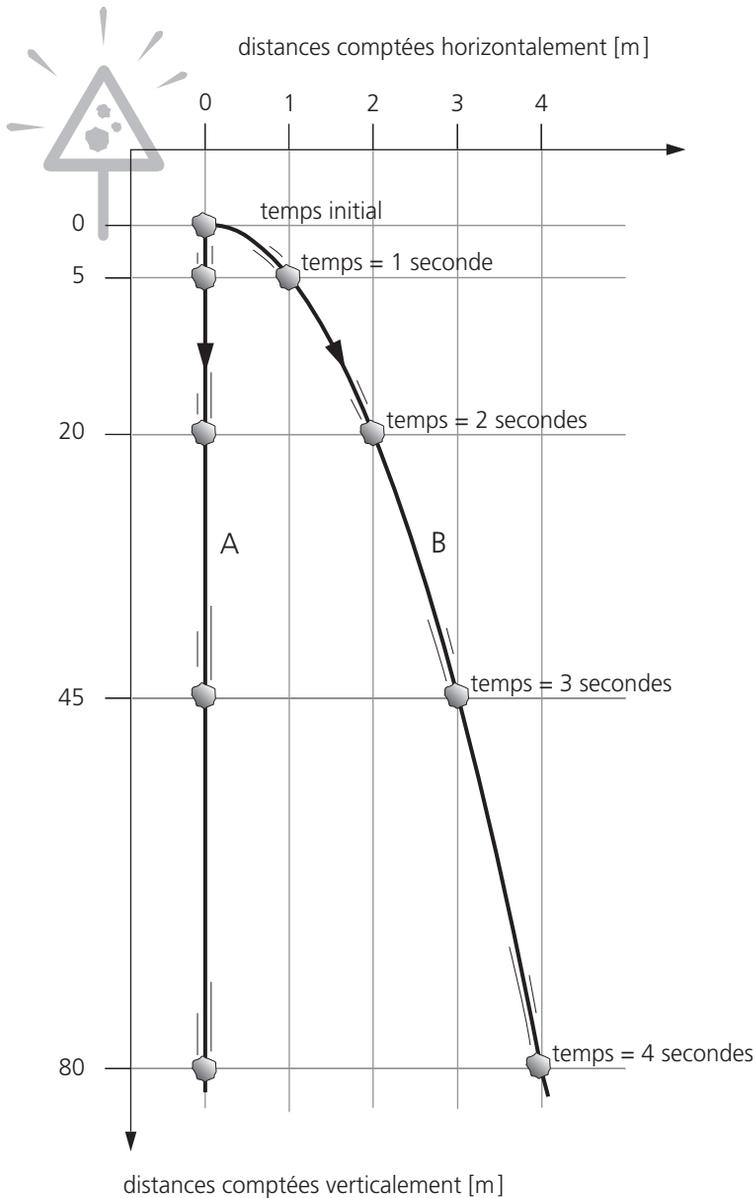


Fig. 9.1 Comparaison de deux mouvements uniformément accélérés. Les positions respectives de deux corps sont repérées chaque seconde le long de deux axes perpendiculaires. En chute libre, le corps A se déplace de haut en bas. Sa vitesse initiale est nulle mais elle croît régulièrement. Il parcourt 5 m lors de la première seconde, 15 m lors de la seconde, 25 m lors de la troisième, et ainsi de suite. Quant au corps B, il est animé d'une vitesse initiale dirigée horizontalement. On constate que son mouvement vertical est calqué sur celui du corps A, alors que son mouvement horizontal est uniforme si on le projette sur l'axe horizontal: 1 m est franchi chaque seconde. Les échelles horizontale et verticale sont différentes.

tion de la pesanteur g est une grandeur unique, caractéristique du voisinage immédiat de la surface de la Terre.

En ce qui concerne la Lune, on peut affirmer que, en première approximation, elle décrit autour de la Terre un *mouvement circulaire uniforme*. Comme son nom l'indique, il est caractérisé par la forme de la trajectoire – un cercle – et par l'uniformité de la vitesse le long de cette même trajectoire. En 1666, date de l'anecdote de la pomme, Newton a déjà compris qu'un mobile en *mouvement circulaire uniforme* subit nécessairement une *accélération*. Il se trouve que la valeur de cette accélération est nécessairement constante, si bien que *l'accélération $g(L)$ que subit la Lune est une grandeur unique. Elle ne peut dépendre que de la distance Terre-Lune*. Compte tenu de la valeur de cette distance (384 000 km) et du temps mis par la Lune pour décrire une révolution complète (27,32 jours), $g(L)$ ne vaut que $0,00272 \text{ ms}^{-2}$, soit 3600 fois moins qu'à la surface de la Terre⁷. Newton, qui ne dispose que de données numériques incertaines, obtient un peu plus de 4000 lorsqu'il évalue ce même rapport.

Arrivé à ce point, Newton doit exploiter la valeur numérique du rapport entre g , l'accélération mesurée au niveau du sol terrestre et celle que subit la Lune à près de 400 000 km de la Terre, soit $g(L)$. Il veut répondre à cette question essentielle: le projectile proche du sol et la Lune sur son orbite sont-ils soumis oui ou non à la même influence physique? En d'autres termes, g et $g(L)$ ont-ils tous deux même origine, l'action de la Terre? Pour tester cette hypothèse, Newton dispose d'un outil incomparable. Comme les deux premières lois de Kepler, la troisième loi qui porte son nom concerne le mouvement des planètes autour du Soleil.

TROISIÈME LOI DE KEPLER

Pour deux planètes différentes, le carré du rapport des temps de révolution est égal au cube du rapport des grands axes⁸ de leurs orbites.

Compte tenu du fait que les trajectoires des planètes sont presque circulaires, Newton n'a pas de peine à déduire une information essentielle de la troisième loi de Kepler: *l'accélération des planètes décroît comme l'inverse du carré de leur distance au Soleil*. S'il peut s'assurer qu'il en est de même quand il compare les accélérations respectives de la pomme et de la Lune, son intuition est correcte: comme tous les corps, la Lune et la pomme de son verger sont soumises à l'action de la Terre.

Imaginons Newton entreprenant ce calcul à partir des valeurs que l'on connaît aujourd'hui. La distance Terre-Lune valant environ 60 rayons terrestres (6400 km), l'accélération de notre satellite doit être $60 \cdot 60 = 3600$ fois inférieure à celle de la pomme. Aux arrondis et aux incertitudes de mesure près, c'est exactement la valeur obtenue plus haut! Si l'on envisage le couple pomme-Lune, l'accélération de la pesanteur diminue en raison inverse du

⁷ Si l'on pousse les calculs un peu plus loin, on constate que, en une seconde, la Lune décrit une distance horizontale de 1 km. Dans le même temps, comme sa trajectoire est circulaire, elle se déplace latéralement de 1,3 mm. Par analogie avec le projectile de la figure 9.1, on peut dire que, en une seconde, elle tombe de 1,3 mm.

⁸ Voir la figure 3.1.

carré de la distance *au centre de la Terre*. On peut reprendre l'observation faite pour les planètes et lui substituer «Soleil» par «Terre».

Une minute. La situation est moins brillante qu'il n'y paraît. Tout d'abord, les chiffres dont Newton dispose ne sont pas ceux que nous utilisons aujourd'hui. C'est de là que provient l'erreur que l'on a signalée plus haut, l'imprécision se répercutant également sur la deuxième évaluation. Mais il reste encore un point plus délicat.

Lorsque l'on a évalué plus haut le rapport des accélérations, *on a compté les distances du centre d'un astre à celui de l'autre*. Quand il s'agit de la distance de la Terre à la Lune, passe encore: leurs rayons respectifs sont petits en comparaison de la distance totale. Mais quand on considère l'action de la Terre entière sur une pomme, comment peut-on raisonner comme si le centre de notre planète avait seul de l'importance? Quelle que soit la nature intime de l'action de la Terre sur un fruit du verger de Woolsthorpe, il est raisonnable de supposer que chaque portion de notre planète influence la pomme: le voisinage immédiat de la ferme et son sous-sol, le Lincolnshire, l'Angleterre, le continent – même si cette idée peut être désagréable à un sujet de sa Majesté Charles II, roi d'Angleterre – et toutes les terres lointaines, y compris la Nouvelle Zélande, sans compter l'intérieur de la planète. Remplacer ces distances, toutes différentes, par le seul rayon terrestre, mériterait une justification. Selon Chandrasekhar, Newton ne la possède pas en 1666, ce qui fragilise son hypothèse [129]. Il ne pourra la présenter que plus tard.

Le dernier des magiciens

En 1666 ou 1667, Newton est de retour à Cambridge. Son statut s'améliore rapidement et en 1669, il est nommé *professeur lucasien* à la place de Barrow. La chaire lucasienne, créée en 1663, est probablement la chaire de mathématiques la plus célèbre au monde. Elle doit son nom à Henry Lucas, un membre du Parlement où il représente l'Université de Cambridge. Comme cette chaire a été occupée par Isaac Newton, presque tous ses successeurs ont été des savants de réputation mondiale [130]. Dans la liste des dix-sept titulaires de la chaire, on relève de nombreux physiciens. Les Britanniques ne font guère de différence entre les mathématiques et la physique théorique qu'ils qualifient volontiers de «mathématiques appliquées». Le titulaire actuel de la chaire lucasienne n'est autre que Stephen Hawking, le célèbre spécialiste de cosmologie, né en 1942.

Pour la communauté scientifique, le retour de Newton à Cambridge correspond à une traversée du désert. Comme Racine qui cesse d'écrire après avoir composé *Phèdre*, Newton délaisse les mathématiques et la physique pour la théologie et l'alchimie. Ou doit-on être plus respectueux et parler de chimie?

En 1936, le contenu d'une malle est mis en vente publique chez Sotheby's à Londres. Le premier lot est constitué de manuscrits portant sur la théologie. Le second lot est formé de documents traitant d'alchimie. Il est acheté par l'économiste John Maynard Keynes (1883-1946), un collectionneur de manuscrits anciens. Or ces textes sont de la main de Newton. Ils ont appartenu à sa nièce Catherine Barton puis à sa descendance. Newton s'est toujours efforcé de

garder secrète cette activité, ou du moins la part qu'il a consacrée à la théologie, très probablement de peur d'être accusé d'hérésie: il ne pouvait accepter l'idée chrétienne de Trinité et se rangeait ainsi sous la bannière des *unitaristes*.

Aujourd'hui, la communauté scientifique reste perplexe devant la débâche d'énergie que Newton a consacrée à des sujets qui paraissent si loin de nos préoccupations. Avant la vente publique, l'Université de Cambridge avait refusé d'acquiescer ces manuscrits. Leur contenu n'a pas encore été publié [131]. Après avoir pris connaissance des textes qu'il avait acquis, Keynes écrit: «A partir du dix-huitième siècle, Newton a été considéré comme le premier et le plus grand des savants de l'ère moderne, comme un rationaliste qui nous a enseigné comment suivre les règles d'une raison froide et sans nuances. [...]. Je ne pense pas que quiconque, s'étant plongé dans les documents trouvés dans la malle qu'il a emportée avec lui en quittant Cambridge, [...] pourrait encore le considérer ainsi. Newton n'a pas inauguré l'âge de la raison. Il a été le dernier des magiciens [...].» [132] Ces manuscrits jettent sur la statue de Newton un voile de mystère qu'il serait vain de soulever. Il ne faudrait pas oublier que James Ussher vivait encore à la naissance de Newton. Pour l'un comme pour l'autre, la Bible contenait la révélation divine, mais Newton pensait que certains de ses passages étaient incompréhensibles pour celui qui n'en possédait la clé de lecture. Il avait été capable de déchiffrer le message secret contenu dans le mouvement des planètes. Pourquoi ne saurait-il pas en faire de même avec celui que Dieu avait enfoui dans le texte sacré? [133]

Il vaut la peine de consacrer quelques lignes à la personnalité de Newton, tant elle correspond à l'image que l'on se fait du génie sombre et malfaisant.

Milo Keynes rappelle une conversation fréquemment citée que Newton eut quelque temps avant sa mort avec le mari de sa nièce: «J'ignore quelle est l'image que l'on se fait de ma personne. Pour ma part, je me vois comme un enfant jouant au bord de la mer [...]. Il trouve parfois une pierre mieux polie ou un coquillage plus gracieux que les autres, tandis que l'océan de la connaissance qui s'étend à ses pieds garde tout son mystère.» [134]

Rien n'est plus trompeur que ces quelques mots. Plutôt que la sérénité, la personnalité de Newton trahissait la mélancolie, l'anxiété, l'insécurité et l'incapacité presque complète de nouer des relations harmonieuses avec autrui. Son puritanisme était extrême. Tout indique qu'il est resté chaste sa vie entière. Il l'a affirmé à la fin de sa vie. Le mathématicien suisse Nicolas Fatio de Duillier (1664-1753) semble avoir été le seul être pour lequel il a éprouvé des sentiments de réelle affection. Quant à la poésie qui se dégage de la phrase citée plus haut, elle est également trompeuse. Newton se méfiait de la musique et de l'art. On raconte qu'il qualifiait la poésie de «kind of ingenious nonsense⁹» [134]. Et finalement, il n'est pas sûr que Newton ait jamais vu la mer... Ses déplacements se limitaient au Lincolnshire, à Cambridge et à Londres [135]. Se serait-il autorisé parfois une escapade?

De même que Racine avait quitté le théâtre, lieu et source de péchés, il apparaît que Newton a abandonné les sciences physiques et mathématiques pour traquer de plus près les desseins de Dieu. [132]. Il avait arraché son secret

⁹ Une sorte d'absurdité ingénieuse.

au monde physique. Il avait accompli une œuvre prodigieuse. A ses successeurs, il laissait du travail pour deux cents ans. Il a visé encore plus loin en tentant d'arracher le secret de la Création à son auteur lui-même, un secret qu'il croyait enfoui dans les écrits des Babyloniens ou des Sumériens. Il a été puni de son orgueil: il n'a rien trouvé car il n'y avait rien.

Douze ans après *Phèdre*, sollicité par Françoise d'Aubigné, marquise de Maintenon, Racine revient au théâtre et écrit coup sur coup *Esther* (1689) et *Athalie* (1691). Newton en fait de même à la même époque. Vingt ans après les années merveilleuses, en 1687, il revient à la physique en publiant les *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, ou plus simplement les *Principia*, un des ouvrages majeurs de l'histoire des sciences. Et s'il se livre à nouveau à l'étude de la physique et des mathématiques, c'est également à la suite d'une sollicitation. Elle vient d'un astronome.

Les Principia

L'astronome anglais Edmund Halley (1656-1742) doit sa célébrité à la comète à laquelle on a donné son nom. Il l'étudie lors de son passage de 1682 et, reconnaissant que son orbite est elliptique, il l'identifie avec la comète observée en 1607, ce qui lui fournit du même coup l'ordre de grandeur de sa période de révolution, environ 76 ans¹⁰. Il prédit qu'elle sera à nouveau observable en 1758 mais ne vit pas assez longtemps pour assister au succès de son hypothèse.

Au mois d'août 1684, deux ans après le passage de la comète, ce même Halley rend visite à Newton. Il tient à connaître son avis sur une question discutée avec deux de ses collègues, le physicien, biologiste, architecte et géologue Robert Hooke (1635-1702) et l'architecte et mathématicien Christopher Wren (1632-1723), maître d'œuvre de la cathédrale Saint-Paul. Grâce aux lois de Kepler, le mouvement des planètes leur est connu. Ils attribuent ce mouvement à une force d'attraction émanant du Soleil et, comme Newton en 1666, ils ont de bonnes raisons de penser que cette force décroît comme l'inverse du carré de la distance au Soleil. Mais ils ne savent pas le démontrer. Or, ce jour-là, Halley a de la chance: Newton est de bonne humeur. Il affirme qu'il en connaît la réponse, qu'il lui a consacré une démonstration quelques années plus tôt. Il se met en vain à fouiller un tiroir à la recherche des feuilles sur lesquelles il l'a consignée. Ne les trouvant pas, il promet à son visiteur de les lui envoyer dès qu'il les aura retrouvées.

Newton se met au travail et se passionne à nouveau pour la mécanique et la théorie de la gravitation. Il envoie d'abord un manuscrit à Halley qu'il intitule *De motu*¹¹, puis, dans les années qui suivent, il rédige les *Principia* qui paraissent en 1687. Si elles ont pu être publiées, c'est à Halley qu'on le doit.

¹⁰ La période de révolution d'une comète peut changer d'une observation à la suivante. Il peut notamment arriver qu'elle se rapproche d'une planète massive comme Jupiter dont la force d'attraction est capable de *perturber* la trajectoire et la période de la comète.

¹¹ Du mouvement.

Non content de servir de commentateur et de correcteur, il a convaincu la *Royal Society* de parrainer l'ouvrage dont il a financé la parution. Une seconde édition, plus complète, paraîtra en 1713.

Les *Principia* sont difficiles à lire, mais ils constituent les fondements de la science et de la philosophie modernes. Après quelques définitions et commentaires, l'ouvrage présente les trois lois du mouvement connues sous le nom de *lois de Newton*. Depuis leur publication, ce sont les piliers sur lesquels s'appuient la physique et, par contrecoup, les sciences de la nature. En quelques pages, Newton balaie des millénaires d'ignorance à propos des lois qui les régissent. On ne résiste pas au plaisir d'énoncer les trois lois dans la traduction qu'en a donnée Gabrielle-Emilie, marquise du Châtelet (1706-1749), une femme de science remarquable du siècle des Lumières (tab. 9.2).

<p><i>PREMIÈRE LOI</i></p> <p><i>Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, & ne le contraigne à changer d'état.</i></p> <p><i>DEUXIÈME LOI</i></p> <p><i>Les changemens qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, & se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.</i></p> <p><i>TROISIÈME LOI</i></p> <p><i>L'action est toujours égale & opposée à la réaction; c'est à dire, que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, & dans des directions contraires.</i></p>
--

Tableau 9.2 Les trois lois de Newton dans la transcription de la marquise du Châtelet [136].

Il n'est pas dans notre propos de développer ou commenter ces trois lois ou de parcourir ici les *Principia*. On se contentera de noter que, dans cet ouvrage, Newton répond à la question de Halley en démontrant notamment que, puisqu'il est avéré qu'une planète décrit une ellipse sous l'effet d'une force dirigée vers le foyer de la courbe, il en résulte que l'intensité de la force décroît comme l'inverse du carré de la distance. Il étend cette affirmation aux corps se déplaçant sur les trajectoires ouvertes que sont l'hyperbole et la parabole (fig. 9.2). Mais il ne s'arrête pas en si bon chemin. Il énonce la loi de la gravitation. Etant donné son importance, il est préférable de la formuler en des termes plus modernes que ceux que privilégiait la marquise du Châtelet.

LOI DE LA GRAVITATION UNIVERSELLE

Deux corps exercent l'un sur l'autre une force d'attraction proportionnelle à leurs masses et à l'inverse du carré de leur distance.

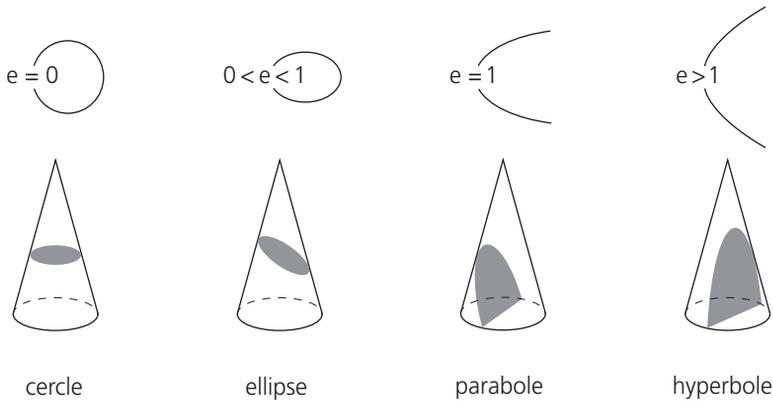


Fig. 9.2 Une *section conique* s'obtient par intersection d'un cône de section circulaire par un plan. Elle est caractérisée par une excentricité e qui dépend de l'orientation du plan. Pour le cercle et l'ellipse, e est respectivement nulle ou inférieure à 1. Quand e atteint ou dépasse 1, on a affaire à une parabole ou une hyperbole, courbes ouvertes. Un corps céleste soumis à la seule attraction du Soleil décrit une quelconque des sections coniques dont le foyer se confond avec le centre de notre étoile. S'il chemine sur une parabole ou une hyperbole, il ne fait que passer au voisinage de notre étoile, après quoi il s'en éloigne indéfiniment.

Newton montre notamment que *la force qu'exerce la Terre sur un objet situé à sa surface – une pomme, par exemple – est la même que si toute la masse de notre planète était concentrée en son centre*. Durant les années merveilleuses, il avait déjà fait usage de ce raisonnement lorsqu'il avait étendu à la Lune l'influence qu'exerce la Terre sur chaque pomme de nos vergers, mais il ne savait pas encore le justifier. Dans les *Principia*, Newton construit une œuvre pratiquement achevée qui ne comporte plus de lacunes. Il n'empêche que la difficulté de leur lecture est telle que, aujourd'hui encore, on se dispute à propos des démonstrations de Newton: sont-elles complètes ou non? Sur ce point, les avis sont très partagés [137-139].

Newton ne se contente pas de créer la mécanique et la mécanique céleste. Il utilise l'outil qu'il a construit pour attaquer divers problèmes. Il explique notamment le phénomène des marées; il s'attaque également au mouvement de la Lune dont la complexité est grande car elle est soumise à la fois à l'attraction de la Terre et du Soleil¹². Il ouvre la voie à une compréhension du système solaire essentiellement fondée sur l'action de la gravitation:

¹² Tout corps du système solaire est soumis à l'action de tous les autres, si bien que, dans tous les cas, la complexité est extrême. Mais la masse considérable du Soleil le met dans une situation privilégiée : son action est généralement prédominante. Si le cas de la Lune est complexe, c'est qu'elle subit simultanément l'attraction du Soleil et de notre planète, bien moins massive que le Soleil, certes, mais beaucoup plus proche d'elle.

«Nature and Nature's laws lay hid in night:
God said, Let Newton be! and all was light.¹³» [140]

Il y a peu à dire du reste de la vie de Newton. Il représentera Cambridge au Parlement, sera nommé Gardien puis Maître de la Monnaie: après avoir vainement tenté de transformer du mercure en or, il se contentera sagement de gérer l'or du royaume. En 1707, il sera annobli par la reine Anne et il mourra en 1727. Durant sa vie entière, son intérêt pour la science a imité l'éclat du Soleil, régulièrement occulté par des éclipses...

Retour à Uranus

Il est temps de revenir au XIX^e siècle et aux fantaisies du mouvement d'Uranus. On l'a mentionné plus haut, deux suggestions restaient en lice, chacune d'elles prétendant expliquer les libertés que la nouvelle planète prenait avec les lois de Kepler. Certaines anomalies de la marche d'Uranus étaient visiblement dues à la proximité – toute relative – de Jupiter et Saturne. L'attraction qu'exercent sur Uranus les deux planètes géantes l'écarte un peu de la voie tracée par Kepler. Au début des années 1840, l'action de Jupiter et de Saturne, parfaitement calculable, ne suffisait pas à expliquer toutes les fantaisies que s'offrait Uranus. Il faut noter que, pour important qu'il ait pu paraître à un astronome, l'écart angulaire entre les positions observées et calculées de la planète était faible: il atteignait 2 minutes d'arc en 1841. A l'œil nu, deux planètes de même luminosité qu'Uranus et séparées par un écart aussi faible se fondaient en un point unique. Il n'en reste pas moins que l'irrégularité de la marche de la nouvelle planète était trop grande pour qu'on l'ignorât. Elle devait avoir une cause encore inconnue.

Pour expliquer cet écart résiduel, on pouvait suggérer une défaillance de la loi de la gravitation universelle qui aurait cessé d'être rigoureusement valable dans la région traversée par Uranus. Comme on le verra plus loin, l'idée n'était pas déraisonnable mais elle violait le principe de parcimonie: il était plus simple d'admettre que l'orbite d'Uranus n'était pas seulement perturbée par la présence de Jupiter et de Saturne, mais aussi par celle d'une planète inconnue plus éloignée encore du Soleil qu'Uranus. L'hypothèse était plausible si l'on continuait à se référer à la loi de Titius-Bode: la planète inconnue devait évoluer à 38,8 unités astronomiques du Soleil, deux fois plus loin qu'Uranus (tab 9.1).

L'hypothèse d'une planète extra-uraniennne ne pouvait être intéressante que si l'on parvenait à la mettre en évidence. C'est au cours des années 1840 que la battue commença. Ce fut le début d'un des épisodes les plus étonnants de l'histoire des sciences.

¹³ «La nature et ses lois se cachaient dans la nuit: Dieu dit: Que Newton soit! et tout devint lumière.»

John Couch Adams, le jeune premier

Jocelyn Bell peut témoigner qu'il n'est pas bon d'être une jeune femme si l'on veut faire reconnaître ses découvertes. Outre la jeunesse, l'inexpérience et une passion pour l'astronomie, John Couch Adams avait d'autres points communs avec Jocelyn Bell: la sérénité, le respect d'autrui et une absence remarquable d'égoïsme. Bref, il avait toutes les qualités qui, dans un monde de requins comme l'est souvent celui de la science, vous prédestinent à être dévoré sans même penser à vous défendre.

Fils aîné d'une modeste famille de fermiers, John Couch Adams (1819-1892) est né en Cornouailles. Ses dons et ses connaissances en mathématiques ayant attiré l'attention de ses maîtres et de certains de ses proches, sa famille l'envoie à Cambridge où il obtient une bourse en 1839. Il s'y distingue immédiatement et, en 1843, lors de l'examen final où Kelvin ne devait obtenir que le second rang, il est reçu *Senior Wrangler*: dans le jargon de Cambridge, cela signifie qu'il décroche la timbale. Son avance sur son dauphin est démesurée [123]. Auparavant, à l'âge de 22 ans, il s'était promis de s'attaquer dès que possible au problème des irrégularités d'Uranus. Malheureusement, entre ses tâches universitaires et les leçons particulières qu'il donne pour envoyer régulièrement de l'argent à ses parents, l'étudiant puis *fellow* du St. John's College qu'est John Couch Adams n'a pas de temps à consacrer à son projet, excepté pendant les vacances qu'il passe au sein de sa famille. Il est convaincu que les irrégularités de la marche d'Uranus sont liées à la présence d'une planète inconnue qu'il est possible de localiser grâce aux perturbations qu'elle exerce sur Uranus.

Les «fantaisies d'Uranus» sont les écarts qu'elle se permet au détriment d'un tableau de marche qui a été calculé à partir d'observations successives de la planète, compte tenu des perturbations que Jupiter et Saturne exercent nécessairement sur elle. Pour mener son projet à bien, Adams procède comme un écolier que l'on initie à l'algèbre. Il doit déterminer la valeur d'une mystérieuse quantité x , l'inconnue du problème. Le potache se sert de l'énoncé de l'exercice pour établir l'équation à laquelle x obéit, puis pour la résoudre.

Adams n'est pas le premier potache venu. Le problème dont il cherche la solution comporte plusieurs inconnues. Ce sont la masse de la planète hypothétique, tous les nombres qui fixent la forme, la taille et l'orientation de son orbite et la position de la planète le long de sa trajectoire. Quant aux équations qu'il doit résoudre, elles traduisent l'action de la planète inconnue telle que la révèlent obscurément les écarts au tableau de marche d'Uranus. Présenté ainsi, le problème est effroyablement complexe. Très naturellement, Adams décide d'en réduire la difficulté au moyen de quelques hypothèses restrictives. C'est là que se reconnaît la maîtrise du théoricien. Il doit sentir quelles sont les simplifications qu'il a le droit d'introduire dans l'énoncé d'un problème sans le dénaturer. Comme le disent les Anglo-Saxons, il ne faut pas jeter le bébé avec l'eau du bain.

Les simplifications introduites par Adams sont pertinentes. Il admet d'abord que la trajectoire de la planète inconnue est circulaire et qu'elle s'inscrit dans le plan de l'écliptique. En ce qui concerne le diamètre de l'orbite inconnue, Adams suppose qu'il est deux fois plus grand que celui d'Uranus.

C'est à peu de chose près ce que prévoit la loi de Titius-Bode (tab. 9.1). Ces diverses hypothèses sont parfaitement raisonnables si l'on veut calculer les coordonnées célestes de la nouvelle planète avec une bonne chance de l'observer. Quand ce sera fait, il sera bien assez tôt de passer à une mesure précise de sa masse et des caractéristiques de son orbite. A la fin de l'année 1843, Adams obtient une première ébauche de solution. Grâce à elle, il sait que l'hypothèse d'une planète extra-uraniennne peut parfaitement expliquer les irrégularités observées et qu'il vaut la peine d'aller plus loin.

C'est alors qu'entrent en scène deux astronomes plus âgés qu'Adams. Tous deux ont été *Senior Wranglers* de Cambridge et, chacun à sa manière, ils vont jouer un rôle inattendu dans l'histoire de la découverte de Neptune.

Adams se rend compte que, pour achever ses calculs, il a besoin de données sûres concernant l'orbite d'Uranus. Il s'adresse à James Challis (1803-1882), directeur de l'observatoire de Cambridge, qui transmet la requête au second de nos héros, George Biddle Airy (1801-1892), l'un des successeurs de Newton à la chaire lucasienne, puis Astronome Royal et, à ce titre, directeur de l'observatoire de Greenwich. Tout se passe encore très bien et Adams reçoit les données dont il a besoin. Il peut se lancer dans les calculs qui lui permettront de déterminer précisément les coordonnées de la planète qu'il pourchasse. En septembre 1845, il a en main la solution cherchée: il connaît la position de la planète inconnue à n'importe quelle date. Il suffit de regarder au bon endroit pour l'observer. Adams sait qu'elle se distinguera sans peine des étoiles environnantes car, même dans un instrument relativement modeste, elle apparaîtra comme un disque et non comme un point lumineux. La découverte de Neptune est imminente!

C'est ainsi que l'histoire pourrait se terminer si Challis et surtout Airy n'avaient pas multiplié les maléfices à l'encontre d'Adams. Une fois de plus, la compétence des savants ne fait pas tout. Encore faut-il que leur comportement soit à peu près rationnel.

Airy, le barbon borné

Adams rédige un plan de marche de la planète inconnue. A l'aide de ce document, un astronome devrait pouvoir l'observer sur l'heure. Mis au courant, Challis n'ose pas se lancer lui-même à la recherche de la planète inconnue. Il convainc Adams de communiquer le résultat de ses calculs à Airy à qui il envoie une lettre de recommandation. Comme Adams doit justement se rendre à Londres, il décide de faire le détour de Greenwich pour présenter de vive voix ses calculs. Avant son départ, il laisse un résumé de ses recherches dans les mains de Challis, mais il néglige le conseil d'un ami lui suggérant d'en envoyer une copie à une revue scientifique. A Greenwich, une mauvaise surprise attend Adams: Airy est absent. Il assiste à une réunion à Paris.

En octobre, Adams repasse par Londres et se rend à nouveau à Greenwich. Airy étant momentanément sorti, il laisse une brève note résumant le résultat de ses recherches, puis revient au milieu de l'après-midi. A cette époque, les scientifiques les plus huppés pouvaient se payer les services d'un maître d'hôtel. Celui d'Airy annonce dédaigneusement à Adams: «Monsieur ne peut recevoir Monsieur: il est à table». Sur les conseils de son

médecin, Airy prend son lunch à 15h30. Comme le dit Grosser, même à cette époque, c'était une habitude singulière [123]. Le maître d'hôtel ne prend pas la peine d'informer l'Astronome Royal de la visite du jeune homme. On imagine sans peine les sentiments d'Adams à la suite de cette rebuffade.

Même si Airy n'est pas responsable de cet incident, Adams n'a rien à attendre de lui. L'Astronome Royal est un maniaque de l'ordre et il a un saint respect de la hiérarchie. Alors qu'il était directeur de l'observatoire de Greenwich, il avait passé un après-midi entier à écrire le mot «vide» sur un paquet de cartes. Il fallait ensuite les coller sur des emballages vides de peur qu'on ne les confonde avec ceux qui ne l'étaient pas. Airy méprisait les jeunes astronomes qui étaient sous sa coupe et s'acharnait à combattre toute initiative de leur part. Seul le travail de routine leur était réservé. Quand ils avaient un voyage à accomplir, il consultait lui-même les horaires des trains qu'ils devaient prendre, les traitant comme des enfants de dix ans voyageant seuls. Pour couronner le tout, il n'avait de considération que pour les activités pragmatiques. Il méprisait les recherches théoriques dépourvues d'applications pratiques immédiates [123]. Pour Airy, Adams entrait dans la catégorie de ces blancs-becs qu'il convient de surveiller de près. Du haut de son incompetence, il était convaincu que les irrégularités de la marche d'Uranus étaient trop mal connues pour qu'on puisse découvrir la planète qui en était responsable, pour autant qu'elle existât, ce dont Airy doutait fortement.

Aux lettres qu'il recevait, Airy répondait par retour du courrier. Mais il attendit deux semaines avant de répondre à ce jeune écervelé qui lui suggérait de diriger son instrument vers une planète imaginaire. Après quelques vagues formules de politesse, Airy demanda à Adams si ses calculs permettaient d'expliquer une question qui le préoccupait et qui concernait, non pas la planète inconnue, mais plutôt la distance Soleil-Uranus. Adams ne comprit pas plus la réponse d'Airy que le second n'avait compris les calculs du premier. Déconcerté, et peut-être encore sous l'effet de la rebuffade, il ne répondit pas.

Urbain Le Verrier, le meneur de jeu

Lors de ses études au lycée puis à l'Ecole polytechnique, l'astronome et mathématicien français Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) fait preuve d'intelligence et d'ardeur au travail mais, contrairement à Adams, il ne passe pas pour un sujet exceptionnel. A la fin de ses études, Le Verrier entame une carrière prometteuse de chimiste expérimentateur sous la direction du grand chimiste Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850). Un poste de répétiteur de chimie à l'Ecole polytechnique se libère. Dans ce milieu, l'influence de Gay-Lussac est grande. Il voudrait que Le Verrier puisse en bénéficier mais il a un autre élève qu'il apprécie tout autant. Gay-Lussac ne peut évidemment les faire nommer au même poste mais il trouve la parade. Le concurrent de Le Verrier est nommé répétiteur de chimie. Quant à Le Verrier, dont Gay-Lussac sait qu'il est passionné de mathématiques, il devient répétiteur d'astronomie dans la même institution, une solution qui serait impossible aujourd'hui: on compterait le nombre d'articles publiés par le candidat dans le domaine correspondant. Dans le cas de Le Verrier, il n'y en avait pas, si bien que son

dossier de candidature aurait immédiatement rejoint la poubelle. Afin de se montrer à la hauteur de sa nouvelle fonction, le nouvel astronome s'attaque, après Laplace, à l'un des problèmes les plus difficiles de la mécanique céleste, celui de la *stabilité du système solaire*.

Si l'on pouvait négliger l'attraction des planètes les unes sur les autres, le futur du système solaire serait parfaitement déterminé: chaque planète obéirait aveuglément aux lois de Kepler sans se préoccuper des autres. Mais du moment que chaque planète perturbe le mouvement des autres, on est amené à s'interroger sur la marche d'une mécanique dont les rouages se compliquent à tel point que personne n'est capable d'en prévoir exactement l'évolution¹⁴. Dans un domaine si complexe, Le Verrier obtient d'importants résultats. Sa réputation de théoricien de la mécanique céleste est faite.

La virtuosité mathématique de Le Verrier attire l'attention de François Arago (1786-1853), directeur de l'Observatoire de Paris. Il suggère à Le Verrier de se consacrer à l'étude de l'orbite de Mercure qui, comme Uranus, présente des anomalies. Le Verrier est ambitieux. Il abandonne ses propres travaux et se rend sur le champ aux raisons d'Arago. Mais le succès n'est pas au rendez-vous. Le Verrier entreprend alors l'étude des comètes de courte période et, à l'été 1845, Arago intervient à nouveau dans sa carrière: il lui propose de se lancer à la recherche de la mystérieuse planète dont on soupçonne qu'elle perturbe la marche d'Uranus. A ce moment-là, Le Verrier est âgé de trente-quatre ans et sa réputation est déjà faite. En novembre 1845, il présente un premier mémoire à l'Académie des Sciences dans lequel il affirme que seule une «cause extérieure» (lisez «une planète inconnue») peut expliquer certaines anomalies de la marche d'Uranus. En décembre 1845, Airy prend connaissance du mémoire qui a un effet magique sur lui: il affirme que «pour la première fois, la théorie d'Uranus repose sur des fondations solides». Cela fait déjà deux mois qu'il a en main les résultats d'Adams. Ceux-ci lui permettraient de découvrir presque instantanément la planète inconnue s'il voulait bien diriger un télescope dans sa direction, mais Adams n'est qu'un freluquet sorti Dieu sait d'où, tandis que Le Verrier est un chercheur reconnu.

Le Verrier peut alors attaquer le plat principal, autrement dit la localisation de la fameuse planète. Pour y parvenir, il fait les mêmes hypothèses qu'Adams et ses résultats sont essentiellement les mêmes, bien que sa méthode soit «plus élaborée que celle d'Adams» [141]. Le Verrier les consigne dans un second mémoire qui paraît le 1^{er} juin 1846. Pendant tout ce temps, hélas, Adams ne publie rien.

Challis, le valet de comédie

Les astronomes français accueillent la publication avec chaleur, mais personne ne se donne la peine de regarder dans la direction indiquée. Airy en

¹⁴ Sans compter que les planètes sont animées d'une rotation propre autour d'un axe d'orientation quelconque, qu'elles ne sont pas parfaitement sphériques, qu'elles sont pourvues de satellites et subissent l'effet des marées...

fait de même. Il exprime son enthousiasme à la réception du mémoire. Si l'on se réfère simultanément aux textes d'Adams et de Le Verrier, on constate qu'ils localisent la planète inconnue en deux points distants d'un degré d'arc. Compte tenu de la faiblesse des perturbations observées, c'est un résultat magnifique. Chacun des deux astronomes confirme les calculs de l'autre. Une convergence aussi remarquable devrait stimuler l'ardeur d'Airy. Mais Airy n'est qu'un personnage borné et imbu de lui-même. Et une fois pour toutes, Adams n'est qu'un jeune impertinent. Airy envoie à Le Verrier une lettre dans laquelle il ne mentionne même pas les résultats de John Couch Adams. Entre scientifiques confirmés, on ne parle pas du petit personnel...

Quelques jours plus tard, en présence de Herschel et de Challis, Airy annonce que la planète inconnue va bientôt être débusquée. Herschel exprime son admiration. Challis, en revanche, tourne sa veste en même temps qu'Airy, mais en sens contraire. Jusqu'alors, il a été le champion d'Adams, un champion qui toutefois n'a pas fait le moindre effort pour trouver la planète perturbatrice. Mais, dans le passé, il a été humilié par Airy si bien qu'il est brusquement scandalisé par l'opportunisme d'un Airy devenu le héraut de la chasse à la nouvelle planète.

Sur ces entrefaites, Le Verrier sollicite Airy. Ne pourrait-il pas mobiliser son observatoire pour rechercher la planète inconnue? Airy a beau être enthousiaste, il reste esclave de sa passion de l'ordre. Il n'est pas prêt à troubler la routine de l'observatoire pour une nouvelle planète! Il repousse la requête au prix de lénifiantes excuses. Quelques jours plus tard, il écrit cependant à Challis pour l'inviter à découvrir l'astre tant convoité par les théoriciens et tant méprisé par les observateurs. Airy ne veut pas faire le travail lui-même, il enjoint à l'un de ses «inférieurs» de l'accomplir. Mais au lieu de dire à Challis d'observer le voisinage immédiat du point indiqué par Adams et Le Verrier et d'y chercher un disque planétaire, il recommande d'explorer un grand domaine céleste, ce qui prendra évidemment plus de temps. Challis obéit aveuglément, mais en adoptant une méthode encore moins efficace que celle que proposait Airy. Il passe en revue toutes les étoiles, même celles dont la luminosité est notablement inférieure à celle de la planète à découvrir. «On aurait dit quelqu'un qui, à la recherche d'un caillou particulièrement brillant, aurait tenté de mettre la main dessus en ramassant les unes après les autres des milliers d'autres pierres réparties sur une large surface centrée sur le caillou.» [123] Challis fait une sorte de grève du zèle, mais elle est entièrement à son détriment. Alors qu'il a tous les éléments en main, il va manquer la planète.

Pendant ce temps, Le Verrier publie un troisième mémoire qui contient tous les détails qu'un observateur peut exiger pour décrire la planète, ce qui ne suffit pas à sortir les astronomes français de leur torpeur. On mesure à quel point le mépris était grand à l'endroit des théoriciens. En Angleterre, Adams affronte la même inertie. Il a révisé deux fois ses calculs et augmenté leur précision. Il écrit malgré tout à Airy pour lui communiquer ses derniers résultats mais, cette fois, Airy est en Allemagne et on omet de lui transmettre la lettre d'Adams. Un des assistants de Greenwich se contente d'envoyer à Adams une lettre sans intérêt qui «exprime la castration intellectuelle qu'Airy opérerait sur ses subordonnés» [123].

La découverte de Neptune

Adams savait que Challis était à la recherche de la planète inconnue, mais Le Verrier l'ignorait. Excédé par les lenteurs franco-britanniques, il suggère à un de ses correspondants de chercher la fameuse planète. Le destinataire du message est Johann Gottfried Galle (1812-1910), assistant à l'observatoire de Berlin. Le 23 septembre 1846, la lettre atteint Galle qui demande aussitôt à son directeur l'autorisation de commencer les recherches. Comme les problèmes hiérarchiques sont tout aussi aigus à Berlin qu'à Greenwich, Galle doit longuement insister pour recevoir le feu vert. Un étudiant en astronomie du nom de Heinrich Louis d'Arrest (1822-1875) surprend la discussion et demande à pouvoir assister Galle, qui accepte sans enthousiasme. Les deux astronomes se mettent au travail et, la nuit même, ils découvrent Neptune là où Adams et Le Verrier l'avaient prévu.

Il serait temps d'interrompre ce récit calamiteux, mais il faut payer un dernier tribut à la bêtise et à la mesquinerie humaines.

Une nouvelle planète doit recevoir un nom. Le Verrier propose de la baptiser Neptune, puis il se ravise et suggère modestement qu'on lui donne son propre nom. Sur sa lancée, et pour appuyer sa revendication, il débaptise Uranus qu'il appelle désormais Herschel. Il espère ainsi se faire un allié. Cela ne suffit pas, la communauté internationale adoptant définitivement le nom de Neptune, et ceci bien que les astronomes britanniques aient tenté une dernière diversion en proposant le nom d'Océanus.

Ni Airy ni Challis ne pouvaient être fiers de leur performance. Ils eurent l'un et l'autre à expliquer à leurs collègues comment ils avaient pu passer à côté d'une pareille découverte qui aurait fait la gloire de la science britannique. Le moins que l'on puisse dire, c'est que leurs tentatives de justification ne convainquirent personne. Airy, toutefois, ne montra pas le moindre signe d'embarras. Il était trop borné et trop sûr de soi pour ressentir le moindre sentiment de culpabilité.

Les Anglais et les Français ne perdirent pas une si belle occasion de se quereller. Les Anglais étaient furieux que les mérites d'Adams ne soient pas reconnus à leur juste valeur, tandis que les Français étaient outrés que les Britanniques sortent brusquement de leur manche un joker dont ils n'avaient jamais entendu parler. La presse s'en mêla. Quant à Adams et Le Verrier, ils ne participèrent pas à la polémique. Du jour où ils firent connaissance, en juin 1847, ils devinrent d'excellents amis et le restèrent toute leur vie. De leur côté, Galle et d'Arrest entrèrent en conflit, Galle se faisant longuement prier avant de partager le mérite de l'observation de Neptune avec son jeune collaborateur [142].

En ce qui concerne la priorité de la découverte, Adams a commis une erreur. Lorsqu'il attendait vainement que ses collègues veuillent bien se donner la peine d'observer Neptune, il a négligé plusieurs avis lui recommandant de publier le résultat de ses calculs. Il préférait se consacrer à leur amélioration. Manque d'expérience, sans doute, et vision idéalisée du milieu scientifique. Aujourd'hui, alors que les chercheurs médiocres publient six fois le même résultat pour étoffer leur liste de publications, l'attitude d'Adams étonne. Qu'importe! Les mérites respectifs d'Adams et de Le Verrier ont été reconnus de leur vivant. Ils sont tous deux considérés comme les auteurs d'une découverte prestigieuse et ne quitteront plus le Panthéon des astronomes.

La fin de la loi de Titius-Bode et le triomphe de Newton

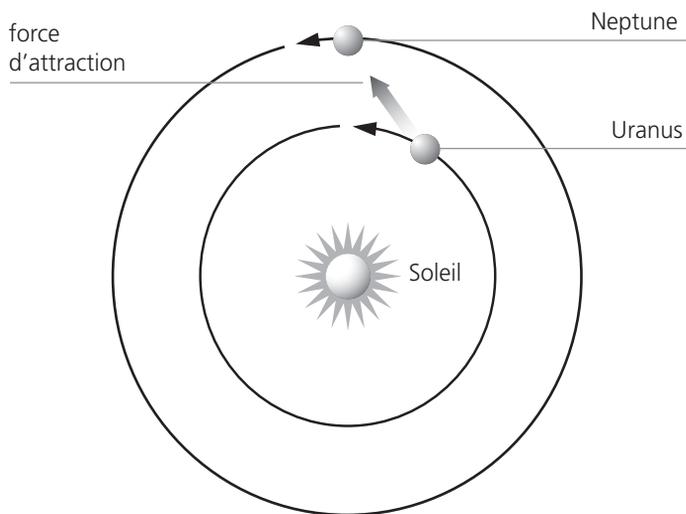
Quand l'orbite de Neptune put être déterminée avec précision, on s'aperçut que sa distance moyenne au Soleil n'était que de 30,1 unités astronomiques, en complet désaccord avec les prédictions de la loi de Titius-Bode qui fut alors reconnue pour ce qu'elle était: une règle numérique ne reposant sur aucune assise solide.

En ce qui concerne les perturbations que Neptune exerce sur Uranus, la figure 9.3 montre dans quelles conditions il y a accélération ou ralentissement. Il faut se rappeler que Neptune, plus éloignée du Soleil qu'Uranus, progresse plus lentement. En 1822, le Soleil, Uranus et Neptune étaient approximativement alignés; c'est donc à cette époque que Neptune qui, jusqu'alors, accélérerait Uranus, a commencé à la ralentir (fig. 9.4). Comme les deux planètes étaient relativement proches, les perturbations étaient importantes, une circonstance heureuse pour Adams et Le Verrier. Sans réduire l'importance des calculs à effectuer, elle les a gratifiés de données plus faciles à traiter, parce que moins sensibles aux inévitables erreurs d'observation.

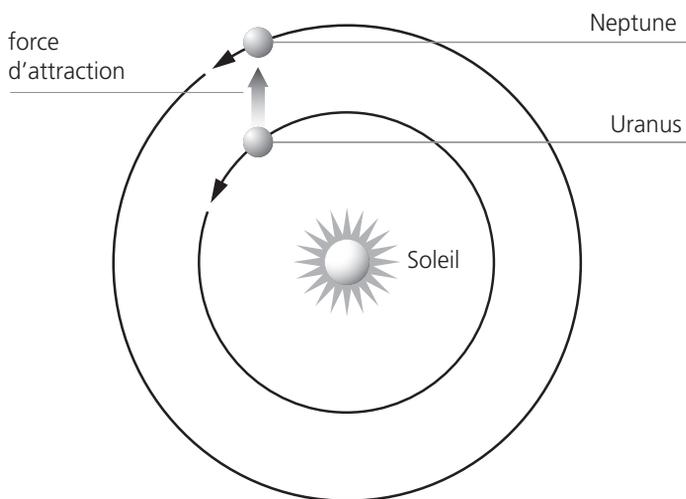
La découverte de Neptune a constitué un triomphe pour la loi de la gravitation de Newton. Certains astronomes attribuaient les fantaisies de la marche d'Uranus à une carence de la loi de la gravitation qui cesserait d'être valable à grande distance du Soleil. Aujourd'hui, nous savons en effet que la plupart des lois de la physique ont un domaine de validité restreint. C'est aussi le cas de la loi de la gravitation, non pas loin du Soleil, mais dans son voisinage immédiat. Le Verrier en a fait la douloureuse expérience.

En 1843, il avait déjà tenté sans succès de comprendre les irrégularités de la marche de Mercure, la planète la plus véloce parce que la plus proche du Soleil. La victoire remportée sur les anomalies d'Uranus ne pouvaient que l'encourager à revenir à Mercure, et à expliquer ses fantaisies comme il l'avait fait pour Uranus, c'est-à-dire en débusquant une planète inconnue. On pouvait penser que ce corps mystérieux était plus proche du Soleil que Mercure, ce qui rendait son observation plus difficile et pouvait expliquer pourquoi il avait échappé aux astronomes. Le Verrier se mit au travail en 1859, d'autant qu'un astronome amateur affirmait avoir observé un corps inconnu passant devant le Soleil. Cette fois-ci, le savant français prit les devants et baptisa la planète inconnue *Vulcain*, du nom du forgeron de l'Etna, le mari bafoué de Vénus la séductrice. La planète Vulcain rejoignit définitivement le monde des théories fausses lorsqu'elle manqua un rendez-vous important que Le Verrier lui avait fixé: en 1877, elle se refusa obstinément à passer devant le disque du Soleil. Quarante ans plus tard, Einstein résolut l'énigme de la marche fantaisiste de Mercure: au voisinage immédiat du Soleil, les prédictions des théories de la gravitation de Newton et d'Einstein divergent. Le mouvement de Mercure ne peut s'expliquer complètement que dans le cadre de la théorie de la relativité générale (chap. 5).

Devant un phénomène inexplicable, on ne peut pas exclure qu'il faille remettre en cause des lois séculaires, mais le principe de parcimonie nous enseigne que, avant de recourir à une solution aussi extrême, on doit d'abord explorer les pistes plus traditionnelles. Si la théorie de la relativité générale a vu le jour, ce n'est pas pour expliquer les anomalies de l'orbite de Mercure, mais parce qu'Einstein voulait construire une théorie faisant la synthèse entre la gravitation et la théorie de la relativité restreinte.



(a)



(b)

Fig. 9.3 Comme Uranus, Neptune se déplace sur une orbite à peu près circulaire mais sa distance au Soleil est supérieure, si bien que sa vitesse est moins élevée. Elle décrit sa trajectoire dans le même sens qu'Uranus, une remarque valable pour toutes les planètes. Suivant la position qu'elle occupe par rapport à Uranus, Neptune accélère (a) ou ralentit sa voisine (b).

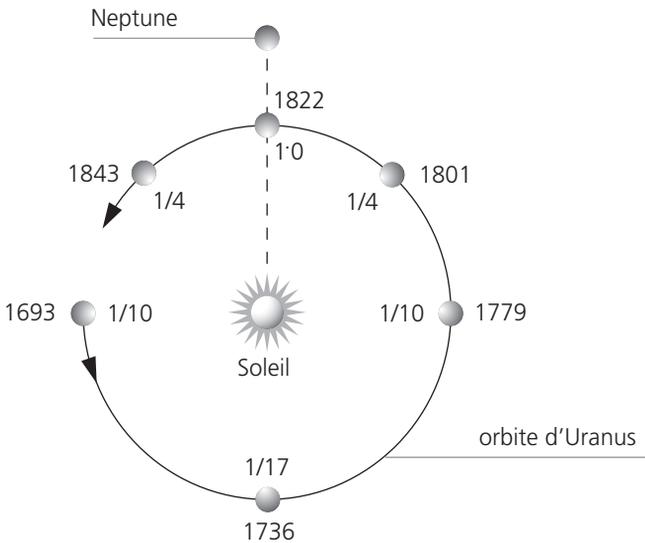


Fig. 9.4 Sur cette figure, le Soleil et Neptune sont considérés comme fixes tandis qu'Uranus avance sur son orbite. En regard de chaque position d'Uranus, l'année de passage est indiquée. On constate que Neptune a accéléré la marche d'Uranus avant 1822, date à laquelle les deux planètes et le Soleil étaient à peu près alignés. Après coup, Neptune a ralenti la marche d'Uranus. La fraction indiquée en regard de chaque point permet de comparer entre elles les valeurs respectives de la force d'attraction entre les planètes, qui décroît rapidement avec la distance. D'après Smart [141].

La petite dernière

On veut toujours aller plus loin. Neptune est la huitième planète, les astéroïdes comme Cérés n'entrant pas dans ce décompte. Où est la neuvième ?

En 1894, un riche Bostonien avait fondé l'observatoire de Flagstaff, en Arizona, non loin de Meteor Crater. Son nom était Percival Lowell (1855-1916). Il était un fervent pacifiste et se passionnait pour la planète Mars où il croyait voir des «canaux». Il attribuait leur existence aux efforts des Martiens qui, luttant désespérément contre la sécheresse, se gardaient bien de se battre de peur de mettre en danger leur planète. Fruits de l'imagination et de l'imperfection des télescopes, les *canaux de Mars* ont créé bien des remous à la fin du XIX^e siècle [143], exactement comme les soucoupes volantes le font de nos jours. Resurgissant périodiquement dans la presse, ces canaux passionnaient le public et provoquaient l'irritation des astronomes. L'espoir de Lowell était de donner en exemple le pacifisme des Martiens à des Terriens si prompts à se lancer dans les guerres.

Pour faire taire les critiques des astronomes professionnels, Lowell se met en quête d'une planète trans-neptunienne. S'il parvient à en découvrir une, pense-t-il, il gagnera ses galons d'astronome professionnel. L'orbite de Neptune étant encore mal connue (la nouvelle planète met 165 ans pour

accomplir une seule révolution), l'astronome amateur recherche d'éventuelles perturbations résiduelles de l'orbite d'Uranus que la découverte de Neptune n'aurait pas expliquées. Leur existence prouverait l'existence d'une neuvième planète, la « planète X ». Après des années de calcul, il détermine deux points du ciel où pourrait se cacher l'astre mystérieux mais, malgré les efforts de l'équipe de Flagstaff, les observations ne donnent rien. En 1916, déçu, amer, le malheureux Lowell s'éteint, victime de ses obsessions [144].

Et pourtant, à l'insu de tous, son observatoire avait enregistré dès 1915 des images de la neuvième planète. Il faudra attendre jusqu'en 1930 pour que, dans ce même observatoire, le jeune Clyde Tombaugh (1906-1997) découvre la neuvième et peut-être dernière planète du système solaire. Il l'observe au voisinage d'un point où les calculs de Lowell l'avait située. L'exploit d'Adams et Le Verrier se réédite! La première chose à faire, c'est de trouver un nom pour la planète X. De nombreuses suggestions viennent de partout. La plus originale provient de Constance Lowell. Pendant les années qui ont suivi la mort de son mari, elle mène un combat féroce pour arracher à l'observatoire de Flagstaff le legs fait par son mari à l'institution qu'il avait fondée. Et voilà que, en 1930, elle suggère modestement que l'on donne son propre prénom à la nouvelle planète. Elle a visiblement pardonné aux astronomes le mal qu'elle leur a fait. Hélas, ceux-ci n'ont pas sa grandeur d'âme... C'est finalement une écolière de onze ans, Venetia Burney, qui emporte le morceau: elle propose que l'on baptise Pluton la neuvième planète. Les membres de l'observatoire de Flagstaff, à qui revient le choix, se prononcent dans ce sens, notamment parce que les deux premières lettres de Pluton coïncident avec les initiales de Percival Lowell [145].

Il faudra bientôt déchanter. A la Planète X, Lowell avait attribué une masse sept fois supérieure à celle de la Terre. Or on découvre bientôt que Pluton n'est peut-être qu'un gros rocher enserré dans une gangue gelée d'ammoniac, de méthane et de glace puis, en 1978, on s'apercevra qu'il est escorté de *Charon*, un satellite dont le volume ne serait que six à dix fois inférieur au sien. Une pareille découverte est précieuse car elle permet de mesurer la masse de Pluton et de constater que la nouvelle planète n'est qu'un « poids plume ». Elle ne peut être responsable des irrégularités attribuées au mouvement d'Uranus, si bien que sa découverte doit tout au travail acharné de Tombaugh et rien aux calculs de Lowell.

Aujourd'hui, de nombreux astronomes pensent que Pluton et Charon ne sont que les plus gros représentants de la ceinture de Kuiper, une ceinture d'astéroïdes qui s'étend au-delà de Neptune (fig. 8.2). Parmi les arguments invoqués figurent leur faible masse et la grande excentricité de l'orbite de Pluton, bien supérieure à celle des huit autres planètes. Comme on le voit sur la figure 9.5, la taille de Pluton est inférieure à celle de la Lune. Elle est comparable à celle des plus grands représentants de la ceinture principale. Quant à la distance moyenne Soleil-Pluton, elle n'atteint que 39,4 unités astronomiques au lieu des 77,2 UA que lui attribuerait la loi de Titius-Bode, si elle n'était définitivement reléguée aux oubliettes.

Le tableau 9.3 résume quelques données relatives aux neuf planètes ainsi qu'au plus gros astéroïde de la ceinture principale, Cérés. Bien que nous ayons encore beaucoup à apprendre du système solaire, la recherche de nouvelles

Tableau 9.3 Données concernant les planètes. La masse de la Terre vaut $5,98 \cdot 10^{24}$ kg et sa distance au Soleil s'élève à 150 millions de km.

Planètes	Date de la découverte	Masse (par rapport à celle de la Terre)	Demi-grand axe (par rapport à celui de la Terre)	Période de révolution	Caractéristiques
Mercure		0,0532	0,387	88 jours	Planètes telluriques
Vénus		0,817	0,723	224,7 jours	
Terre		1	1	1 année	
Mars		0,107	1,524	687 jours	
(Cérès)	1801	0,0001	2,77	4,61 ans	Membre de la ceinture principale d'astéroïdes
Jupiter		318	5,20	11,86 ans	La planète géante
Saturne		95,1	9,54	29,46 ans	Possède des anneaux très visibles
Uranus	1781	14,6	19,18	84,01 ans	
Neptune	1846	17,2	30,07	164,8 ans	Découverte grâce aux perturbations qu'elle exerce sur Uranus
Pluton	1930	0,0022	39,44	248,4 ans	Probablement un membre de la ceinture de Kuiper

planètes ne tente plus grand monde. Le 14 novembre 2003, la découverte de *Sedna*, encore moins volumineuse et beaucoup plus éloignée du Soleil que Pluton, ne fait que renforcer ce point de vue. C'est que, depuis 1995, la chasse aux planètes extrasolaires est ouverte!

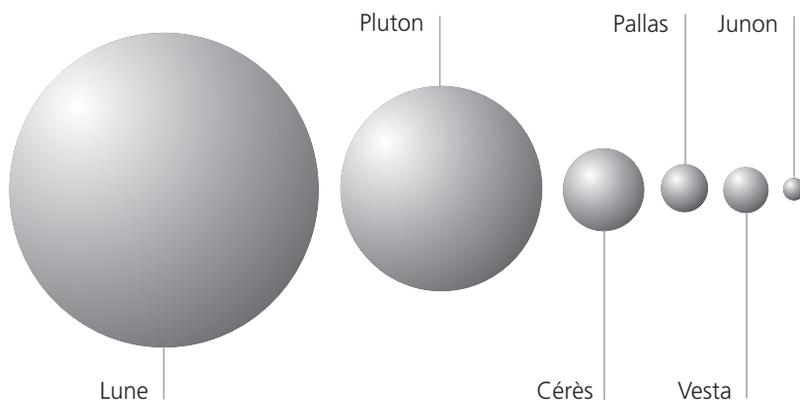


Fig. 9.5 Les tailles respectives de la Lune, de Pluton et de quatre astéroïdes choisis parmi les plus volumineux.

Appendice: Règles de formation des séries proposées à la page 215

1. Liste des carrés des nombres entiers.

2. Un terme quelconque de cette série s'obtient en ajoutant son rang dans la suite à la valeur numérique du terme qui le précède: le cinquième terme, 15, est bien la somme de 5 (son rang) et de 10 (la valeur du quatrième terme). Par ailleurs $3 = 1+2$, $6 = 1+2+3$, $10 = 1+2+3+4$, $15 = 1+2+3+4+5, \dots$

3. Cette série commence par 1 et 2. Ensuite, n'importe quel nombre de la suite s'obtient en faisant la somme des deux nombres qui le précèdent dans la série: $1+2=3$, $2+3=5$, $3+5=8$, et ainsi de suite *ad infinitum*. Cette série est bien connue des mathématiciens sous le nom de *série de Fibonacci*, le surnom du mathématicien italien Leonardo da Pisa (1170-env.1250). Elle a longtemps intrigué les botanistes pour une raison amusante. Quand on compte les hélices qui relient les écailles d'une pomme de pin, dans un sens aussi bien que dans l'autre, on tombe presque toujours sur deux nombres consécutifs de la série de Fibonacci. Bien plus, quand on fait la somme de ces deux nombres, on obtient le nombre des hélices presque verticales qui joignent encore des écailles voisines. Quand on cueille une marguerite, la situation est identique. On distingue des spirales qui obéissent encore aux mêmes règles (fig. 9.6). Il se trouve que cette circonstance assure aux écailles de la pomme de pin et aux fleurons centraux de la marguerite la distribution spatiale la plus homogène possible.

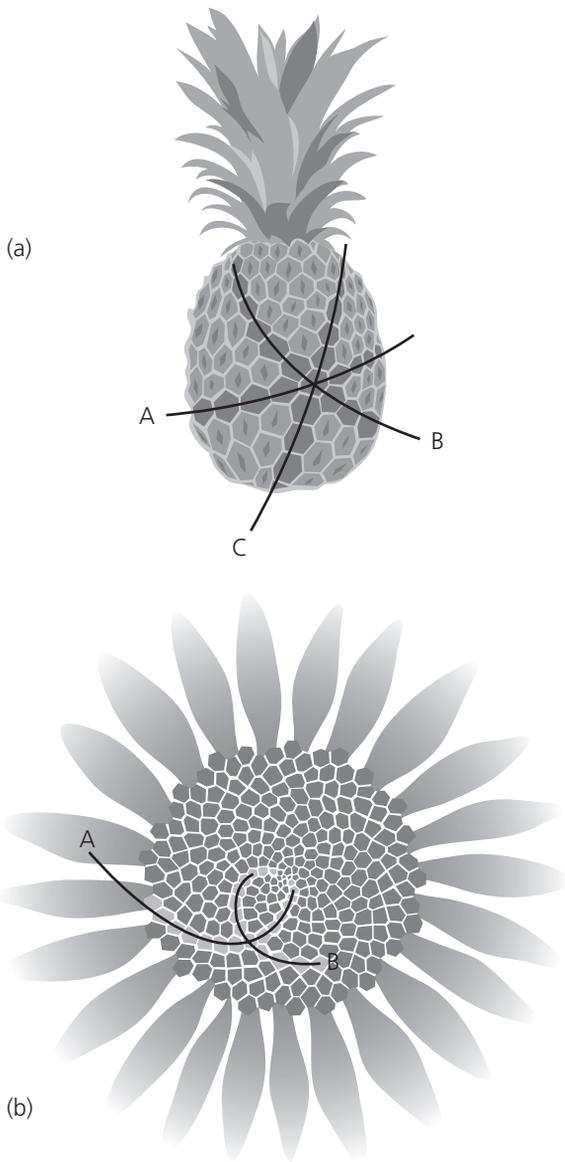


Fig. 9.6 Une règle numérolologique connue des férus de botanique. Si, dans un ananas, on compte le nombre des hélices parallèles à celle qui porte la lettre *A*, on trouve en général un nombre de la série de Fibonacci. Si l'on répète l'opération pour l'hélice *B*, on tombe sur le nombre qui le suit dans la même série. Quant à l'hélice *C*, elle correspond à la somme des deux nombres précédents, qui est aussi leur successeur dans cette même série (a). En ce qui concerne la fleur de tournesol ou celle de la marguerite, on retrouve la même propriété, à condition de faire le compte des spirales (b). Cette règle comporte des exceptions, mais son origine est explicable, ce qui n'est apparemment pas le cas de la loi de Titius-Bode.

«Moïse monta des plaines de Moab sur le mont Nébo [...]. Puis l'Éternel lui fit contempler tout le pays [...]. Alors l'Éternel lui dit: [...] Je te l'ai fait voir de tes yeux, mais tu n'y entreras point.»
[Deutéronome 34, 1,4].

Le centre du monde se dérobe

Si, à l'intérieur de notre système solaire, la traque aux nouvelles planètes semble terminée, une nouvelle chasse s'est ouverte en 1995 grâce à la mise en évidence de *Pégase 51*, la première *planète extrasolaire* jamais découverte. Elle est en orbite autour d'une étoile analogue au Soleil et appartenant à la constellation de Pégase. C'est là un résultat extraordinaire qui ouvre des perspectives illimitées. Jusqu'ici, nous ne connaissions qu'un seul système planétaire, le nôtre. A partir d'un exemple unique, il est difficile de tirer les modes de formation et d'évolution d'un système planétaire. Or cette découverte, due aux deux astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz, a été rapidement suivie d'autres observations analogues: au début de 2004, 120 *exoplanètes* étaient cataloguées. Maintenant que nous voyons bien au-delà de Pluton, nous allons en apprendre plus sur l'origine et l'histoire de notre système solaire.

De même qu'Aristarque de Samos avait anticipé les idées de Copernic, la conviction que des mondes habités existent aux confins de l'univers remonte au moins à l'Antiquité. Dans sa *Lettre à Hérodote*, le philosophe grec Epicure (341-270 av. J.-C.) écrit: «[...] il y a une infinité de mondes, soit semblables au nôtre, soit différents [...]. Car des atomes [...] ne peuvent pas être tout entiers consommés pour former un monde unique [...]» [146].

Le point de vue d'Epicure, strictement matérialiste, n'est pas parvenu à s'imposer au Moyen Age. Au début de la Renaissance, les penseurs étaient acquis aux idées d'Aristote, pour lequel le monde céleste enveloppe la Terre comme une cloche protectrice de pur cristal. Sa vision se limite aux étoiles fixes qui constituent le firmament. Devant cette tapisserie constellée de points lumineux, on assiste aux évolutions du Soleil, de la Lune et des cinq planètes connues des Anciens. Ces sept corps célestes sont animés de mouvements indépendants, ce qui complique d'autant l'agencement du monde céleste qui n'en reste pas moins le siège de la perfection. Le monde terrestre, ou monde sublunaire, est soumis au changement, l'antinomie même de la perfection céleste. C'est dire que les apparitions fugaces des météores et des comètes trahissent leur appartenance au monde sublunaire. L'univers d'Aristote est infiniment plus rassurant que le monde d'Epicure, dépourvu de bornes. Le succès qu'il a eu si longtemps auprès de l'Église ne s'est démenti qu'à partir de la Renaissance. Le moine italien Giordano Bruno (1548-1600) l'a cruellement éprouvé dans sa chair. Après avoir constamment provoqué l'Église en

discutant ou en rejetant nombre de ses dogmes, il se met à enseigner que l'univers est infini et peuplé d'une multiplicité de mondes comme le nôtre. Arrêté en 1592, il est brûlé vif à Rome sur le Champ des Fleurs en 1600 [144]: comme tous les chiens de garde des révolutions, les Inquisiteurs étaient totalement dépourvus d'humour. A vrai dire, Bruno, qui s'adonnait à la magie et à l'hermétisme, n'était pas un penseur très stimulant. Mais l'Inquisition en a fait un martyr, comme toujours en pareil cas.

Avec Aristote, la Terre était au centre d'un monde qui ne s'étendait guère au-delà de Saturne. Copernic, en installant le Soleil à la place de la Terre, nous éloignait d'autant de ce point unique. Ceux qui, comme Bruno, ont imité la démarche d'Epicure, en ont encore réduit l'importance. Le temps d'identifier le centre de l'univers avec celui de la Galaxie, à 30 000 années-lumière du Soleil, et la Galaxie elle-même perd sa position privilégiée: elle n'est plus qu'une galaxie perdue dans le tourbillon vertigineux des amas de galaxies, eux-mêmes noyés au sein de multiples super-amas, peuplant un univers pour lequel le concept de centre n'a probablement aucun sens. Dans ces conditions, comment ne pas regarder au-delà du système solaire afin d'y chercher des systèmes stellaires analogues au nôtre.

Cette banalisation suprême de notre situation fait naître une question qui est tout sauf banale: la vie existe-t-elle dans d'autres systèmes stellaires? Est-elle semblable à celle que nous connaissons? Ces questions sont grisantes, mais quelle est la chance que nous puissions y répondre un jour? Il n'est pas interdit de rêver et d'espérer que la chasse aux exoplanètes nous en apprendra un peu plus sur nos origines.

Le compagnon invisible

Aujourd'hui, une vie consacrée à la mesure précise de la position des étoiles n'est pas propre à faire rêver les adolescents. Les choses ne devaient pas être si différentes à la fin du XVIII^e siècle. C'est pourtant une carrière dans ce domaine qui a apporté la célébrité à Bessel et qui, par la même occasion, a démontré que l'excellence dans le travail est parfois plus importante que la nature même du travail.

L'astronome et mathématicien allemand Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) est l'exemple-type de ces gens qui se sont fait un nom sans avoir montré de talent précoce. Il est le contraire d'un enfant prodige, si bien que, à l'opposé de ses frères, il abandonne le lycée pour faire un apprentissage de commerce. Il décide de devenir officier dans la marine marchande. C'est à ce moment-là qu'il commence à manifester des dons hors du commun. Dans cette profession et à cette époque, des connaissances élémentaires en astronomie sont indispensables. Ses progrès dans cette matière sont fulgurants. Il se lance dans la détermination précise de l'orbite de la comète de Halley. En 1804, à l'âge de vingt ans, il présente ses résultats à Olbers qui encourage vivement le jeune homme à poursuivre une carrière en astronomie où il fait preuve de dons aussi éclatants. Cinq ans plus tard, Bessel est nommé professeur d'astronomie et directeur de l'observatoire de Königsberg. Sans que Bessel soit contraint de rédiger une thèse de doctorat, l'Université de

Goettingen lui décerne le titre de docteur. Bessel deviendra un spécialiste de l'*astronomie de position*. Il se voue à la détermination précise de la position des étoiles. A ce titre, il se consacre aussi bien au développement de l'optique mathématique qu'à l'amélioration de l'équipement de son observatoire [147].

Du point de vue qui nous intéresse ici, la mesure précise des positions stellaires a au moins deux avantages. Tout d'abord, elle permet à Bessel de donner pour la première fois une évaluation précise de la distance des étoiles les plus proches de nous. Pour y parvenir, il recourt à la triangulation dont le principe est plus simple que la mise en œuvre. Bessel vise un astre proche, puis il recommence six mois plus tard. Durant cet intervalle, la Terre s'est déplacée de 300 millions de kilomètres, distance égale au diamètre de son orbite autour du Soleil. Il en résulte que l'étoile observée semble s'être légèrement déplacée par rapport aux étoiles «fixes», autrement dit beaucoup plus éloignées. Grâce à la géométrie élémentaire, la mesure de la *parallaxe* (la moitié du déplacement angulaire apparent) fournit alors la distance de l'étoile visée (fig. 10.1). Michel Mayor donne une illustration parlante de ce phénomène: «Pour comprendre [...], il suffit de tendre son bras, le pouce levé, et de regarder ce pouce avec chaque œil alternativement. On le voit alors se déplacer par rapport au fond de la scène [...].» [112] Malheureusement, l'étoile la plus proche étant éloignée de 4,3 années-lumière (chap. 7), son déplacement angulaire ne correspond même pas à une seconde d'arc, ce qui explique que la méthode des parallaxes est limitée par l'imperfection des instruments.

Bessel a appliqué ses techniques à une autre fin, qui nous intéresse également. Il a déterminé le *mouvement propre* d'un certain nombre d'étoiles proches. Même si, du fait de la gravitation, les étoiles sont en révolution autour du centre de la Galaxie, les vitesses individuelles diffèrent d'un astre à l'autre. Vu de la Terre, le record du mouvement propre le plus rapide est détenu par l'*étoile de Barnard*, une étoile peu lumineuse qui évolue à 6,1 années-lumière (AL): dans la direction perpendiculaire de la ligne de visée, elle se déplace de 10,3 secondes d'arc par année, qui correspondent à une *vitesse transversale* de 91 km par seconde. Ce qui ne l'empêche pas de se déplacer également le long de cette même ligne de visée. On parle alors de *vitesse radiale* (fig. 10.2). Si au mouvement apparent de cette étoile on soustrait les effets de la révolution terrestre autour du Soleil, on constate que ce mouvement est rectiligne et uniforme, comme il convient pour un astre presque isolé. Or, quand Bessel s'attaque au mouvement de Sirius, il a une heureuse surprise qui va être à l'origine de nouvelles questions et de nouveaux défis.

De toutes les étoiles, Sirius est la plus lumineuse. Seules la Lune et quelques planètes la dépassent en éclat. La prééminence de Sirius est due à la fois à son éclat intrinsèque et à sa proximité: sa distance ne dépasse pas 8,7 années-lumière; par ordre d'éloignement du Soleil, elle se classe au septième rang. Or, à force d'étudier le mouvement propre de Sirius, Bessel constate que, au lieu d'être rectiligne, il est sinueux!

Lorsque, par une nuit bien noire, on lève les yeux vers un ciel dégagé, on constate que les étoiles sont distribuées de manière aléatoire. Les anciens y ont vu des constellations et ont fait preuve d'une imagination fertile en leur attribuant des noms d'animaux – la Grande Ourse, le Lion, le Grand Chien – ou de figures mythologiques – Orion, Andromède, Persée. Les astronomes qui

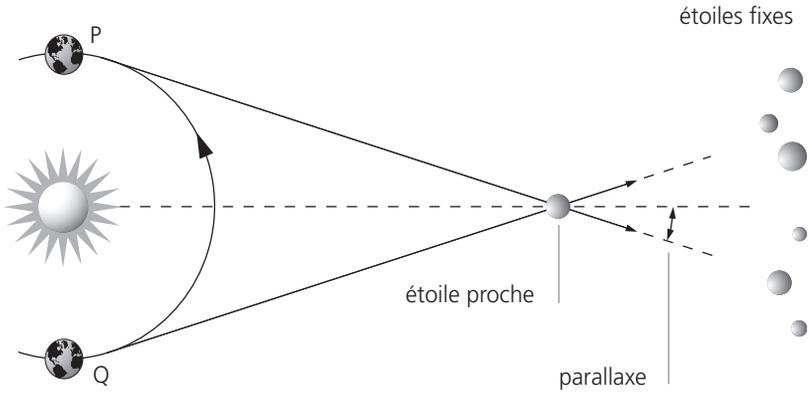


Fig. 10.1 Au cours d'une demi-révolution autour du Soleil, la Terre passe par deux points P et Q éloignés de 300 millions de kilomètres (deux unités astronomiques). Par rapport aux étoiles les plus lointaines (les étoiles fixes), une étoile «proche» semble se déplacer d'un certain angle; la moitié de cet angle constitue la parallaxe. La géométrie élémentaire permet de déduire la distance de l'étoile à partir de l'angle de visée et de la parallaxe observée. D'après Mayor et Frei [112].

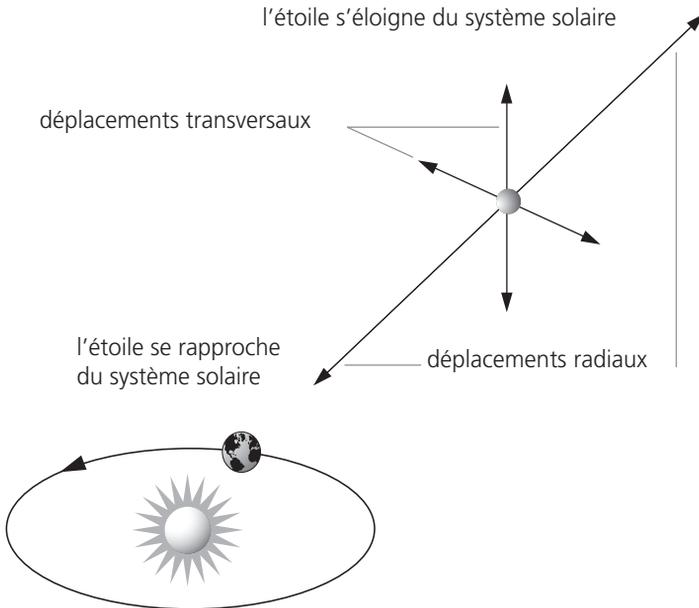


Fig. 10.2 La mesure du mouvement propre transversal d'une étoile proche par l'intermédiaire d'une simple visée ne pose pas de problème de principe, si ce n'est qu'elle n'est possible que pour les étoiles proches. Pour avoir accès au mouvement radial, qui traduit l'éloignement ou le rapprochement de l'étoile, il faut faire appel à une autre méthode. D'après Mayor et Frei [112].

ont parlé d'*étoiles doubles* en ont fait de même. Comme les points lumineux sont semés au hasard sur la voûte céleste, à deux points voisins ne correspondent pas nécessairement des astres réellement proches. La plupart du temps, il ne s'agit que d'un effet de perspective. Le couple d'étoiles n'est réuni que dans notre imagination: les deux astres s'alignent à peu près sur une droite issue de la Terre tout en étant très éloignés l'un de l'autre. Ce compagnonnage n'est que provisoire: du fait du mouvement propre des membres du couple, l'association qu'ils forment disparaît lentement au profit d'autres réunions improbables.

Rien n'empêche cependant que deux étoiles qui semblent proches le soient réellement. Dans la majorité des cas, les nuages de gaz et de poussières qui s'effondrent ne donnent pas naissance à une étoile unique – c'est le cas du Soleil – mais à un système double ou multiple. Comment distinguer les *étoiles doubles optiques*, qui n'existent que par les hasards de la perspective, des *étoiles doubles physiques*, qui sont réellement proches? Tout simplement parce que, dans ce dernier cas, les deux corps exercent l'un sur l'autre une attraction gravifique dont les effets sont observables: les deux étoiles sont en révolution l'une autour de l'autre. Comment ce ballet se distingue-t-il de celui des planètes autour du Soleil?

Ce sont les lois de Kepler qui ont conduit Newton à énoncer la loi de la gravitation. Mais elles correspondent à une situation particulière: un corps de très grande masse affirme son autorité sur des planètes bien moins massives, si bien que les lois de Kepler ne disent rien d'un mouvement éventuel du Soleil, considéré comme immobile. Kepler s'était rallié à la conception de Copernic qui plaçait le Soleil au centre de l'univers. Or le mouvement du centre de l'univers n'a pas de sens. Mais lorsque Newton formule la troisième loi (tab. 9.2), il affirme qu'une action physique entre deux corps est toujours réciproque. Du moment que le Soleil exerce une force sur la Terre, notre planète en fait de même sur le Soleil. Si la force que subit la Terre est manifeste, puisqu'elle entraîne notre planète dans sa révolution annuelle, les effets de celle que notre planète exerce sur le Soleil sont plus difficiles à mettre en évidence: du fait de l'importance de sa masse, notre étoile possède une inertie considérable.

Dans les *Principia*, Newton analyse la situation sans imposer de restriction aux masses des deux astres qui s'attirent mutuellement. [129] Il arrive à la conclusion illustrée à la figure 10.3b. On y voit deux corps en révolution l'un autour de l'autre. Pour mieux décrire la situation, il convient de dire que les deux astres décrivent un cercle autour de leur *centre de masse* commun, tout en restant constamment sur la ligne droite passant par ce centre. Ce sont les masses des deux corps qui déterminent les rayons des cercles respectifs. Plus grande est la masse d'un corps, plus petit est le rayon de sa trajectoire, si bien que le centre de masse peut être situé à l'intérieur du volume du plus grand des deux corps. Les figures 10.3a et 10.3c correspondent à deux situations opposées.

Pour simplifier la discussion, on a admis que le centre de masse était immobile et les trajectoires des deux corps circulaires, alors qu'elles sont généralement elliptiques. Le centre de masse commun occupe le foyer de chacune des ellipses qui sont parcourues en des temps égaux. La masse de Jupiter, la

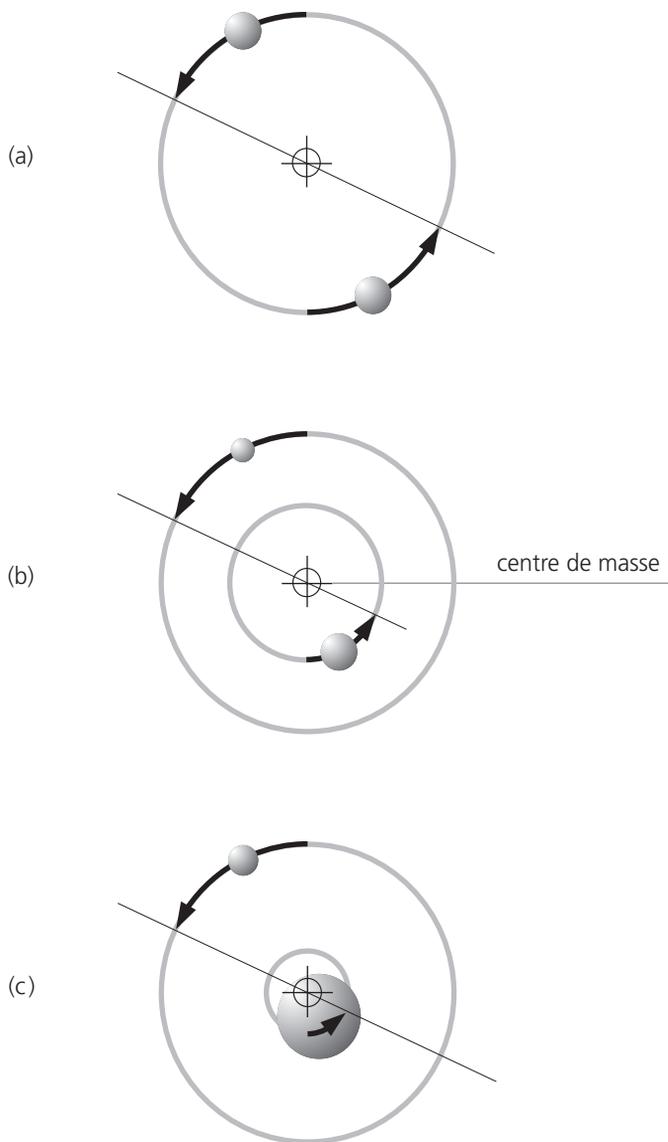


Fig. 10.3 Trajectoires de deux corps célestes en révolution commune dans le cas où le centre de masse est immobile. Quand les masses respectives sont égales, les astres se déplacent sur la même orbite (a). Quand les masses sont différentes, le centre de masse est d'autant plus proche du corps le plus massif que le rapport des masses est grand (b). Ces deux cas reproduisent fidèlement les systèmes d'étoiles doubles. Dans le cas d'un couple constitué d'une étoile et d'une planète, le rapport des masses est tel que le centre de masse peut être situé à l'intérieur de l'étoile dont le centre n'en décrit pas moins une révolution autour de lui (c). Par souci de simplicité, on a supposé que les trajectoires étaient circulaires plutôt qu'elliptiques.

planète géante, est 1050 fois inférieure à celle du Soleil, alors que la distance qui la sépare de notre étoile s'élève à 778 millions de kilomètres. Il en résulte que le centre de masse du couple Jupiter-Soleil se situe juste à l'extérieur de notre étoile: c'est une bonne approximation que de considérer le Soleil comme immobile. Seules les planètes sont en révolution, une situation qui correspond à l'énoncé des lois de Kepler.

En 1844, quand il découvre les sinuosités du mouvement de Sirius, Bessel constate qu'elles s'expliquent si l'étoile est accompagnée d'un *compagnon* invisible, Sirius B. Dans les années qui suivent, on détermine les caractéristiques de l'orbite double (fig. 10.4) et, en 1862, on observe enfin l'étoile mystérieuse, à la fois massive et peu lumineuse. Une telle découverte intrigue les astronomes du XIX^e siècle. Ils sont convaincus que, plus la masse d'une étoile est grande, plus son éclat est considérable. Au début des années 1930, grâce à l'astronome indien Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), on prend conscience de l'existence d'une nouvelle catégorie d'étoiles, les naines blanches (chap. 6). Sirius B en fait partie. Sa masse est la même que celle du Soleil, mais son rayon (5700 km) est inférieur à celui de notre planète (6400 km). Dans ces conditions, sa faible luminosité se perd complètement dans l'éclat de sa voisine, Sirius A. Quant à la période de révolution commune, elle se monte à 49 ans.

La découverte de Sirius B est un jalon important sur les traces d'éventuelles planètes extrasolaires. Elle montre qu'une étoile invisible peut manifester sa présence aux côtés d'un astre bien plus lumineux grâce aux effets de la seule pesanteur. Mais la bataille n'est pas gagnée d'avance car la masse d'une

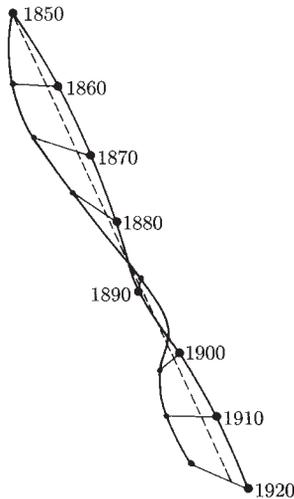


Fig. 10.4 Sirius et son compagnon sont les composantes d'une étoile double. Les courbes en trait continu correspondent à leurs trajectoires. Elles paraissent complexes car le centre de masse commun se déplace à vitesse uniforme le long d'une trajectoire rectiligne représentée en pointillé.

planète est limitée. Elle ne peut guère dépasser celle de Jupiter, si bien que les perturbations qu'elle exerce sur une étoile sont réduites: une planète est nécessairement beaucoup moins massive qu'une étoile. Le XX^e siècle est jalonné de cadavres d'exoplanètes mort-nées parce que leurs découvertes, annoncées prématurément, n'ont pas été avérées. Même si elle bénéficie des techniques les plus modernes, l'astronomie de position telle que la pratiquait Bessel n'est pas adaptée à la recherche des exoplanètes. Il a fallu se tourner vers la spectrographie.

Le *spectrographe* fait appel à l'effet Doppler discuté au chapitre 5. C'est un instrument permettant d'enregistrer la fréquence des raies stellaires. Si une étoile fait partie d'un système double, sa révolution autour du centre de masse a pour effet de faire osciller la fréquence des raies observées. Tantôt les raies sont décalées vers le bleu, tantôt elles sont déplacées vers le rouge, et la fréquence de cette oscillation coïncide avec celle du mouvement de l'étoile¹. Du décalage optique, on remonte à la vitesse radiale de l'astre lumineux (fig. 10.5). Il en est de même si l'étoile est escortée d'un système planétaire. Moins la masse du compagnon stellaire ou des planètes est importante, moins la vitesse de l'étoile est grande et plus le décalage des raies est difficile à mesurer: ce qui pose donc un problème, c'est la mise en évidence des compagnons stellaires ou des planètes de faible masse.

Il existe cependant une situation pour laquelle la détection de corps peu massifs est relativement aisée. C'est lorsqu'ils sont en révolution autour d'un pulsar.

Le système planétaire du pulsar

Les pulsars tournent sur eux-mêmes très rapidement. Leurs périodes de rotation vont à peu près de trois secondes à 1,5 millième de seconde, ce qui permet de les connaître individuellement avec une précision extraordinaire. Pour y parvenir, on enregistre les pulsations de l'étoile pendant une longue période. Il ne reste qu'à diviser le temps d'observation par le nombre d'oscillations et le tour est joué.

En général, les étoiles à neutrons sont isolées. Elles sont animées d'un mouvement uniforme et leur période reste constante ou augmente progressivement, signe que le pulsar tourne de moins en moins vite autour de son axe. Il peut aussi arriver que la période de l'astre se modifie soudainement, un événement qui trahit une modification rapide de sa structure interne: le pulsar a subi un gigantesque «tremblement d'étoile».

Une autre situation peut aussi se produire: la période du pulsar peut varier périodiquement. C'est alors un indice de la présence d'un compagnon ou d'un cortège de planètes. En 1992, après quelques fausses alertes, l'astronome d'origine polonaise Alexander Wolszczan et son collègue américain

¹ Il faut se garder de confondre la fréquence des raies stellaires, qui sont proches de la bande du visible (fig. 2.1), et celle de la révolution stellaire, incomparablement plus lente: la période correspondante se mesure en jours, mois ou années.

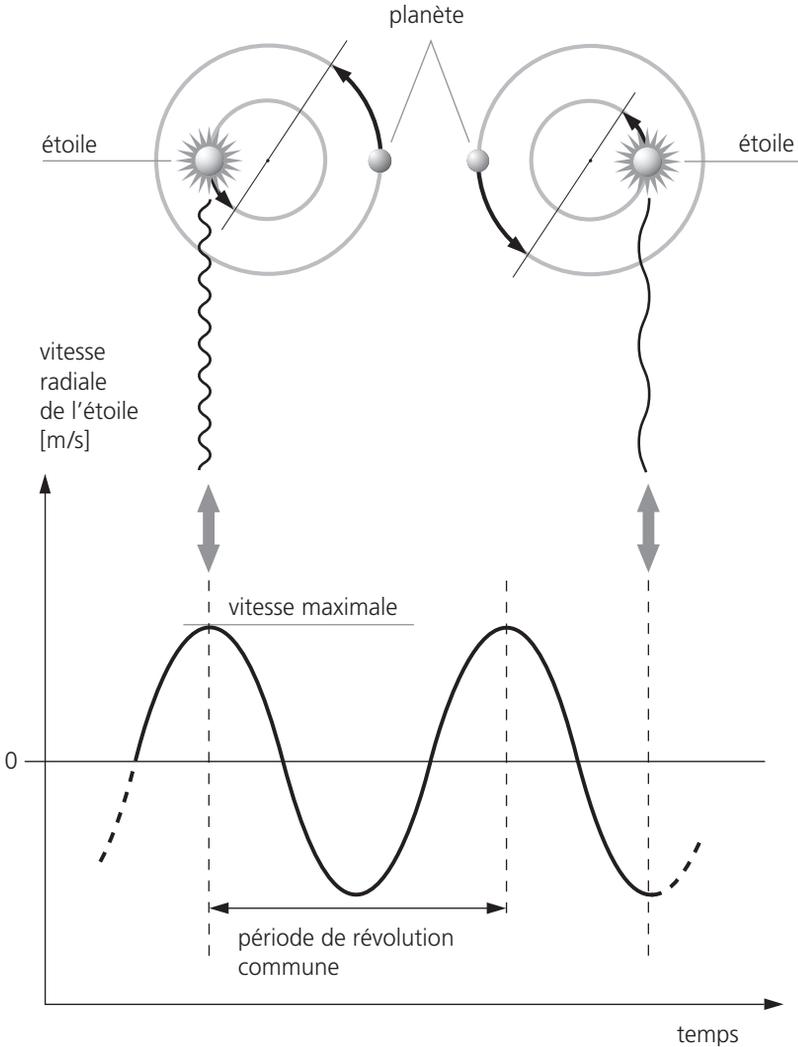


Fig. 10.5 Les trajectoires d'une étoile et d'une planète en révolution autour de leur centre de masse commun sont vues par la tranche. Par effet Doppler, la fréquence des raies d'émission de l'étoile est décalée vers le bleu ou le rouge selon que l'étoile se rapproche ou s'éloigne de l'observateur. On peut ainsi en déduire la variation dans le temps de la vitesse radiale de l'étoile. La composante transversale de la vitesse ne peut être observée de cette manière. On note que la période de révolution de chacun des membre du couple coïncide nécessairement avec celle de l'oscillation révélée par l'effet Doppler. D'après Mayor et Frei [112].

Dale Frail annoncent la découverte d'un système planétaire autour d'un pulsar dit «milliseconde» car sa période de rotation est précisément de 1,5 milliseconde. L'étude de la variation de la période du pulsar indique clairement que trois corps sont en orbite autour du pulsar. Deux d'entre eux ressemblent à la Terre et le troisième à la Lune... mais seulement en ce qui concerne leur

masse. On n'a guère d'idée sur la nature des astres qui sont en révolution autour de ce pulsar, si ce n'est qu'ils n'ont probablement rien de commun avec les planètes telles que nous les connaissons. Un pulsar n'est pas un havre de paix, le rayonnement qu'il émet n'évoque en rien la douce chaleur solaire. Sa naissance effrayante dans l'enfer d'une supernova ne présage rien de bon pour les planètes qui ont survécu au cataclysme, à moins qu'elles ne se soient formées plus tard. C'est la raison pour laquelle les objets en révolution autour d'un pulsar ne sont pas considérés comme des planètes extrasolaires.

En ce qui concerne les planètes en révolution autour d'une étoile analogue à la nôtre, une question se pose. Comment savoir s'il s'agit de planètes plutôt que d'étoiles peu volumineuses?

Etoile ou planète?

Pour mettre en évidence la présence d'un compagnon de faible masse en orbite autour d'une étoile, qu'il s'agisse d'une planète extrasolaire ou d'une étoile très peu lumineuse, le spectrographe constitue un progrès important relativement aux méthodes de l'astronomie de position. Mais la détermination de la masse du compagnon invisible pose un problème nouveau. Si l'orbite est vue par la tranche, on mesure directement la masse. En revanche, si la trajectoire est inclinée par rapport à la ligne de visée, la masse que l'on mesure est inférieure à la masse réelle, et l'écart augmente avec l'angle d'inclinaison (fig. 10.6). Il faut s'y résigner: tout se passe comme si la masse de la planète se partageait entre la vitesse transverse, non mesurable par effet Doppler, et la vitesse radiale, seule accessible². Comme ils ignorent l'inclinaison de l'orbite planétaire, les astronomes n'ont accès qu'à une *borne inférieure de la masse* du compagnon planétaire ou stellaire invisible.

Cette situation est embarrassante, car la masse d'un corps céleste nous en apprend beaucoup sur sa nature. Pour les chasseurs de planètes extrasolaires, la valeur de la masse de leur gibier est cruciale. Contrairement au pêcheur en rivière qui a une tendance légendaire à exagérer la taille de la truite qu'il porte dans son panier, le chasseur de planètes réduirait volontiers celle des corps célestes détectés: leur intérêt est d'autant plus grand que leur masse est petite. Selon les estimations des astrophysiciens, la masse d'une étoile est au moins 75 fois plus grande que celle de Jupiter. Si cette masse est inférieure, l'astre en miniature commence par imiter le Soleil. Il s'échauffe lors de l'effondrement du nuage de gaz qui marque sa naissance mais, ensuite, les choses changent. Au centre du corps nouvellement créé, la température et la pression n'atteignent jamais le seuil qui permettrait à la fusion de l'hydrogène de s'amorcer durablement.

Si la masse d'un corps céleste reste inférieure à dix *jupiters* (une curieuse unité de masse introduite par les chasseurs d'exoplanètes), il y a de bonnes chances pour qu'il s'agisse d'une «vraie» planète. On y trouve de la matière gazeuse, liquide ou solide, à peu près conforme à celle que nous connaissons

² Il s'agit là d'une métaphore.

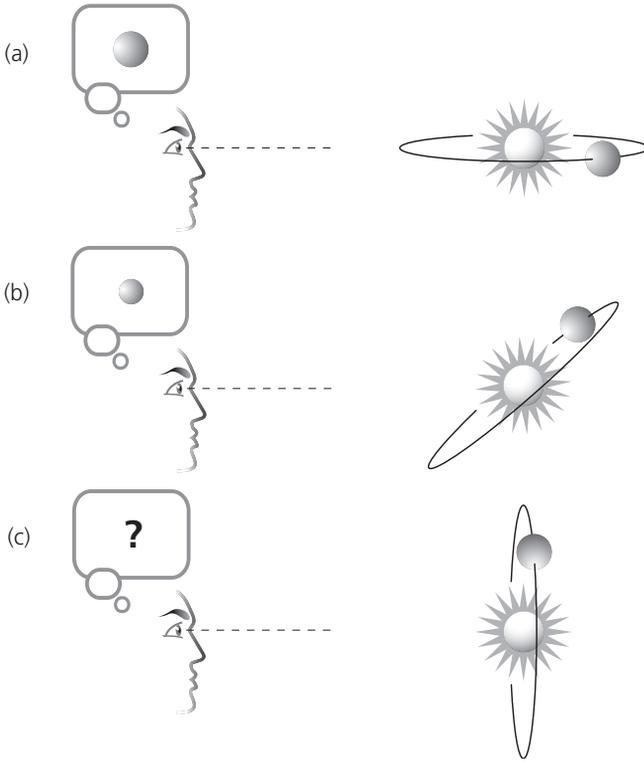


Fig. 10.6 La mesure de la vitesse radiale par effet Doppler ne fournit directement la masse de la planète inconnue que lorsque la direction d'observation est parallèle au plan de l'orbite (a). Quand le plan de la trajectoire est oblique, la masse réelle de la planète est supérieure à celle que l'on mesure (b). Si la trajectoire était perpendiculaire à la ligne de visée, la méthode ne donnerait aucune information sur la présence d'une planète éventuelle. D'après Mayor et Frei [112].

ici-bas, c'est-à-dire constituée d'atomes et de molécules³. Si la masse de la planète est décidément trop faible, inférieure à celle de Cérès, la pesanteur qui règne à sa surface ne parvient pas à la modeler à sa convenance. La planète n'est plus qu'un astéroïde en forme de pomme de terre.

Le lecteur attentif a noté que nous n'avons rien dit des corps dont la masse est comprise entre 10 et 75 jupiters. Cette zone ne nous concerne guère. Il suffit de dire qu'elle comprend des *naines brunes*, ces étoiles avortées capables d'amorcer les premières étapes de la fusion de l'hydrogène, mais incapables de parvenir à sa conclusion.

Les lignes qui précèdent pourraient provenir d'un souci obsessionnel de classification. Il n'en est rien. L'objectif lointain de la chasse aux planètes extrasolaires est de mettre en évidence des planètes semblables ou analogues à la

³ Lorsque la masse de la planète dépasse deux jupiters, il est probable que, en son centre, les atomes perdent leur individualité [148].

Terre et, qui sait, d'y déceler des traces de vie. La première étape consistait à découvrir des planètes de la taille de celle de Jupiter. La tâche était plus aisée mais, du point de vue de la recherche d'une autre forme de vie, moins prometteuse.

La battue s'organise

Pour détecter une planète extrasolaire, deux méthodes sont en concurrence. Dans les deux cas, il est avantageux que la planète soit massive, certes, mais les deux procédés diffèrent quand on compare les effets respectifs de la distance entre l'étoile et la planète qui l'accompagne. Pour l'astronomie de position, plus cette distance est grande, plus la trajectoire de l'étoile est sinueuse, ce qui facilite la mise en évidence d'un compagnon. En contrepartie, plus la distance à laquelle nous observons le couple céleste est grande, plus la précision de la mesure diminue. *La mesure des vitesses radiales par effet Doppler, en revanche, est d'autant plus sensible que l'étoile et la planète sont proches l'une de l'autre. Par ailleurs, la précision de la méthode ne dépend pas de la distance qui sépare le couple céleste du système solaire.*

Quand un chercheur doit opter entre diverses techniques de mesure, il doit peser les avantages et les inconvénients de chacune d'elles puis, son choix fait, il doit adapter sa stratégie de recherche à la méthode adoptée. Il doit également tenir compte de ce qu'il sait ou croit savoir de l'objet de sa convoitise. Dans le cas de la chasse aux planètes, il ne peut se reposer que sur une seule donnée, nos connaissances du Soleil et de son cortège de planètes. Elles ont été acquises par l'observation et par le calcul: depuis Laplace, les théories de la formation du système solaire ont été nombreuses.

Au moment où l'on s'apprête à partir à la recherche des premiers systèmes planétaires autres que le nôtre, on s'accorde sur leurs caractéristiques. Près de l'étoile, on trouve des planètes telluriques, essentiellement rocheuses; les gaz légers n'ont pu se maintenir sur ces blocs de pierre, où la température est trop élevée. Ce n'est que beaucoup plus loin que se trouvent des planètes géantes et gazeuses analogues à Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Pour un astronome observant notre système solaire d'une étoile lointaine, la présence de Jupiter provoquerait une lente oscillation de la vitesse radiale du Soleil. Les variations de la vitesse dépasseraient tout juste 10 m/s, mais la période de l'oscillation, 12 ans, exigerait beaucoup de patience. Quant aux effets des autres planètes, bien plus réduits, le chasseur de planètes pourrait les oublier.

C'est au début des années 1980 que la traque aux planètes extrasolaires aborde un tournant. Une équipe canadienne se lance dans la course en utilisant un spectrographe: elle fait confiance à l'effet Doppler pour décrocher le gros lot. L'instrument qu'elle met au point permet de détecter des variations de vitesse radiale de l'ordre de 15 m/s. Il servira de modèle pour les équipes qui viendront ensuite: elles en reprendront le principe, quitte à l'améliorer. Sous la direction de Geoffrey Marcy et Paul Butler, une équipe californienne se met sur les rangs quelques années plus tard. Ce n'est qu'en 1994 qu'intervient une équipe helvétique, composée de Michel Mayor, né en 1942, et de Didier Queloz, né en 1966, qui a choisi Mayor comme directeur de thèse.

Mayor est professeur d'astronomie à l'Université de Genève. Il est aujourd'hui directeur de l'observatoire de Genève. Au terme d'études de physique accomplies à l'Université de Lausanne et achevées par un mémoire de physique théorique, il s'est spécialisé en astronomie, un peu par hasard, selon ses propres dires [4]. Ce qui ne signifie nullement qu'il exerce son métier en amateur, mais simplement que, s'il s'était décidé pour un autre domaine de la science, il y aurait fait preuve de la même passion et de la même compétence.

Plutôt que des planètes extrasolaires, Mayor et Queloz recherchent essentiellement des naines brunes. En 1988, l'astronome américain David Latham avait découvert qu'une étoile un peu plus lumineuse que notre Soleil était escortée d'un compagnon de faible masse. Grâce à la collaboration d'un astronome suisse, Gilbert Bürki, et d'un jeune astronome français, Antoine Duquennoy, Michel Mayor confirme l'observation. La borne inférieure de la masse du compagnon étant de 11 jupiters, il y a de bonnes chances qu'il s'agisse d'une naine brune. Or l'expérience montre que cette situation est plutôt rare: ces étoiles avortées répugnent en général à s'associer à d'autres étoiles. Au lieu de se limiter à l'observation d'un lot restreint d'étoiles, Mayor et Queloz doivent donc inscrire à leur programme un échantillon stellaire bien plus abondant que celui de leurs concurrents. Pour Mayor et Queloz, c'est là un atout dont ils n'ont pas conscience au moment où ils préparent leur campagne.

Autre avantage qui se révélera déterminant pour la suite, la distance entre une étoile et la naine brune qui lui sert de compagnon est généralement faible. Elle est souvent de l'ordre du rayon de l'orbite de Mercure. La période d'une naine brune se compte en semaines plutôt qu'en années, et rien n'empêche qu'elle ne se compte qu'en jours! Pour leur recherche, Mayor et Queloz se servent d'un spectrographe baptisé «Elodie» installé à l'observatoire de Haute Provence⁴. Le Français André Baranne a résolu les problèmes optiques que pose son utilisation. Le système informatique mis au point par Didier Queloz est presque capable d'analyser la vitesse radiale d'une étoile «en temps réel», ce qui signifie que les utilisateurs peuvent dépouiller les mesures quelques minutes après les avoir faites [112]. Puisqu'ils cherchent des compagnons en orbite rapide autour d'une étoile principale, Mayor et Queloz ont une bonne raison d'étendre leurs investigations à un grand nombre d'étoiles.

Au même moment, l'équipe californienne améliore la précision de ses mesures. Marcy et Butler peuvent mesurer les vitesses stellaires radiales avec une précision de 3 m/s mais leur équipement informatique est lent. Ils doivent se limiter à un échantillon restreint d'étoiles. Alors que la course est lancée, les protagonistes américains ne sont pas conscients de la concurrence helvétique.

Touché!

Au mois de novembre 1994, Michel Mayor passe six mois à l'Université de Hawaii. Il reste en liaison avec Didier Queloz qui s'efforce de calibrer Elodie en

⁴ Elodie est la dernière étape d'une entreprise de longue haleine à laquelle plusieurs astronomes ont collaboré [112].

se servant de dix étoiles de référence, choisies pour la stabilité notoire de leur luminosité. Durant ce travail préparatoire, Didier Queloz détecte des oscillations sur l'une d'elles. Elle appartient à la constellation de Pégase et porte le numéro 51, si bien qu'on la désigne sous le nom de Pégase 51, souvent abrégé en 51 Peg. Elle ressemble beaucoup au Soleil et se trouve à 45 années-lumière de notre Terre. Queloz a-t-il trouvé la trace d'un compagnon en orbite autour de Pégase 51? Mieux encore, s'agirait-il de la première exoplanète? Jusqu'au jour où le verdict sera enfin prononcé, une longue épreuve attend les deux astronomes, une tension que connaissent ceux qui sont sur la piste d'une découverte importante. Ils doivent d'abord se convaincre qu'ils ne sont pas victimes d'un «canular», le nom que l'on donne familièrement à une fausse joie due à un instrument mal réglé ou à l'interprétation incorrecte d'un effet bien réel mais moins intéressant.

L'instrument est rapidement mis hors de cause: il ne révèle d'oscillations que lorsqu'il est dirigé vers 51 Peg. Mais ces oscillations pourraient avoir d'autres causes que la présence d'une planète. Il pourrait s'agir de pulsations stellaires, de taches entraînées dans la rotation de l'étoile ou encore d'instabilités atmosphériques. De nouvelles vérifications s'imposent. Comme le dit Michel Mayor, le savoir scientifique est si morcelé que les deux chasseurs de planètes doivent recourir à la compétence des spécialistes de nombreux domaines de l'astronomie pour se convaincre de la réalité de leur trouvaille. On pense à Hewitt et Jocelyn Bell passant par la même phase de doute et cherchant à écarter toutes les causes plus ou moins banales des oscillations observées (chap. 7).

Lorsqu'ils pensent avoir éliminé tous les risques d'erreur, Mayor et Queloz entrent dans une seconde phase. Ils ne doutent plus qu'ils ont décelé un compagnon autour de Pégase 51, mais les interrogations n'ont pas disparu. Selon leurs observations, la période de l'astre invisible est de 4,2 jours (fig. 10.7) et sa masse minimale est à peu près égale à la moitié de celle de Jupiter. Comme la nouvelle planète est très proche de son étoile (Fig. 10.8), l'attraction gravifique entre les deux corps est importante, si bien que la vitesse radiale mesurée par Elodie varie de 59 m/s au cours d'une révolution. La précision de la mesure que l'équipe californienne s'était efforcée d'atteindre s'avère superflue... Si l'on renonce à considérer Pluton et les compagnons des «pulsars milliseconde» comme de véritables planètes – et les arguments ne manquent pas pour prononcer leur exclusion – alors le compagnon de Pégase 51 est la première découverte de planète après celle de Neptune, il y a 149 ans de cela.

Il convient ici de relever un point important. Les lois de Kepler ne disent rien de la masse d'une planète. Lors de sa découverte, la masse de Pluton a été considérablement surestimée parce que cette planète est recouverte de glace d'eau et de méthane et que, dans ces conditions, elle réfléchit abondamment la lumière du Soleil. La détermination de sa trajectoire ne nous aurait rien appris de sa masse. En revanche, quand une planète est assez massive pour pouvoir imprimer un mouvement observable à son étoile par l'intermédiaire de leur attraction réciproque, on peut espérer collecter certaines informations sur la valeur de sa masse.

Le parcours des combattants n'est pas terminé. Il leur faut maintenant annoncer la découverte en respectant certaines règles. Les mœurs et les usages ont changé depuis Newton mais, quand il s'agit de faire reconnaître la

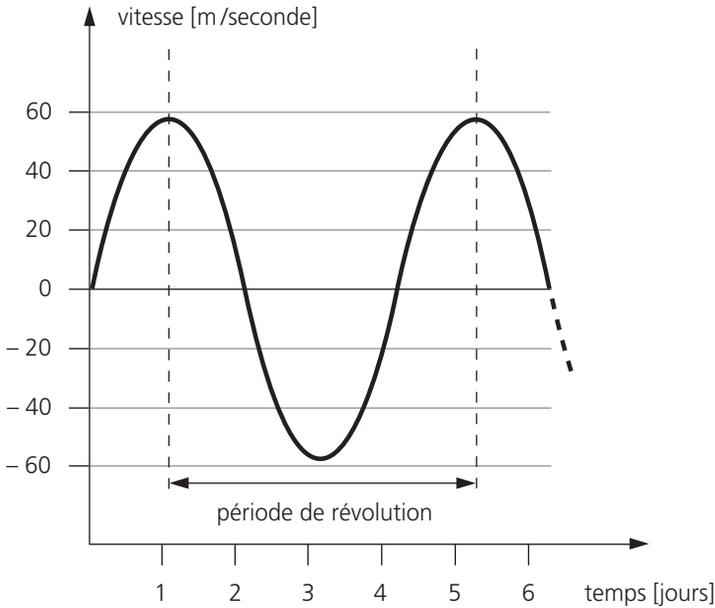


Fig. 10.7 L'oscillation de la vitesse radiale de l'étoile Pégase 51 démontre l'existence d'une planète. Le temps de révolution du couple étoile-planète est égal à 4,2 jours. Comme le montre la figure 10.5, il s'agit là de la période même de l'oscillation.

priorité d'une découverte, les difficultés n'ont pas pour autant disparu. Elles n'ont fait que changer de forme.

De nos jours, les auteurs d'une découverte importante doivent la publier dans une revue scientifique dont le haut niveau est maintenu grâce à la compétence des lecteurs⁵ que choisit l'éditeur. Avant la publication, les lecteurs donnent leur avis sur la valeur et l'intérêt de l'article proposé. Ils peuvent suggérer des corrections mais, en dernier ressort, c'est l'éditeur qui décide s'il fera paraître ou non le texte qui lui a été soumis. Cette procédure impose un certain délai à la publication. Tant que l'article n'a pas paru, les futurs auteurs sont tenus à la confidentialité. Mayor et Queloz remettent leur texte à la revue *Nature* en août 1995. Il leur faut négocier avec l'éditeur pour avoir le droit d'annoncer la nouvelle à un congrès important prévu à Florence en octobre de la même année. Entre temps, les auteurs ont beau respecter leur devoir de réserve, la nouvelle se répand peu à peu parmi les astronomes.

Lorsque la découverte est enfin annoncée, Marcy, l'animateur de l'équipe californienne, est absent de Florence. Très redouté des chasseurs de planètes qui le surnomment *Dr. Death*⁶, il a la réputation de démasquer les fausses

⁵ En anglais, on parle de *referees*.

⁶ Dr. La Mort.

exoplanètes. Mais quelques jours plus tard, il envoie un courriel à Mayor dans lequel il confirme la découverte de la planète tout en félicitant les deux chasseurs. Pour Mayor et Queloz, le succès est là, même s'il reste encore quelques turbulences à traverser.

Deux jours après avoir vérifié l'existence des oscillations de Pégase 51, Marcy et Butler publient un communiqué de presse commençant par une phrase ambiguë: «Des astronomes de Berkeley et San Francisco confirment la récente annonce d'une planète en orbite autour d'une étoile proche – c'est la première fois que la découverte d'une planète en révolution autour d'une étoile normale résiste à une analyse critique.» L'information est correcte, mais on ne peut pas prétendre qu'elle mette en avant le rôle des astronomes helvétiques: les spécialistes de la propagande apprécieront. Ironie du sort, Marcy et Butler avaient délibérément écarté Pégase 51 de leur liste d'étoiles à étudier. Ils avaient pris cette décision sur la foi d'une information erronée figurant dans une table stellaire. Or, s'ils étaient avides de reconnaissance, leur communiqué de presse la leur fournit au-delà de tout ce qu'ils pouvaient espérer. Leur portrait apparaît à la première page de quantité de journaux américains et étrangers. La télévision s'intéresse à eux.

Mayor et Queloz n'apprécient guère le tapage organisé autour de la «médaille d'argent» alors que le silence se fait autour des «médailles d'or». Comme le dit Didier Queloz: «Certains articles racontaient que deux Américains avaient annoncé la découverte d'une planète; en fin de page, ils mentionnaient que la planète avait aussi été observée par une équipe suisse.» [144] Il faut dire que Mayor et Queloz, eux, non autorisés par *Nature* à prendre contact avec la presse, ne peuvent même pas répondre aux questions des journalistes, faute de quoi on les menace de renoncer à la publication de l'article. Dans de telles situations, une revue scientifique tient à participer à la gloire de la découverte.

L'article de Mayor et Queloz fut finalement accepté par *Nature* le jour où l'on fêtait *Halloween*, et il parut le 23 novembre 1995, le jour où les Etats-Unis célébraient *Thanksgiving* [149]. Le hasard peut avoir un certain sens de l'humour.

Après la battue, la moisson

Becquerel a découvert la radioactivité parce qu'il espérait mettre en évidence une éventuelle fluorescence des sels d'uranium. Jocelyn Bell était engagée dans la chasse aux quasars quand elle a découvert les pulsars. C'est en cherchant des naines brunes autour de certaines étoiles que Mayor et Queloz ont observé la première planète extrasolaire. Ont-ils tous eu de la chance? Le hasard a certes joué un certain rôle dans ces trois épisodes, mais il ne peut expliquer qu'une partie du processus ayant conduit à ces découvertes. L'histoire des sciences choisit avec soin ses héros. Dans le cas de Pégase 51, il suffit de relire les lignes qui précèdent et surtout les références [112] et [114] pour s'en convaincre.

Une grande découverte inaugure nécessairement un nouveau domaine de recherche, sans quoi elle ne saurait revendiquer ce titre. Dans le sillage de

Pégase 51, nombreux sont les astronomes qui se précipitent dans les vastes champs célestes afin de profiter de la récolte abondante qui les attend. Au début de 2004, l'*Extrasolar Planets Encyclopedia* publie une liste de 120 planètes extrasolaires. Parmi ces planètes, 28 font partie de *systèmes planétaires multiples*. Elles se regroupent à deux ou à trois autour de la même étoile [150]. Une part importante de ces planètes ont été découvertes par le groupe de l'observatoire de Genève ou par celui de Berkeley. Certaines de ces observations ne sont pas encore confirmées, notamment parce que, à cause de l'incertitude concernant les masses, illustrée à la figure 10.6, il se pourrait que certains de ces corps inconnus soient des naines brunes. Il n'en reste pas moins que, au début de l'année 2004, nous connaissons une centaine de planètes, probablement des géantes gazeuses comme Jupiter ou Saturne. Et rien n'empêche d'éventuelles exoplanètes telluriques d'exister, mais les instruments actuels ne peuvent les détecter.⁷

Si Pégase 51 n'avait été que le numéro un d'une série d'exoplanètes similaires à Jupiter et peuplant des systèmes stellaires comparables au nôtre, sa découverte aurait déjà une grande importance aux yeux des historiens des sciences. Mais elle est beaucoup plus que cela. Elle est un premier indice du fait que le système solaire est exceptionnel.

Voyons d'abord les faits. Alors que Jupiter met près de 12 ans pour boucler son orbite autour du Soleil, la moitié des planètes figurant dans la liste [8] ont une période de révolution inférieure à un an, et nombreuses sont celles qui n'ont besoin que de quelques jours pour décrire la totalité de leur orbite. Pégase 51b fait partie du nombre (fig. 10.7). La troisième loi de Kepler l'exige, des planètes aussi rapides sont très proches de leur étoile, beaucoup plus que Mercure ne l'est du Soleil (fig. 10.8).

Avant 1995 et la découverte de Pégase 51, l'histoire de notre système solaire et son processus de formation semblaient compris, même si la complexité du processus était reconnue [112]. Les planètes gazeuses se sont formées loin du Soleil; seules les planètes telluriques sont nées près de notre étoile. Les astronomes pensaient que ce schéma s'appliquerait à d'autres systèmes planétaires, si toutefois il en existait. Et voilà que Pégase 51b, si proche de Jupiter par la masse, se moque de la théorie: elle gravite si près de son étoile que, en surface, sa température doit être de l'ordre de 1300°C.

Si Pégase 51b était unique en son genre, elle ne porterait pas atteinte à la théorie de la formation du système solaire. Elle serait l'exception qui confirme la règle. Mais, sitôt après sa découverte, les catalogues d'exoplanètes regorgent d'exemples similaires à Pégase 51b. Aujourd'hui, c'est Jupiter et le système solaire tout entier qui se singularisent. Confrontés à ce nouveau défi, les théoriciens ne se démontent pas. Sitôt les premières exoplanètes géantes découvertes, ils expliquent pourquoi elles sont si proches de leur étoile. Formées à grande distance – sur ce point, ils ne reviennent pas sur leur opinion – elles ont entamé une spirale les rapprochant sans cesse de leur soleil. Ce serait contraire aux lois de Newton si la planète et son étoile étaient isolées,

⁷ Les choses changent très vite dans ce domaine. Il est possible que l'état des lieux que l'on dresse ici soit déjà dépassé à la fin de l'année 2004.

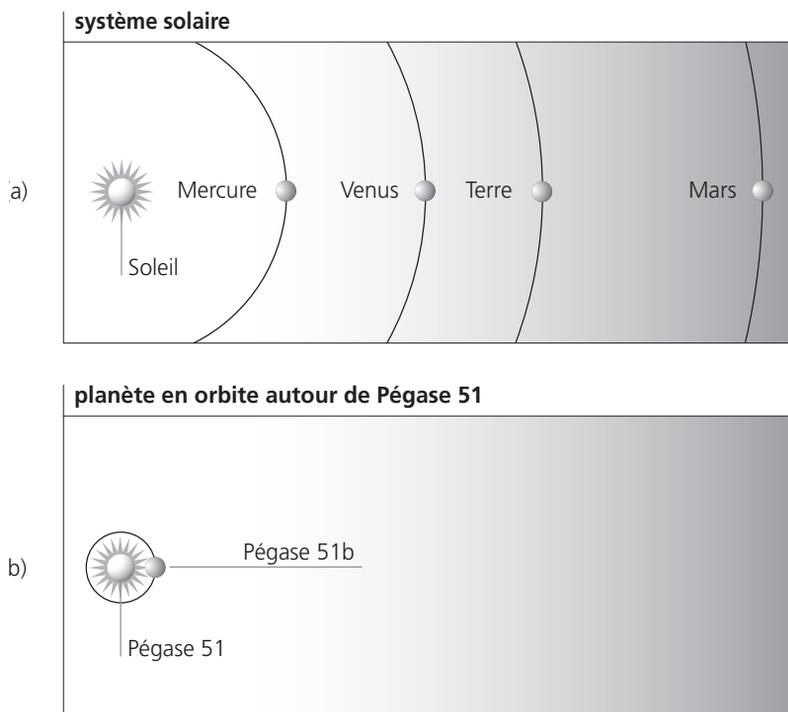


Fig. 10.8 Le rayon moyen de l'orbite de la planète extrasolaire en révolution autour de Pégase 51 est bien inférieur à la distance qui sépare Mercure du Soleil. Notre système solaire ne nous a pas habitués à une pareille proximité, d'autant que la masse de la planète extrasolaire est comparable à celle de Jupiter, dont l'orbite est trop étendue pour avoir trouvé place dans la figure.

mais parfaitement admissible dès lors qu'existe, autour de l'étoile, un disque de poussières analogue aux anneaux de Saturne. Un tel disque s'observe autour de certaines étoiles récemment formées. Au début de son évolution, notre système solaire est passé par une étape analogue. Les théoriciens ne se culpabilisent pas: leur modèle de formation des systèmes stellaires était pertinent. Leur seule erreur avait été de négliger la migration vers l'intérieur. On ne peut penser à tout!

Reste un point important. On pense que les planètes observées à proximité immédiate de leur étoile ne sont pas sur le point de se précipiter sur elle, mais plutôt que, au dernier moment, elles ont interrompu leur mouvement spiralé en direction de l'astre central; on comprendrait alors pourquoi elles sont si nombreuses à être proches de leur soleil. Qu'à cela ne tienne. Comme les diseuses de bonne aventure, plus à l'aise quand elles prédisent le passé que l'avenir, les théoriciens préfèrent expliquer un fait d'expérience que de prévoir un phénomène inconnu, ce qui est somme toute bien normal. La science est un dialogue permanent entre expérience et théorie. Si la recherche théorique ne rencontrait que des succès, l'orgueil de ses acteurs la transformerait en une

idéologie nauséabonde. Même dans l'Antiquité grecque, où les moyens d'investigation étaient presque inexistants, l'observation n'était jamais complètement absente. Elle tentait de dialoguer avec la spéculation. Comme dans toute situation analogue, le fait que les systèmes stellaires semblent différer de ce que nous en attendions est en soi une excellente nouvelle. Il y a encore beaucoup à faire!

En savoir plus

Le défrichage des étendues célestes ne fait que commencer. Nous pouvons même espérer voir les planètes extrasolaires.

Pour l'instant, il faut se contenter d'en percevoir l'ombre fugitive passant furtivement devant son étoile. On parle dans ce cas de *transit planétaire*. Il s'agit d'une éclipse extrasolaire très peu marquée. L'éclat de l'étoile n'est que faiblement atténué lorsque qu'une planète passe devant elle. Si l'astre lumineux est comparable à notre Soleil, son éclat diminue de 1% lorsqu'une planète à l'image de Jupiter vient à l'éclipser. (fig. 10.9). Cette technique permet d'évaluer le diamètre de la planète. Elle peut même donner des indications sur la composition de son atmosphère qui absorbe nécessairement une très faible partie de la lumière de l'étoile. Le premier transit a été observé avec l'étoile HD 209458 dont la planète avait déjà été détectée par mesure de la vitesse radiale [151]. De ces observations, il semble possible de tirer des informations supplémentaires, notamment en ce qui concerne la présence de gros satellites accompagnant la planète en transit [152]. Les astronomes n'excluent pas qu'une exoplanète analogue à la Terre puisse être détectée de la sorte. Mais l'ambition des chercheurs ne se limite pas à la perception d'une ombre. En se servant de télescopes extrêmement puissants, ils peuvent espé-

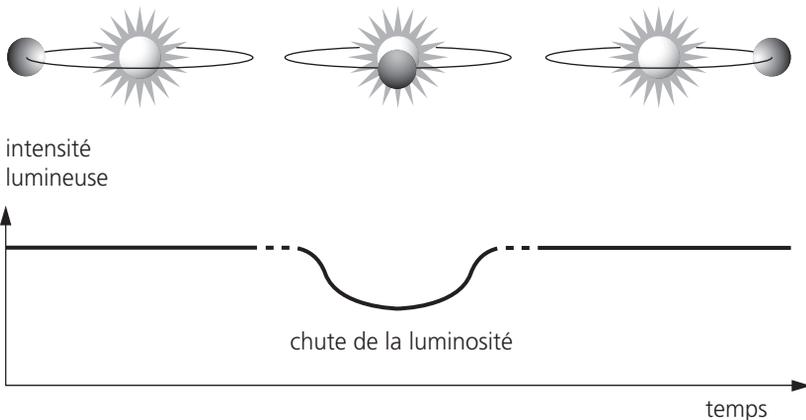


Fig. 10.9 Le transit éventuel d'une planète extrasolaire peut être mis en évidence par la diminution temporaire de la luminosité de l'étoile, faiblement éclipcée. Pour qu'un transit ait lieu, il faut que l'orbite planétaire soit exactement vue par la tranche. D'après Mayor et Frei [112].

rer observer directement des exoplanètes. Pour y parvenir, ils doivent mettre deux atouts dans leur jeu.

Le premier consiste à faire les observations dans le domaine des infrarouges plutôt que dans le visible, domaine dans lequel l'écart entre les luminosités respectives de l'étoile et la planète est réduit: la surface des planètes étant beaucoup plus froide que celle des étoiles, leur émission est beaucoup plus importante dans le domaine infrarouge. Pour une étoile, c'est l'inverse qui est vrai.

Le deuxième atout se nomme *interférométrie*, une technique prometteuse que les chercheurs sont en train de mettre au point. Elle consiste à combiner entre eux plusieurs télescopes. On dirige le réseau de télescopes vers une étoile grosse d'une ou de plusieurs planètes, et l'on joue sur la nature ondulatoire de la lumière pour effacer l'image de l'étoile au profit de celle de la planète. Des projets de missions spatiales sont à l'étude, aussi bien à la NASA qu'à l'ESA (Agence Spatiale Européenne), mais les lancements ne sont pas encore d'actualité. On peut penser que, dans quelques années, on sera en mesure de détecter un nombre sans cesse grandissant d'exoplanètes, de mettre en évidence celles qui auront des caractéristiques analogues à celles de la Terre et d'en analyser l'atmosphère. Nous ne pouvons plus éluder une question essentielle, celle de l'existence d'une activité biologique dans d'autres systèmes stellaires que le nôtre.

Fallait-il baptiser les nouvelles planètes comme nous l'avons fait pour celles du système solaire? Michel Mayor avoue y avoir songé. Pégase 51b aurait pu se nommer Epicure. Devant la moisson actuelle d'exoplanètes, on ne peut que comprendre son hésitation, avec une certaine nostalgie toutefois. Après tout, à côté de Sirius, de Véga et d'Arcturus, combien de BD 103166, de HD 209458 et de PSR 1257+12 peuplent-ils les catalogues stellaires?

Y a-t-il une vie au-delà de la vie?

La chasse aux planètes est passionnante parce qu'elle nous a déjà beaucoup appris sur la formation du système solaire, et que la récolte n'est certainement pas achevée. Alors que nous pensions que notre système de planètes était à l'image de ceux que nous allions découvrir, nous commençons à prendre conscience que sa structure pourrait être exceptionnelle. Mais laissons là les propriétés astronomiques des planètes pour nous interroger sur leur capacité à servir de refuge à la vie.

Même dans le jardin du Soleil, nous ne savons pas si la Terre est la seule planète habitée. Au début de 2004, la recherche de traces d'une vie élémentaire, présente ou passée, se poursuit sur Mars. En cas de succès, il faudrait encore s'assurer que cette vie embryonnaire ne résulte pas d'une contagion directe due à une ou plusieurs météorites (chap. 4). En parallèle, on se demande si l'un des quatre satellites médicéens de Jupiter ne pourrait pas être le siège d'une forme de vie. C'est Europe qui est visée, car elle est recouverte de glace, peut-être même d'une banquise: il est possible que Jupiter crée sur Europe d'importantes marées susceptibles de faire fondre en profondeur cette chape de glace. Sur Terre, on connaît des *bactéries* qui, privées d'apport d'oxygène, ne se nourrissent que de substances minérales (de l'hydrogène sulfu-

reux, par exemple). Rien ne s'oppose en principe qu'il en soit de même sur Europe [153]. Des missions sont déjà allées sur Mars. Il n'est pas impossible que l'on en fasse de même sur Europe, ou ailleurs dans le système solaire. En revanche, à cause de la distance, et compte tenu des moyens techniques qui sont aujourd'hui à notre disposition, une mission sur une planète extrasolaire tient aujourd'hui de la science-fiction: la sonde Voyager I s'éloigne du Soleil à la vitesse de 3 unités astronomiques par an. A ce train-là, elle mettrait un million d'années pour parvenir dans la banlieue de Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, et dix millions d'années pour se poser sur une éventuelle planète tellurique en révolution autour de Pégase 51. Il faudrait que nos descendants sachent construire des moteurs de fusée bien plus efficaces pour qu'ils songent sérieusement à des missions extrasolaires.

Si une forme de vie existe sur une exoplanète, l'analyse de son atmosphère serait susceptible de la révéler; certaines raies ou combinaisons de raies spectroscopiques pourraient nous l'apprendre. La preuve n'est certainement pas simple à administrer, mais les astronomes y songent déjà. Ce n'est que lorsque nous aurons étudié au spectroscopie les atmosphères des exoplanètes que nous y verrons plus clair. Jusqu'ici, la seule contrainte vient du fait que les instruments utilisés travailleront dans l'infrarouge. Nous verrons un jour si nous pouvons nous en libérer.

Avant d'aller plus loin, une mise en garde est nécessaire. L'éventualité d'une vie au-delà des limites du système solaire, quand elle est discutée, débouche presque nécessairement sur une interrogation plus vertigineuse encore: les civilisations extraterrestres ont-elles une réalité ailleurs que dans la littérature de science-fiction?

Nous n'avons pas le moindre indice nous permettant d'aborder cette question. Rien, sur Terre, ne porte la trace du passage de civilisations venues d'ailleurs. Quelques rares projets consistent à diriger des radiotélescopes en direction d'hypothétiques êtres évolués qui chercheraient à communiquer avec leurs «dissemblables» à travers l'espace. S'agit-il de «petits hommes verts» ou de «grandes femmes rouges⁷»? Le seul résultat de ces recherches, ce sont quatre initiales, *SETI*⁸. Certains amateurs de spéculations hasardeuses ont évalué le nombre de civilisations extraterrestres existant à l'intérieur de notre Galaxie. Les valeurs obtenues couvrent un spectre impressionnant qui va de zéro à plus de 100 millions [12]. En d'autres termes, ces gens ne sont arrivés à rien. La seule remarque qui ait quelque peu fait progresser la réflexion date de 1950. Elle est due au physicien italien Enrico Fermi (1901-1954), prix Nobel de physique 1938. Comme il déjeunait avec quelques collègues, l'un d'entre eux déclara qu'il croyait en l'existence de civilisations extraterrestres. Fermi se tourna vers lui et dit simplement: «Où sont-elles?» [154].

La question de Fermi est très pertinente. Sur Terre, nous ne sommes entrés dans l'ère scientifique que depuis un siècle ou deux, si bien que nous ne faisons

⁸ Accessoirement, on peut se demander si, dans toute civilisation extraterrestre, la notion de sexe a un sens, et si le nombre de genres est limité à deux...

⁹ L'acronyme de *Search for ExtraTerrestrial Intelligences*, la recherche d'une intelligence extraterrestre.

que balbutier nos gammes. Bien des étoiles de la Galaxie sont plus vieilles que le Soleil. S'il en est qui sont accompagnées de planètes habitées par de grandes femmes rouges, leur civilisation est plus avancée que la nôtre, quel que soit le sens que l'on donne à cet adjectif. Elles ont pu découvrir des sources d'énergie que nous ne savons pas encore domestiquer ou que nous ne pouvons même pas concevoir, ce qui leur a permis de coloniser leur propre système planétaire, les étoiles proches, et peut-être même une partie de la Galaxie. Pourquoi ne se sont-elles pas manifestées? A vrai dire, les aimables spéculations auxquelles se livrent ceux qui sont passionnés par cette question laissent rêveur [155].

Revenons sur Terre pour aborder un problème qui est moins spéculatif, celui de la vie extraterrestre. Et commençons par nous poser une grande question, celle qui domine toute l'*exobiologie*, qui traite précisément de ce problème: l'apparition de la vie sur Terre était-elle probable? On ne peut, aujourd'hui, que passer en revue les quelques indices dont nous disposons:

La vie est incroyablement complexe.

Tous les êtres vivants actuels ont un ancêtre commun.

Sur Terre, la vie est apparue rapidement.

La vie est incroyablement complexe

A côté de la *reproduction*, les êtres vivants disposent d'une seconde fonction essentielle. Il s'agit du *métabolisme*, l'ensemble des transformations chimiques qui se produisent dans l'organisme et qui donnent lieu, notamment, à la nutrition, la respiration ou l'excrétion. A ce titre, il est intéressant de se demander quels sont les êtres vivants les plus simples que nous connaissons. C'est du côté de la médecine, notamment, que nous devons chercher la réponse.

De nombreuses maladies infectieuses sont dues à des *bactéries*, des unicellulaires *procaryotes* qui ne vivent pas seulement en parasites dans les organismes supérieurs, mais qui peuplent notre planète tout entière et même les roches de la croûte terrestre. La cellule d'un procaryote est minuscule: sa taille peut être inférieure à un micromètre (10^{-6} m). Leur diversité éclate au grand jour quand on compare leur alimentation et les milieux où ils vivent. Les formes les plus communes vivent dans le sol, dans l'eau ou à l'intérieur d'autres organismes vivants. Certains d'entre eux ont développé la photosynthèse: c'est le cas des *cyanobactéries*, des algues unicellulaires bleu vert. D'autres procaryotes vivent dans des environnements hostiles pour tous les autres organismes. Les uns peuvent survivre dans les milieux acides; d'autres supportent une température ou une salinité élevée. On en trouve dans la Mer Morte.

Et les *virus*? Ne sont-ils pas plus élémentaires que les bactéries? C'est justement leur simplicité excessive qui les exclut du monde vivant. De même que les «virus informatiques» qui envahissent périodiquement les ordinateurs ne sont pas eux-mêmes des ordinateurs, les virus biologiques ne sont pas des êtres vivants. Leur fonction essentielle consiste à parasiter une cellule qui les abrite, souvent bien malgré elle. Ils donnent des instructions à leur hôte involontaire pour pouvoir bénéficier de son métabolisme et s'y multiplier. L'analogie entre les virus informatiques et biologiques n'est pas complète, mais elle est frappante.

Les bactéries, en revanche, sont des organismes autonomes. Leur unique cellule n'est simple qu'en comparaison de celles que l'on rencontre dans les organismes multicellulaires. Si l'on y regarde de plus près, les cellules bactériennes sont d'une immense complexité. Elles contiennent un très grand nombre de molécules organiques de grande taille; pour les chimistes, l'adjectif «organique» est à peu près synonyme de «qui contient du carbone». Ces molécules participent à des transformations chimiques si précises et si spécifiques que l'on ne parvient pas à imaginer comment les bactéries ont pu apparaître par *génération spontanée*. Car c'est bien de cela qu'il s'agit. A l'aube de l'histoire, quand la température de la Terre infertile se fut suffisamment abaissée, les molécules organiques purent s'y former et survivre. Nous avons de bonnes raisons de penser qu'une partie d'entre elles se sont spontanément formées sur Terre, par l'entremise de réactions chimiques banales. Nous devons cette constatation à Stanley Miller.

La scène se déroule à l'Université de Chicago, au début des années 1950. Le jeune chimiste américain Stanley Miller, né en 1930, est à la recherche d'un sujet de thèse. Or l'américain Harold Urey (1893-1981) est professeur de chimie dans la même institution. Il a reçu le prix Nobel de chimie 1934 pour avoir découvert le deutérium ${}^2\text{H}$. A l'époque qui nous intéresse, Urey s'intéresse à la formation du système solaire. Il affirme que, au début de l'histoire de la Terre, l'atmosphère avait une composition très différente. Elle devait être dépourvue d'oxygène. Cette situation aurait pu favoriser la formation de molécules simples, la matière première à partir de laquelle les cellules fabriquent les molécules de grande taille qui assurent le métabolisme cellulaire.

Avant de se mettre à la recherche d'un sujet de thèse, Miller avait assisté à un séminaire au cours duquel Urey exposait ses idées sur la composition de l'atmosphère terrestre primitive. A la fin de l'exposé, Urey avait suggéré une expérience simple consistant à préparer un mélange de composition similaire à celle de l'atmosphère primitive, puis à soumettre cette «maquette d'atmosphère» à des conditions proches de celles qui régnaient au début de l'histoire de la Terre. Conquis, Miller va trouver Urey et se déclare prêt à tenter l'aventure. Urey hésite. L'expérience qu'il a proposée ne convient pas pour une thèse: les risques qu'elle échoue sont trop importants. Miller insiste et l'on finit par trouver un compromis: si, au bout de six mois, la tentative n'a rien donné, on se rabattra sur un autre projet.

Miller se met au travail. Il prépare un mélange gazeux de méthane et d'ammoniac, deux substances organiques élémentaires, auxquelles il ajoute de l'hydrogène et de la vapeur d'eau. Il s'arrange pour soumettre le tout à la «foudre» (des étincelles) et à y introduire des échanges thermiques pour y provoquer des «averses» (de la condensation). Pendant une semaine entière, il abandonne sa pseudo-atmosphère à elle-même. Quand il interrompt l'expérience, il constate qu'une substance organique garnit le fond du récipient. Après l'avoir analysée, la partie la plus difficile de l'expérience, il y trouve un certain nombre d'acides aminés. L'intérêt de ce résultat se comprend mieux si l'on évoque le rôle que jouent les protéines chez les êtres vivants.

Les protéines se rencontrent dans tous les organismes et toutes les cellules. Ce sont des chaînes moléculaires de longueur variable et formées de l'assemblage de quelques centaines d'*acides aminés* (a.a.) comme un collier est

formé de perles. Les manuels de biochimie donnent la description des 20 a.a. qui entrent couramment dans la composition des protéines. C'est un point important, car les chimistes peuvent synthétiser un bien plus grand nombre d'a.a. L'expérience de Miller ne produit pas la totalité des vingt a.a. que l'on rencontre chez les êtres vivants, mais elle fournit aussi des a.a. que l'on n'y trouve pas. Comme les a.a. contiennent en général de dix à vingt atomes, une protéine de longueur moyenne compte quelques milliers d'atomes.

Les protéines participent au métabolisme cellulaire et à celui des organismes plus complexes, mais elles entrent également dans la formation de divers tissus organiques comme les os ou les muscles. Miller et Urey ont montré que, dans les conditions *prébiotiques* qui, pense-t-on, régnaient sur Terre avant l'apparition de la vie, rien n'empêchait les briques constitutives des protéines de se former spontanément. En revanche, la sélection des vingt a.a. propres à la vie a dû intervenir plus tard.

Sitôt connu le résultat de l'expérience de Miller, les journaux s'emparent de l'affaire. On organise un sondage, d'où il ressort que 22% des personnes interrogées considèrent qu'il est possible de recréer artificiellement la vie dans une éprouvette [154]. Aujourd'hui, on doute que l'atmosphère primitive eût précisément la composition que Miller lui avait attribuée. Les acides aminés produits au cours de l'expérience sont cependant analogues à ceux que l'on a trouvés dans une météorite tombée en 1969 près de Murchison, en Australie. Il en résulte que, dans un certain sens, Miller et Urey avaient raison. Il semble que la comète de Halley et *Titan*, le plus gros satellite de Saturne, contiennent également des molécules organiques simples [94]. Quant aux molécules dont Miller s'est servi pour composer son atmosphère artificielle, on les retrouve ça et là dans les nuages interstellaires, dans les météorites ou dans les atmosphères des planètes ou de leurs satellites.

L'expérience de Miller a inauguré une nouvelle discipline, la *chimie prébiotique*, qui a pour but de reproduire en laboratoire les réactions chimiques ayant conduit à l'apparition de la vie. Les chercheurs se sont efforcés de synthétiser les molécules contenues dans les cellules vivantes en ne faisant appel qu'aux substances et aux conditions physico-chimiques qui pouvaient exister à la surface d'une Terre encore stérile. Au risque de simplifier exagérément, on peut dire que l'étape qui mène à l'élaboration des briques élémentaires de la vie est simple mais que, ensuite, tout se complique et s'embrouille. Jusqu'ici, il est rigoureusement impossible de synthétiser les molécules complexes de la vie sans recourir aux usines chimiques prodigieuses que la nature a installées dans la cellule vivante.

Tous les êtres vivants actuels ont un ancêtre commun

Les chercheurs qui s'intéressent aux origines de la vie parlent volontiers de *LUCA*, l'acronyme de «*last universal common ancestor*¹⁰». Il y a de bonnes raisons, en effet, de supposer que toutes les cellules vivantes descendent d'un

¹⁰ Dernier ancêtre commun universel.

ancêtre commun: elles se ressemblent trop pour que l'on puisse faire l'impatte sur cette hypothèse.

A côté des protéines, une autre classe de molécules géantes joue un rôle essentiel dans la cellule. C'est l'ADN¹¹: chacun connaît la place qu'il a prise dans l'identification des individus au service de laquelle il remplace désormais les empreintes digitales. Les chaînes d'ADN constituent le support de l'hérédité et, à ce titre, elles permettent à la justice de reconstituer la filiation d'un individu et, au biologiste, celle d'une espèce entière. A l'intérieur d'une cellule, les molécules d'ADN ont un second rôle, tout aussi essentiel. Elles contrôlent la fabrication des protéines.

C'est autour de l'ADN et des protéines que se manifeste de façon éclatante l'unité du monde vivant.

De même que les protéines sont des chaînes formées par l'ajustement d'amino-acides appartenant à 20 catégories distinctes, une chaîne d'ADN est constituée de maillons que l'on appelle *nucléotides*. Il existe 4 sortes de nucléotides. On les désigne par les lettres A, C, G et T, l'abréviation universelle de *adénine*, *cytosine*, *guanine* et *thymine*. Un fragment d'ADN peut être envisagé comme une suite de caractères tirés d'un alphabet comportant quatre lettres:

.....CGTTAACGTACCG.....

C'est alors que les choses deviennent proprement admirables. Une protéine étant une chaîne d'acides aminés, il suffit de les spécifier l'un après l'autre pour que la protéine soit définie, puis assemblée à l'intérieur de la cellule. C'est ce que fait l'ADN. A chaque groupe de trois nucléotides correspond un a.a. unique. «CGT» veut dire: «ajouter une molécule d'arginine à la chaîne protéinique déjà commencée», «TTA» a la même signification, excepté que «arginine» est remplacée par «leucine», et ainsi de suite. Le lecteur profane peut imaginer la complexité d'une cellule d'un millièbre de millimètre – ou moins – qui contient une usine capable de pareils prodiges. Mais ce n'est pas tout.

L'ADN est une molécule beaucoup plus complexe qu'une protéine. Il est constitué d'unités structurales, les *gènes*. Même si le gène peut avoir d'autres fonctions, on peut l'envisager comme un fragment d'ADN qui synthétise une protéine. En vertu du système de codage adopté par la nature, un gène contient trois fois plus de caractères alphabétiques, et donc de nucléotides, que la protéine ne renferme d'acides aminés. Il est donc constitué de quelques centaines de caractères. Une bactérie particulièrement simple contient quelques milliers de gènes, ce qui correspond à quelques millions de nucléotides se succédant à la queue leu leu le long de l'ADN de sa cellule. Quant à l'ADN des organismes les plus complexes, il contient mille fois plus de nucléotides (tab. 10.1). L'ADN humain comporte trente mille gènes, mais aussi de très nombreux segments dont le rôle est mal connu ou inconnu. Pour parler plus crûment, ils ne servent sans doute à rien... Sinon à identifier leur proprié-

¹¹ L'acronyme de «acide désoxyribonucléique».

taire lors d'une recherche criminelle ou à établir des liens de parentés: la structure de cet ADN de rebut diffère d'un individu à l'autre et présente des ressemblances à l'intérieur d'une même famille.

Tableau 10.1 Informations concernant l'ADN, les protéines et leurs constituants.

Molécules	Constituants	Structure	Fonction	Longueur de la chaîne
ADN (acide déoxyribonucléique)	Nucléotides 4 espèces caractérisées par les symboles A,C,G,T	Chaîne linéaire de nucléotides AAATGAATC... ...GCGTCGAAA...	Constitue le génome , le patrimoine héréditaire de la cellule ou de l'organisme. Contient les instructions nécessaires à l'élaboration des protéines.	Extrêmement variable suivant la complexité de l'organisme. La chaîne peut comporter quelques milliers de nucléotides (virus), quelques millions (bactérie) ou quelques milliards (amibe, être humain).
Protéines	Acides aminés (a.a.) 20 espèces caractérisées par les symboles A, C, D, E, F, G, H, I, K, L, M, N, P, Q, R, S, T, V, W, Y	Chaîne linéaire d'a.a. DFPWWAC... ...CIADLPK...	Participent au métabolisme des cellules et des organismes plus complexes. Entrent dans la formation de divers tissus organiques.	Variable. Une protéine moyenne comporte 300-400 a.a.

Le code génétique

Comme il existe 4 types de nucléotides (4 «lettres»), il existe 64 combinaisons distinctes de trois nucléotides (64 *codons*): AAA, AAC, AAG,...,TTT. Chacune d'elles a un sens précis pour l'usine chimique que constitue la cellule. 60 d'entre elles désignent un a.a. bien précis. Un soixante et unième codon est ambigu: il se rapporte à la méthionine, l'un des 20 a.a., mais il peut aussi donner une instruction à la cellule: «l'assemblage de la protéine commence»;

3 codons correspondent à l'instruction opposée: «la synthèse de la protéine est terminée». Comme il n'existe que 20 a.a. distincts, de nombreux mots sont des synonymes: TTA, TTG, CTA, CTA, CTC, CTG et CTT désignent tous la leucine, le seul a.a. correspondant à six mots différents [154, 156]. Ces quelques indications devraient suffire pour que le lecteur mesure l'incroyable complexité de la cellule vivante, mais aussi pour qu'il réalise que la vie a échafaudé un véritable code permettant de passer de l'ADN aux protéines. Il s'agit du *code génétique* qui a été décrypté dans les années 1960. Lorsque l'on passe en revue le monde vivant dans son ensemble, on constate que *le code génétique est universel*. Il présente certes des variations minimales d'un groupe biologique à un autre, mais ces exceptions sont si peu importantes qu'elles ne font que confirmer la règle.

Ce n'est pas tout. On pense que *la structure du code est loin d'être arbitraire*.

Pour faire comprendre cette dernière affirmation, on peut passer par un exemple fictif qui met en scène le Dr. Alanine, un biochimiste russe d'une compétence exceptionnelle. Il connaît tout ce que nous savons de la structure de la cellule vivante, mais il ignore complètement le code génétique: un tel personnage est aussi crédible qu'un loup végétarien. Notre biochimiste imaginaire, fort de ses connaissances, tente malgré tout de reconstituer le code génétique, à l'image du jeune Pascal qui, nous dit-on, avait retrouvé sans aide aucune la 32^e proposition d'Euclide: la somme des angles d'un triangle est égale à deux angles droits [157]. Le Dr. Alanine connaît parfaitement les propriétés des vingt acides aminés et des quatre nucléotides ainsi que tout l'attirail structurel et chimique de la cellule. On lui a expliqué que chaque mot du code génétique est constitué de trois lettres. Comment va-t-il reconstituer le code inconnu?

Pour parvenir à ses fins, le Dr. Alanine part de l'idée que le code génétique est parfaitement adapté à sa tâche, compte tenu des multiples contraintes auxquelles il est soumis. Il essaie d'imaginer comment, au cours de l'histoire, le code a pu s'imposer sur ses concurrents. La tâche du Dr. Alanine est formidable: si l'on néglige l'ambiguïté de sens du codon qui appelle la méthionine, il n'en reste pas moins que 64 codons se répartissent 21 significations distinctes: le nom de chacun des 20 a.a. ainsi que le signal d'arrêt du déchiffrement. Ce qui laisse une liberté immense dans le choix du dictionnaire permettant de passer de l'information contenue dans un gène à la structure de la protéine qu'il élabore.

La machine cellulaire est admirable, mais comme toute machine, elle commet des erreurs. Elle en commet même beaucoup. Lors du passage d'une génération à la suivante, il arrive que l'ADN soit mal copié: un des gènes de votre rejeton peut être modifié. Il s'agit là d'une *mutation*, un concept bien connu des amateurs de science-fiction. En général, les mutations sont délétères pour l'organisme qui les détient. Elles risquent fort d'avoir des effets désastreux sur la protéine élaborée par le gène qui en a été la victime. Conscient de ce danger, le Dr. Alanine se met à la recherche d'un code qui réduirait le plus possible l'effet des mutations. En général, une mutation se signale par la substitution d'un acide aminé par un autre dans le corps de la protéine. Si le nouvel acide aminé est chimiquement proche de celui qu'il a remplacé, le

malheur n'est pas bien grand: ce que le Dr. Alanine doit rechercher, c'est un code «conservateur» pour lequel les mots presque homonymes seraient à peu près synonymes.

Après des années de travail acharné, le biochimiste achève son travail. Il n'a pas trouvé un code unique, mais toute une famille de codes, à peu près équivalents entre eux, mais qui sont supérieurs à tous les autres du point de vue des critères retenus. On lui permet alors de comparer le code génétique choisi par la nature avec la famille très restreinte qu'il a sélectionnée. A sa plus grande joie, il constate que le code «naturel» figure dans sa propre liste!

Ce que le Dr. Alanine est censé avoir fait, d'autres l'ont fait à sa place. Ils sont arrivés à la même conclusion [158]. La conclusion de ce travail est évidente. Si le code génétique est admirablement adapté aux aléas de sa fonction, c'est sans doute qu'il est le résultat d'une évolution darwinienne.

Le constat s'impose: LUCA utilisait le même code génétique que nous. L'argumentation serait la même lors de la recherche du dernier ancêtre commun à tous les oiseaux. On peut affirmer sans grands risques qu'il portait des plumes [159]. Or, si LUCA utilisait déjà le code génétique actuel, il s'agissait nécessairement d'un organisme infiniment plus complexe que les agrégats d'acides aminés ou de nucléotides les plus sophistiqués que Miller et ses successeurs aient jamais produits. Nous ignorons la voie qui conduit des molécules prébiotiques primitives à un organisme comme LUCA. Tant que nous n'en saurons pas plus, ce cheminement nous paraîtra incroyablement long et difficile. Et il l'a sans doute été.

Sur la Terre, la vie est apparue rapidement

La Terre s'est formée il y a 4,5 milliards d'années. Elle était alors une vivante image de l'enfer. Brûlante, constamment bombardée d'astéroïdes et de comètes, elle était parfaitement stérile. Nous avons un témoin de cette époque, la Lune. Dépourvue d'atmosphère et de vie, elle ne subit aucune érosion, si bien que l'on peut étudier et dater les cratères d'impacts météoriques qui souillent sa face comme les cicatrices de la petite vérole. On peut ainsi reconstituer l'enfance de notre planète. La Lune est une voisine très proche de la Terre. La datation de la surface de notre satellite et des impacts successifs révèle que, pendant quelques centaines de millions d'années, il a été en butte à un bombardement qui s'est peu à peu ralenti. Une nouvelle poussée de fièvre semble s'être manifestée il y a 3,9 milliards d'années. La Terre a dû subir le même traitement. Durant cette phase terrifiante, la vie est peut-être apparue sur Terre, à moins qu'elle ne soit venue de l'espace à cheval sur une comète ou sur une météorite. Si les choses se sont passées ainsi, la vie nouvellement éclosée pouvait difficilement résister aux agressions dont notre planète était l'objet [87]. Il est plausible que, dans les débuts de l'histoire de la Terre, plusieurs impacts ont été si catastrophiques qu'ils ont pu réduire en vapeur l'ensemble des océans [113]. On ne peut donc exclure que la vie soit apparue plusieurs fois sur notre planète et qu'elle ait disparu à chaque fois. Dans l'état des connaissances, et malgré l'imprécision des données, il faut admettre que la vie sur Terre peut difficilement avoir un âge supérieur à 4 milliards d'années.

A quelle époque LUCA vivait-il? Donner une réponse directe à une pareille question n'est pas possible car les fossiles qui datent d'une époque aussi reculée risquent fort d'avoir été détruits. Le fait que les roches terrestres les plus anciennes soient plus jeunes que la Terre elle-même parle en faveur de cette hypothèse. Nous ne pouvons que rechercher sur Terre le fossile d'un unicellaire qui, comptant LUCA dans sa lignée ancestrale, fût sans conteste un de nos cousins. Or le plus ancien signe de vie provient d'organismes vivant il y a 3,5 milliards d'années, même si, récemment, certaines voix ont mis cette affirmation en doute [160]. Ce sont des *stromatolithes*, littéralement «tapis de pierre», des feuillettes empilées les uns sur les autres et pouvant atteindre un kilomètre d'épaisseur. Les plus anciennes de ces structures ont été trouvées dans le Nord-Ouest de l'Australie. Ce sont des dépôts que produisent aujourd'hui encore des cyanobactéries qui, au cours de l'histoire de la Terre, molécule après molécule, ont rejeté de l'oxygène dans une atmosphère primitive qui en était dépourvue. On admet que si l'on détecte ce gaz dans l'atmosphère d'une planète extrasolaire, ce pourrait être un signe de vie. A défaut de détecter de l'oxygène, on se contenterait volontiers de détecter de l'ozone, l'un de ses avatars.

Si l'on prend fait et cause pour ces datations imprécises [160], cela signifie que les premières bactéries sont apparues au plus tard cinq cent millions d'années après la phase la plus aiguë du bombardement cosmique, et sans doute beaucoup plus tôt. Peu importe que l'évaluation de cette durée de latence soit bien fragile. Elle suggère que le passage d'un éventail de molécules prébiotiques primitives à un être vivant aussi élaboré qu'une cyanobactérie a été bien court. Il reste à justifier une telle affirmation.

De nombreuses protéines sont des *enzymes*, des substances qui, à l'intérieur de la cellule, accélèrent des réactions chimiques spécifiques. C'est là que le bât blesse. Les cellules ont besoin de protéines pour que le métabolisme cellulaire puisse se faire, mais les protéines elles-mêmes se fabriquent à l'intérieur de la cellule. Comment les premières cellules ont-elles pu voir le jour? Si leur élaboration s'est faite au hasard de réactions chimiques peu spécifiques et lentes, faute de la présence de ces mêmes protéines, les processus prébiotiques n'ont pu progresser que d'un pas lent et malhabile. C'est du moins la constatation qui s'imposera à l'esprit aussi longtemps que l'on ignorera le chemin emprunté par la vie primitive. Si l'on réalise de surcroît que des traces de vie bien plus anciennes nous ont certainement échappé, le temps qui sépare la fin des bombardements massifs des premiers fossiles connus paraît bien court.

L'argumentation en faveur d'une ère prébiotique courte passe également par l'*accélération de l'histoire des êtres vivants*. Les premiers animaux connus des archives fossiles datent de 560 millions d'années. Par «animal», on entend ici un être multicellulaire distinct des plantes. Les êtres que nous restituent ces fossiles appartiennent à la *faune d'Ediacara*, du nom d'un site paléontologique australien. Ce sont des créatures au corps mou ressemblant à des méduses. Comme tous les multicellulaires, ils sont constitués de colonies de cellules *eucaryotes*, beaucoup plus complexes et plus volumineuses que les cellules *procaryotes*. Leur taille oscille entre 10 et 100 micromètres et elles comportent un noyau ainsi que de minuscules *organites* différenciés participant au métabolisme de la cellule. Si *la cellule est une unité quant à la repro-*

duction, elle est un système complexe en ce qui concerne la structure et le métabolisme.

On a de bonnes raisons de penser que les cellules eucaryotes sont nées d'une sorte de fusion très ancienne de procaryotes qui auraient formé des associations beaucoup plus intimes que celle du requin et de son poisson pilote. Cette union a perduré au cours de l'évolution; si tous les animaux et toutes les plantes sont des eucaryotes, il en est de même de certains unicellulaires comme les amibes.

L'apparition des eucaryotes a constitué un jalon de l'histoire de la vie. Ils seraient apparus 800 millions d'années après les procaryotes. On admet que 3 milliards d'années séparent les plus anciens fossiles de procaryotes connus de ceux des premiers animaux enregistrés. Il est instructif de comparer une telle durée avec les 560 millions d'années qui ont été nécessaires pour passer de la faune molle d'Ediacara à l'avènement de *Homo Sapiens Sapiens*, puis avec les deux cent mille ans écoulés depuis la naissance de l'être humain. Finalement, dans une telle perspective, que sont les douze mille ans qui ont mené de l'invention de l'agriculture au blé transgénique et les trois cent vingt ans qui nous séparent de la parution des *Principia* de Newton? Les évolutions biologique et culturelle s'emballent littéralement. Ce sont les premiers pas qui coûtent et qui sont les plus lents.

Si l'on en revient à l'âge de LUCA, il existe en principe un autre moyen de le déterminer. L'étude comparative du génome des groupes biologiques ne nous permet pas seulement d'établir des filiations. Elle fournit aussi un moyen de reconstituer la chronologie de l'arbre des êtres vivants. A partir des génomes des procaryotes actuels, on peut remonter à LUCA en mesurant le temps écoulé, ce qui fixe du même coup son âge [113]. Cette méthode, malheureusement, est entachée de telles imprécisions qu'il faut encore attendre plutôt que d'en tirer des conclusions hasardeuses.

La vie apparaît-elle nécessairement quand les conditions sont favorables?

La vie est-elle apparue une fois et une fois seulement dans l'univers, et la troisième planète d'une étoile moyenne, le Soleil, a-t-elle été la scène unique de ce phénomène? Ou, au contraire, la vie apparaît-elle sur tout corps céleste où les conditions de température l'autorisent, où la présence d'eau et d'une atmosphère en font un berceau favorable, et où l'environnement est suffisamment stable?

Face à l'éventualité d'une vie extraterrestre, deux attitudes s'opposent au sein de la communauté scientifique. Curieusement, elles partent de la même constatation pour en tirer des conclusions antinomiques. Tout le monde admet en effet que, dans l'état de nos connaissances, l'apparition de la vie était un événement totalement imprévisible. Le biochimiste belge Christian de Duve, né en 1917, prix Nobel de médecine 1974, en est convaincu. Il s'appuie sur le fait que sa réalisation reposait sur une série de hasards invraisemblables: «Un événement unique peut se produire même s'il est aussi improbable que de gagner le gros lot à la loterie ou de relever une main unicolore au bridge¹². Il s'en produit sans cesse. Mais une série d'événements improbables [...] ne

peut se produire de manière naturelle.» [94] En d'autres termes, on peut gagner le gros lot une fois, éventuellement deux, mais pas chaque semaine. Il en est de même de l'origine des premières cellules. Chacune des réactions ayant conduit à leur élaboration est conforme aux lois de la chimie. C'est leur succession qui constitue un défi à la raison, tant elle paraît improbable.

Les uns en tirent une conclusion simple. A la loterie de la chimie, la Terre est seule à avoir gagné un gros lot aussi inaccessible. Aucun autre billet n'était gagnant, si bien que, dans l'univers, les planètes similaires à la Terre sont désespérément désertes. Même si l'on y trouve les conditions nécessaires à l'émergence de la vie, aucune algue ne flotte dans des eaux dépourvues de poissons. Aucun animal ne se déplace sur les roches humides qui en émergent, nul brin d'herbe ne pousse sur les vastes plaines battues par le vent. Quelle que soit la saison qui s'annonce, aucun oiseau n'en annonce l'arrivée: la nature ne fête jamais le retour du printemps. Seul le sifflement du vent et le bruit monotone du ressac font écho au grondement du tonnerre et à l'écoulement de la lave. Ceux qui défendent ce point de vue vont plus loin. Pour eux, l'apparition de la vie a été suivie d'un événement tout aussi improbable, l'apparition de l'homme au sommet de la *hiérarchie biologique*, une qualification qu'ils récusent d'ailleurs au nom du «politiquement correct» appliqué à l'organisation du monde vivant.

L'attitude opposée est souvent défendue par les astronomes, les physiciens ou les chimistes. L'argumentation avancée diffère d'un individu à l'autre, mais la conviction est souvent la même que celle qu'affiche de Duve: l'apparition de la vie était si peu probable qu'elle doit son existence à une règle que nous ignorons. C'est ce que pense Miller: «Même si une part de hasard est intervenue dans le processus, l'apparition de la vie était certainement inévitable.» [161] De Duve est un spécialiste de la biochimie de la cellule et Miller a consacré une grande partie de son activité à la chimie prébiotique. Mais ils parlent sans doute au nom de leurs convictions intimes plutôt que de leur expérience: personne ne peut se vanter de connaître le chemin menant des acides aminés à la cellule procaryote. Les physiciens et les astronomes en savent encore moins dans ce domaine, ce qui les incite à adopter la croyance en une vie extraterrestre: ils transposent la vision qu'ils ont de leur propre domaine de recherche à celui de la chimie prébiotique. Pour peu que nos observations des exoplanètes au bénéfice de conditions similaires à celles que l'on rencontre sur Terre, disent-ils, nous avons d'importantes chances d'y découvrir une forme de vie.

Dans les premières années du XXI^e siècle, la vie extraterrestre ne repose pas sur des arguments scientifiques. Elle relève du domaine de la croyance.

Sortir du dilemme

Pour les enfants des Lumières, la Lune était inaccessible et l'idée que l'on foulerait un jour son sol devait paraître absurde. Or l'être humain y est

¹² Voir ci-dessous.

parvenu en 1969: il ne faut jamais dire jamais. Passer des molécules prébiotiques à une cellule procaryote semble être un exploit tout aussi incroyable. Pour tous ceux qui rejettent le *créationnisme* de Usher et de ses successeurs (aujourd'hui encore, ils sont nombreux et actifs aux Etats-Unis), cette évolution a pourtant eu lieu. Les lois de la nature ont créé LUCA.

Les lois fondamentales de la physique ne contiennent rien qui puisse suggérer l'émergence de la vie, même si biologie, chimie et physique ne sont jamais en contradiction. La vie, sans doute, n'aurait pu apparaître si les lois avaient été différentes (chap. 6), mais personne n'est jamais parvenu à mettre le doigt sur une loi qui, à l'exclusion des autres, conduirait à la vie. Elle n'existe certainement pas. En contrepartie, recourir au seul hasard, en affirmant qu'il est capable de grandes choses si on lui en donne le temps, est parfaitement trompeur: nous sommes incapables d'apprécier à quel point l'émergence de la cellule procaryote était improbable. Quand on évalue la probabilité que se produise un événement extraordinaire, on s'aperçoit qu'il suffit de peu de chose pour que la probabilité envisagée augmente ou diminue d'un facteur dix, cent ou un million. Un exemple simple peut l'illustrer.

Le bridge se joue à quatre; lors d'une donne, chaque joueur reçoit une *main* de 13 cartes, chacune d'elles étant tirée d'un jeu de 52 cartes où les quatre couleurs – piques, cœurs, carreaux et trèfles – sont également représentées. Ceci posé, on peut aisément calculer que, une fois sur 28 *en moyenne*, une main comporte exactement 7 cartes de la même couleur. Le passage de 7 à 9 fait tomber la fréquence d'apparition à 1/2700, puis à moins de un sur 2 millions quand il s'agit d'une suite unicolore de 11 cartes. Finalement, les mains ne sont jamais complètement unicolores: un pareil événement n'a qu'une chance sur cent soixante milliards de se réaliser. Toutes ces évaluations ne sont d'ailleurs valables que si le paquet de cartes est battu avec soin avant chaque donne, ce qui n'est généralement pas le cas quand l'opération se fait manuellement.

L'exemple du bridge est parlant: la probabilité est une qualité très sensible aux conditions de l'expérience. On tremble rétrospectivement en réalisant que, si la probabilité de l'élaboration d'une cellule procaryote avait été divisée par cent, les bactéries auraient pu ne voir le jour qu'au moment de l'agonie de notre planète, alors en passe de rôtir sous un Soleil devenu monstrueux, une géante rouge (chap. 6). C'en aurait été fait de leur évolution et nous ne serions pas là pour en parler.

Qu'apporte la probable existence de LUCA au débat? Une chose, au moins, l'éventuelle incarnation de l'être vivant autonome le plus simple. Les bactéries ont magnifiquement réussi. Elles ont colonisé les milieux les plus divers et les plus hostiles. Elles existent depuis trois milliards d'années au moins. Si une ébauche plus simple que les bactéries avait pu subsister de manière autonome, pourquoi ne serait-elle plus là pour nous le prouver? Si elle n'a pas pu arriver jusqu'à nous, comment aurait-elle pu subsister jusqu'à céder sa place à LUCA? Nous avançons dans l'obscurité.

Nous pouvons supposer que, depuis le moment où les conditions sont devenues favorables, les molécules prébiotiques se sont combinées les unes avec les autres. Peu à peu, au cours des millions d'années, elles ont formé des ébauches d'organismes nantis d'une sorte de reproduction primitive. Soumis

à un embryon de sélection naturelle, ces embryons d'êtres vivants se sont progressivement perfectionnés et ont fini par donner naissance à LUCA. Cette hypothèse reste très vague. Elle a l'avantage de constituer une évolution avant la lettre. Elle présente cependant un défaut majeur, mis en évidence par un groupe de chimistes, biochimistes et physiciens dirigé par le chimiste allemand Manfred Eigen, né en 1927, prix Nobel de chimie 1967.

Le groupe Eigen s'est efforcé de réaliser une évolution expérimentale en éprouvette. Il s'agissait d'étudier le comportement de nombreux fragments d'ADN extraits de leur cellule mère, mais plongés dans un milieu contenant d'autres molécules organiques prébiotiques. Le choix des fragments d'ADN en tant que molécules prébiotiques test était naturel si l'on voulait étudier la reproduction en milieu protégé, puisque c'est précisément l'ADN qui endosse cette responsabilité dans la cellule vivante¹³. Les expériences ont apporté deux informations importantes. La première est très positive: la sélection naturelle agit aussi bien sur des molécules prébiotiques que sur les organismes vivants. Il n'y a rien d'étonnant à cela: la sélection naturelle n'est que l'application des lois de la statistique à l'évolution biologique. La seconde conclusion met en évidence une difficulté essentielle de la chimie prébiotique. Lors de la reproduction de l'ADN, des «erreurs de copie» se produisent inévitablement [162]. Ces coquilles biologiques se retrouvent chez tous les êtres vivants et sont à l'origine des maladies héréditaires comme l'hémophilie. Le patrimoine génétique du patient conserve les traces d'une erreur produite lors de sa conception ou présente dans celui de certains de ses ascendants. Mais en chimie prébiotique, ces coquilles sont encore plus délétères: une ébauche d'organisme est beaucoup plus fragile car, contrairement aux organismes supérieurs qui ont mis au point des systèmes de réparation des erreurs de copie, elle en est nécessairement dépourvue, au début de son évolution tout au moins. On ne peut que se répéter. Dans l'histoire de la vie, le premier pas était le plus ardu. Nous ne savons pas comment il a été franchi. Peut-être que le temps qu'il a fallu attendre LUCA a été suffisamment long, peut-être que le passage aux procaryotes s'est effectué malgré les obstacles accumulés sur leur chemin. Mais nous pouvons aussi penser qu'il manque une pièce à notre puzzle.

Cette pièce, c'est peut-être un second Hoyle qui la trouvera. Qui sait? Il démontrera que le chemin conduisant des molécules prébiotiques à LUCA n'est pas aussi aléatoire que nous le croyons. On s'en souvient, Hoyle a découvert un passage obligé qui, dans les étoiles, conduit de l'hydrogène au carbone (chap. 6). Convaincu que ce chemin devait exister, il l'a trouvé parmi la foule des réactions nucléaires. Ce chemin n'est pas le résultat de l'application directe d'une loi générale, mais une conséquence obscure des valeurs numériques des constantes physiques. Or les réactions chimiques sont beau-

¹³ Dans les expériences mentionnées, l'ADN était remplacé par l'*acide ribonucléique* ARN, une molécule que l'on trouve aussi dans la cellule vivante et qui partage de nombreuses propriétés avec l'ADN, notamment la capacité de se reproduire. Cette substitution ne modifie en rien les conclusions que l'on peut tirer de ces tests. L'ARN a d'ailleurs des propriétés similaires à celles des enzymes, si bien qu'on le soupçonne d'avoir joué un rôle privilégié à l'aube de la vie.

coup plus nombreuses et plus complexes que les réactions nucléaires. Rien n'empêche de rêver: il n'est pas exclu que la jungle des innombrables molécules organiques dissimule un cheminement relativement aisé vers la vie, un sentier au long duquel le hasard jouerait un rôle plus effacé qu'on ne l'imagine. Si c'est le cas, la vie garderait en réserve un secret. Saurons-nous le percer?

Peut-être en serons-nous capables un jour grâce à la chimie prébiotique. Peut-être les planètes extrasolaires nous mettront-elles sur la voie. Peut-être la réponse nous attend-elle là-bas, autour d'un autre Soleil... Comme Moïse sur le mont Nébo, nous devons sans doute nous contenter de contempler à distance les Terres promises sans pouvoir y entrer. Nos descendants y parviendront-ils?

Annexe 1

LA NOTATION EXPONENTIELLE

Nombres ronds

Notation usuelle	Notation exponentielle	Nomenclature	Préfixe utilisé
1	1	un, unité	
10	10 (ou 10 ¹)	dix	déca
1 000	10 ³	mille	kilo
1 000 000	10 ⁶	un million	méga
1 000 000 000	10 ⁹	un milliard	giga
1 000 000 000 000	10 ¹²	mille milliards (un billion)	téra
1 000 000 000 000 000 000	10 ¹⁸	un milliard de milliards (un trillion)	exa
1 suivi de n zéros	10 ⁿ		
0,1	10 ⁻¹	un dixième	déci
0,001	10 ⁻³	un millième	milli
0,000 001	10 ⁻⁶	un millionième	micro
0, 000 000 001	10 ⁻⁹	un milliardième	nano
0, 000 000 000 001	10 ⁻¹²	(un billionième)	pico
0, 000 000 000 000 000 001	10 ⁻¹⁸	(un trillionième)	atto
0,000.....01 (le 1 occupe le n ^{ième} rang après la virgule)	10 ⁻ⁿ		

Nombres quelconques

46 733	4,6733·10 ⁴
0,00135	1,35·10 ⁻³

Règles de calcul

Quand on fait le produit de deux puissances de dix, les exposants s'additionnent: **Un milliard** (10⁹) **vaut mille** (10³) **millions** (10⁶) s'exprime simplement en notation exponentielle:

$$10^9 = 10^3 \cdot 10^6$$

Annexe 2

LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Z E Élément	La construction du tableau tient compte des propriétés chimiques. Les éléments regroupés dans une même colonne ont des propriétés analogues: à titre d'exemple, les nombres atomiques 2, 10, 18, 36, 54 et 86 correspondent aux gaz rares ou inertes alors que 3, 11, 19, 37, 55, et 87 désignent les métaux alcalins. Les métaux précieux, le cuivre, l'argent et l'or sont également superposés dans ce tableau. Cette parenté entre éléments, qualifiée de «périodicité» lors de sa découverte, ne peut être mise en évidence que si l'on accepte de renoncer à une certaine simplicité géométrique du tableau.
	Z = nombre atomique E = symbole de l'élément

1 H Hydrogène											2 He Hélium
3 Li Lithium	4 Be Béryllium		5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Néon			
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium		13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon			
19 K Potassium	20 Ca Calcium	[21-30]	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton			
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	[39-48]	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon			
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	[57-80]	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astate	86 Rn Radon			
87 Fr Francium	88 Ra Radium	[89-?]									

21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc
39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium

57 La Lanthane	[58-71]	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	
89 Ac Actinium	[90-103]	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium				

58 Ce Cérium	59 Pr Praséodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhéum	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium
90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendélévium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gould Stephen J., *Une visite à Dayton in Quand les poules auront des dents*, Seuil (1991).
- [2] Gould Stephen J., *La chute de la maison Ussher in Comme les huit doigts de la main*, Seuil (1996).
- [3] Barr James, *Why the World was created in 4004 B.C.: Archbishop Ussher and Biblical Chronology*, conférence donnée à l'Université de Manchester le 2.5.1984.
- [4] Hoefel Ferdinand, *Histoire de l'astronomie*, Hachette (1873).
- [5] Lefort Jean, *La saga des calendriers*, Bibliothèque Pour La Science (1998).
- [6] Richet Pascal, *L'âge du monde*, Seuil (1999).
- [7] Buffetaut Eric, *Cuvier, le découvreur de mondes disparus*, Les génies de la science, Pour la Science (novembre 2000).
- [8] *Dictionnaire historique de la langue française*, Dictionnaires Le Robert (2000).
- [9] Buffetaut Eric, *Histoire de la paléontologie*, Que sais-je? PUF (1998).
- [10] Bourdier Franck, *Georges Cuvier*, in *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulson Gillispie (ed.), Charles Scribner's Sons (1981).
- [11] Lyell Charles, *Principle of Geology, Being an Attempt to explain the former Changes of the Earth's Surface by Reference to Causes Now in Operation*, John Murray, London (1830-1833).
- [12] Gould Stephen J., *Aux racines du temps*, Grasset (1990).
- [13] Darwin Charles, *Darwin. L'autobiographie*, Belin (1985).
- [14] Darwin Charles, *The structure and distribution of Coral Reefs*, Smith, Elder (1842).
- [15] Darwin Charles, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, John Murray (1859). Traduction française: *L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature*, Maspero (1980).
- [16] Dawkins Richard, *L'horloger aveugle*, Robert Laffont (1989).
- [17] McLaren Digby J., *Impacts and Extinctions: Science or Dogma? in Mass-Extinction Debates: How Science Works in a Crisis*, W. Glen edit., Stanford University Press (1994).
- [18] Barrow John D., Tipler Frank J., *The Anthropic Cosmological Principle*, Clarendon Press (1986).
- [19] Lord Kelvin (William Thomson), *The «Doctrine of Uniformity» in Geology Briefly Refuted*, communication à la Royal Society of Edinburg

- (18 décembre 1865). Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, **5**, 512 (1866).
- [20] Gould Stephen J., *Prémises boiteuses, science de qualité*, in *Le sourire du flamand rose*, Seuil (1988).
- [21] Lord Kelvin (William Thomson), *On the Secular Cooling of the Earth*, Phil. Mag. (S.4) **25**,1 (1863)
- [22] Giroud Françoise, *Une femme honorable*, Fayard (1981).
- [23] Weinberg Steven, *Le monde des particules. De l'électron aux quarks*, Pour la Science, Belin (1990).
- [24] Rostand Edmond, *Cyrano de Bergerac*, acte I, scène II.
- [25] Téry Gustave, *Le Temps*, 23 novembre 1911.
- [26] Hurwic Anna, *Pierre Curie*, Flammarion (1995).
- [27] McGrayne Sharon Bertsch, *Nobel Prize Women in Science*, Birch Lane (1993).
- [28] Fröman Nanny, *Marie et Pierre Curie and the Discovery of Polonium and Radium*, conférence présentée le 28 février 1966 devant l'Académie Royale des Sciences de Suède de Stockholm.
- [29] Pais Abraham, *Inward Bound*, Clarendon Press Oxford (1986).
- [30] Curie Pierre, in H. Becquerel et P. Curie, *Comptes Rendus* **132**, 1289 (1901).
- [31] Jacobs D. J., *Contemporary Physics* **43**, 405 (2002).
- [32] Koestler Alfred, *Les somnambules*, Calman-Lévy (1960).
- [33] Rutherford Ernest, *Radium – the Cause of the Earth's Heat*, Harpers Magazine, 390 (1905).
- [34] Urbain Georges, Boll Marcel, *La Science, ses progrès, ses applications*, Tome I, Larousse (1933).
- [35] Badash Lawrence, *Ernest Rutherford* in *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulson Gillispie (ed.), Charles Scribner's Sons (1981).
- [36] Rutherford E., Soddy F., *The Cause and Nature of Radioactivity*, Philosophical Magazine S.6, **4**, 561 (1903); *ibid.* p. 576.
- [37] *Les Terres célestes*, Dossier Pour La Science (1999).
- [38] Brahic André, *Enfants du Soleil*, Odile Jacob (1999).
- [39] Ward Peter D., Brownlee Donald, *Rare Earth. Why Complex Life is so Uncommon in the Universe*, Copernicus, Springer Verlag (2000).
- [40] Pais Abraham, «Subtle is the Lord...». *The Science and the Life of Albert Einstein*, Clarendon Press (1982).
- [41] Einstein Albert, *The World as I see it*, Philosophical Library (1934) [cité par Kenneth Brecher, *Nature* **278**, 215, 15 mars 1979].
- [42] Einstein Albert, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik*, 4. Folge, **17**, 132 (1905).
- [43] Diu Bernard, *Traité de physique à l'usage des profanes*, Odile Jacob (2000).
- [44] Einstein Albert, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* *Annalen der Physik*, 4. Folge, **18**, 639 (1905).
- [45] Merleau-Ponty Jacques, *Einstein*, Flammarion (1993).
- [46] Einstein Albert, *Pensées intimes*, Editions du Rocher (2000).

- [47] Einstein Albert, *Esquisse autobiographique*, in *Albert Einstein. Œuvres Choiesies*, Editions du Seuil – CNRS (1989).
- [48] Geiger H., Marsden E., Proc. Roy. Soc. A **82**, 495 (1909).
- [49] Rutherford E., *The Scattering of alpha and beta Particles by Matter and the Structure of the Atom*, Philosophical Magazine Series 6, **21**, 669 (1911).
- [50] Halliday Alex N., *Radioactivity, the discovery of time and the earliest history of the Earth*, Contemporary Physics **38**, 103 (1997).
- [51] Khriplovich Iosif, *The Eventful Life of Fritz Houtermans*, Physics Today **45**, 29 (juillet 1992).
- [52] von Buttler Haro, *Leonium und andere Anekdoten um den Physikprofessor Dr. F.G. Houtermans*, H. v. Buttler Herausgeber, Bochum (1982).
- [53] Houtermans Friedrich G., Zeitschrift für Naturforschung **2a**, 322 (1947).
- [54] Dalrymple G. Brent, *The Age of the Earth*, Stanford University Press (1991).
- [55] Levasseur-Regourd A.-Chantal, de la Cotardièrre Philippe, *Les comètes et les astéroïdes*, Seuil (1997).
- [56] Ronsard Pierre de, *Je vous envoie un bouquet de ma main*, Les Amours.
- [57] Davies Paul, *The Fifth Miracle – The Search for the Origin of the Life*, Allen Lane, The Penguin Press (1998).
- [58] Reeves Hubert, *Dernières nouvelles du cosmos*, Seuil (2002).
- [59] McCrea W. H., *Recollections of Sir Arthur Eddington...*, *Contemp. Phys.* **6**, 531 (1982).
- [60] Weinberg Steven, *Les trois premières minutes de l'univers*, Seuil (1978).
- [61] Wigner Eugene P., *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences*, Communications of Pure and Applied Mathematics **13**, 1 (1960).
- [62] Novikov Igor, Sharov Alexander, *Hubble, l'inventeur du Big Bang*, Flammarion (1995).
- [63] Whitrow G. J., *Edwin Powell Hubble in Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulson Gillispie (ed.), Charles Scribner's Sons (1981).
- [64] Gott Richard et al., *L'expansion de l'univers in L'univers: des faits aux théories*, Bibliothèque Pour la Science (1988).
- [65] Gamow George, *My World Line*, The Viking Press (1970).
- [66] Hugo Victor, *Sonnez, sonnez toujours, clairons de la pensée*, Les Châtiments, Livre VII.
- [67] Racine Jean, *Les Plaideurs*, acte III, scène 3.
- [68] Alpher Ralph, Herman Robert, *Reflections on early work on «Big Bang» cosmology*, Physics Today **41**, 24 (1988).
- [69] Alpher R. A., Bethe H., Gamov G., *The Origin of Chemical Elements*, Physical Review **73**, 803 (1948).
- [70] Alpher R., Herman R., Nature **162**, 774 (1948).
- [71] Pello R. et al., *ISAAC/VLT observations of a lensed galaxy at z=10.0*, Astronomy and Astrophysics **416**, L35 (2004).

- [72] Perlemutter Saul, *Physics Today* **56**, 53, Avril 2003; Michael S. Turner, *ibid.* p. 10.
- [73] Baruch Jacques-Olivier, *La Recherche* **361**, 34 (février 2003).
- [74] Prunet Simon, Bouchet François, *Pour la Science* **308**, 44, juin 2003.
- [75] Maeder A., *La structure, l'énergie et l'évolution des étoiles* in *Histoire de l'Univers*, A. Hayli édit., Hachette (1980).
- [76] Atkinson R., F. G. Houtermans, *Z. Phys.* **54**, 656 (1929).
- [77] Salpeter Edwin, *A Generalist Looks Back*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40**, 1 (2002).
- [78] Salpeter Edwin, *The Astrophysical Journal* **115**, 326 (1952)
- [79] Maddox John, *Nature* **413**, 270 (20 septembre 2001).
- [80] Witkowski Nicolas, *La Recherche* **347**, 48 (novembre 2001).
- [81] Hoyle Fred, *Home Is Where the Wind Blows*, University Science Books (1994).
- [82] Hoyle Fred, *Two decades of collaboration with Willy Fowler*, in *Essays in Nuclear Astrophysics*, Cambridge University Press (1982).
- [83] Burbidge E. Margaret, Burbidge G. R., Fowler William, Hoyle F., *Synthesis of Elements in the Stars, (Review of Modern Physics)* **29**, 547 (1957).
- [84] Hoyle Fred, *Religion and the Scientist*, SCM London (1959).
- [85] Barrow John D., *From Alpha to Omega, The Constants of Nature*, Vintage (2002).
- [86] *Le Robert. Dictionnaire historique de la langue française* (2000).
- [87] Davies Paul, *The Fifth Miracle – The Search for the Origin of the Life*, Allen Lane, The Penguin Press (1998).
- [88] Arouet François Marie dit Voltaire, *Candide* (1755).
- [89] Gould Stephen Jay, *L'éventail du vivant*, Seuil (1997).
- [90] de Laplace Pierre-Simon, *Théorie analytique des probabilités*, (1818).
- [91] Leibniz Gottfried Wilhelm von, *La monadologie* (1714).
- [92] Arouet François Marie dit Voltaire, *Les Cabales* (1772).
- [93] Ekeland Ivar, *Le meilleur des mondes possibles*, Seuil (2000).
- [94] de Duve Christian, *The Beginnings of Life on Earth*, *American Scientist* **83**, 438 (septembre-octobre 1995).
- [95] Mauriac François, *Mes grands hommes*, Editions du Rocher (1983).
- [96] Shakespeare William, *Hamlet*, acte I, scène 1.
- [97] Corneille Pierre, *Le Cid*, acte IV, scène 3.
- [98] Hewish Antony, Nobel Lecture, 12 décembre 1974.
- [99] Hewish A. W., Bell S. J., Pilkington J. D. H., Scott P. E., Collins R. A., *Nature* **217**, 709 (24.2.1968).
- [100] Landau Lew D., *On the theory of stars*, *Phys. Z. Sowjet.* **1**, 285 (1932).
- [101] Wade Nicholas, *Science* **189**, 358 (1975).
- [102] Shapiro Gilbert, *A Skeleton in the Dark Room*, Harper & Row (1986).
- [103] de Gaulle Charles, *Mémoires de guerre*, Plon (1954-59).
- [104] de Pracontal Michel, *L'imposture scientifique en dix leçons*, La Découverte (2001).
- [105] Burnell S. Jocelyn, *Broken for Life*, Quaker Home Service (1989).
- [106] Buffetaut Eric, *La fin des dinosaures*, Fayard (2003).
- [107] Alvarez Luis W., *Using cosmic Rays in the Search for Hidden Chambers in the Pyramids*, in *Discovering Alvarez*, W. P. Trower édit., The University of Chicago Press (1987).

- [108] Alvarez Luis W. et al. *Search for Hidden Chambers in the Pyramids*, Science **167**, 832 (1970).
- [109] Alvarez Luis W., *A physicist examines the Kennedy assassination film*, American Journal of Physics **44**, 813 (1976).
- [110] Alvarez Walter, *La fin tragique des dinosaures*, Hachette Sciences (1998).
- [111] Alvarez Luis W., *Mass extinctions caused by large bolide impacts*, Phys. Today **40**, 24 (juillet 1987).
- [112] Mayor Michel, Frei Pierre-Yves, *Les nouveaux mondes du cosmos: A la découverte des exoplanètes*, Seuil (2001).
- [113] Roten Claude-Alain, *L'étude cosmique des bactéries*, in *Sur les traces du vivant de la Terre aux étoiles*, Raulin-Cerceau Florence et al. édité., Le Pommier (2002).
- [114] Alvarez Luis W., Walter Alvarez, Frank Asaro and Helen V. Michel, *Extraterrestrial Cause for the Cretaceous – Tertiary Extinction*, Science **208**, 1095 (1980).
- [115] Hildebrand A. R. et al., *Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico*, Geology **19**, 867 (1991).
- [116] Kring David, Durda Daniel, *Le jour où la Terre brûla*, Pour la Science **315**, 56 (janvier 2004).
- [117] Courtillot Vincent, *La vie en catastrophes*, Fayard (1995).
- [118] Frankel Charles, *La mort des dinosaures, l'hypothèse cosmique*, Masson (1999).
- [119] Rocchia Robert, *Naissance d'une théorie. D'une anomalie en iridium à la catastrophe cosmique*, La Recherche **293**, 53 (décembre 1996).
- [120] Becker Luann, *Sur la trace des impacts cataclysmiques*, Pour la Science **295**, 62 (mai 2002).
- [121] Glen William, *How Science works in the Debates in Mass-Extinction Debates: How Science Works in a Crisis*, W. Glen edit., Stanford University Press (1994).
- [122] Adatte T., Keller G., Stinnesbeck W., *Un autre scénario pour la crise Crétacé – Tertiaire*, Pour la Science **315**, 62 (janvier 2004).
- [123] Grosser Morton, *The Discovery of Neptune*, Harvard University Press (1968).
- [124] Westfall Richard, *Newton*, Flammarion (1994).
- [125] La Fontaine Jean de, *Les animaux malades de la peste*.
- [126] *Keynes Collection*, King's College, Cambridge.
- [127] Keesing R. G., *The History of Newton's apple tree*, Contemporary Physics, **39**, 377 (1998).
- [128] Rupert Hall A., *Isaac Newton: Adventurer in Thought*, Blackwell (1992).
- [129] Chandrasekhar Subrahmanyan, *Newton's Principia for the Common Reader*, Clarendon Press (1995).
- [130] Guicciardini Niccolò, *Newton, l'horloger du monde*, Les génies de la science, Pour la Science (Novembre 2003).
- [131] Verlet Loup, *La malle de Newton*, Gallimard (1993).
- [132] Keynes John Maynard, *Newton the Man*, in *Newton Tercentenary Celebrations, July 1946*, Cambridge University Press (1947).
- [133] Panza Marco, *Newton*, Les Belles Lettres (2003)

- [134] Keynes Milo, *The Personality of Newton*, Notes Rec. R. Soc. London **49** (1), 1 (1995).
- [135] Gleick James, *Isaac Newton*, Fourth Estate (2003).
- [136] Newton Isaac, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* [trad. de l'anglais par feu Madame la Marquise du Chastellet], J. Gabay (1990).
- [137] Speiser D., *Newton's Principia*, Contemp. Phys. **24**, 143 (1983).
- [138] Weinstock R., *Newton's Principia and Inverse-Square Orbits*, Contemp. Phys. **24**, 623 (1983).
- [139] Arnold V. I., *Huygens and Barrow, Newton and Hooke*, Birkhäuser Verlag (1990).
- [140] Pope Alexander, *On Isaac Newton*.
- [141] Lévy Jacques, *Urbain Jean Joseph Le Verrier*, in *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulson Gillispie (ed.), Charles Scribner's Sons (1981).
- [142] Smart W. M., *John Couch Adams and the Discovery of Neptune*, Occasional Notes of the Royal Astronomical Society **11** (August 1947).
- [143] North Pierre, *Orion* **264**, 235 (1994).
- [144] Croswell Ken, *Planet Quest*, Oxford University Press (1999).
- [145] Tombaugh Clyde W. et Moore Patrick, *Out of the Darkness: The Planet Pluto* Stackpole Books (1980).
- [146] Romain Jean, *Une journée chez Epicure*, Brepols (1996).
- [147] Fricke Walter, *Friedrich Wilhelm Bessel*, in *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulson Gillispie (ed.), Charles Scribner's Sons (1981).
- [148] Basri Gibor B., *What is a «Planet»*, in *Mercury* (novembre-décembre 2003).
- [149] Mayor Michel, Queloz Didier, *Nature* **378**, 355 (novembre 1995).
- [150] *Extrasolar Planets Encyclopedia*, <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>
- [151] Charbonneau D. et al., *Detection of planetary transits across a Sun-like star*, *Astrophysical J.* **529**, L45 (2000).
- [152] Perryman M. A. C., *Extrasolar Planets*, *Rep. Prog. Phys.* **63**, 1209 (2000).
- [153] Baumard Nicolas, *La vie sur Europe est-elle possible? L'Astronomie* **115** (novembre-décembre 2001).
- [154] Casti John L., *Paradigms Lost*, Avon Books (1989).
- [155] Prantzos Nicolas, *Voyage interstellaire et paradoxe de Fermi*, in *Sur les traces du Vivant*, Florence Raulin-Cerceau (et al.) édit., Le Pommier (2002).
- [156] Alberts B. et al. *Molecular Biology of the Cell*, Garland, 3^e édition (1994).
- [157] Descotes Dominique, *Pascal*, *Les génies de la science*, Pour la Science (août 2003).
- [158] Freeland Stephen, Hurst Laurence, *Evolution codée*, Pour la Science (mai 2004).
- [159] Prum R., Brush A., *Les plumes de dinosaures*, Pour la Science (mars 2003).
- [160] Simpson Sarah, *Premières traces de vie*, Pour la Science (juin 2003).

- [161] Miller Stanley, *L'apparition de la vie était inévitable*, propos recueillis par Luc Allemand, *La Recherche* **369**, 64 (novembre 2003).
- [162] Eigen Manfred, Ruthild Winkler-Oswatitsch, *Steps towards Life*, Oxford University Press (1992).

INDEX DES NOMS PROPRES

- Adams John Couch, 229
Airy George Biddle, 230
Alpher Ralph, 128
Alvarez Luis, 186
Alvarez Walter, 185
Arago François, 232
Aristarque de Samos, 49
Aristote, 157, 244
Arrest Heinrich Louis d', 234
Arrhénius Svante, 43
Asaro Frank, 194
Atkinson Robert, 137
- Baade Walter, 174
Baranne André, 255
Bardeen John, 40
Barlow Nora, 19
Barringer Daniel Moreau, 101
Barrow Isaac, 217
Barton Catherine, 219
Becquerel Antoine, 28
Becquerel Edmond, 28
Becquerel Henri, 28
Bell Jocelyn, 164
Bémont Gustave, 35
Bessel Friedrich Wilhelm, 244
Bethe Hans, 128
Biot Jean-Baptiste, 100
Bode Johann Elert, 211
Boltwood Bertram, 78
Bondi Hermann, 147
Borel Emile, 40
Brahe Tycho, 175
Branly Edouard, 39
Brongniart Alexandre, 12
Buffetaut Eric, 184
Bürki Gilbert, 255
- Burney Venetia, 238
Butler Paul, 254
Buys-Ballot Christophorus, 118
- César Jules, 8
Chadwick James, 86
Challis James, 230
Chandrasekhar Subrahmanyam, 219, 249
Conduitt John, 219
Connally Harold, 187
Copernic Nicolas, 49, 209, 244, 247
Curie Eve, 37
Curie (Joliot-) Irène, 37, 84
Curie (-Sklodowska) Marie, 33, 48
Curie Pierre, 33
Cuvier Georges, 11
- da Pisa Leonardo, 240
Dalton John, 164
Darwin Charles, 15, 157
Darwin Erasmus, 17
Davies Paul, 156
Dawkins Richard, 20
Debieerne André, 35
Denys le Petit, 3
Descartes René, 215
Doppler Johann Christiaan, 116
Duillier Nicolas Fatio de, 224
Duquennoy Antoine, 255
Duve Christian de, 272
- Eddington Arthur, 107, 134, 164
Eigen Manfred, 275
Einstein Albert, 62, 109, 160, 235
Elster Julius, 49
Epicure, 243

- Fermi Enrico, 263
 Fourier Jean-Baptiste Joseph, 23
 Fowler Ralph, 126
 Fowler William, 144
 Fox Georges, 164
 Frail Dale, 251
 Franck James, 97
 Friedmann Alexander, 112
- Gabrielle-Emilie, marquise du
 Châtelet, 226
 Galilée (Galileo Galilei), 66, 104,
 170, 219
 Galle Johann Gottfried, 234
 Gamov Georges, 122, 137
 Gauss Carl Friedrich, 41, 213
 Gay-Lussac Joseph Louis, 231
 Geiger Hans Wilhelm, 79
 Geitel Hans, 49
 Germain Sophie, 41
 Gilbert William, 220
 Giordano Bruno, 243
 Giroud Françoise, 36
 Glen William, 207
 Gold Thomas, 147, 178
 Gosta Mittag-Leffler, 42
 Gould Stephen Jay, 1, 158
 Grégoire XIII, 8
 Guillaume Charles-Edouard, 178
- Halley Edmund, 225
 Hawking Stephen, 223
 Hegel Georg Wilhelm Friedrich, 213
 Henslow John Stevens, 16
 Herman Robert, 128
 Hérodote, 10
 Herschel William, 210
 Hertz Heinrich, 66
 Hertzprung Ejnar, 108
 Hewish Anthony, 164
 Holmes Arthur, 78
 Hooke Robert, 225
 Houtermans Friedrich Georg (Fritz),
 96, 122, 137
 Hoyle Fred, 147, 178, 206
 Hubble Edwin, 119
 Hypatie d'Alexandrie, 41
- Jean-Paul II, 20
 Joliot Frédéric, 84
 Joliot-Curie Irène, 84
- Kant Immanuel, 113, 211
 Kapitsa Pyotr, 122, 173
 Kelvin (William Thomson, lord), 21,
 135
 Kennedy John, 187
 Kepler Johannes, 49, 175, 210, 219,
 247
 Keynes John Maynard, 223
 Kircher Athanase, 11
 Koppernigk (Copernic) Nicolas, 49,
 209, 244, 247
 Kovalevskajaïa Sofia, 41
- Laborde Albert, 51
 Lamarck Jean-Baptiste de Monet,
 chevalier de, 17
 Landau Lev Davidovitch, 173
 Langevin Paul, 39
 Laplace Pierre-Simon de, 159, 232
 Latham David, 255
 Le Verrier Urbain Jean Joseph, 231
 Leibniz Gottfried Wilhelm von, 160,
 218
 Lifchitz Evgeni, 173
 Lister Joseph, 164
 Lowell Percival, 237
 Lucas Henry, 223
 Lyell Charles, 13
- Marcy Geoffrey, 254
 Marsden Ernest, 79
 Maxwell James Clerk, 65
 Mayor Michel, 254
 McGrayne Sharon, 42
 Mendel Gregor, 18
 Michel Helen, 194
 Milikan Robert, 174
 Miller Stanley, 265
 Mittlefehldt David, 105
- Newton Isaac, 109, 216, 247
- Ockham Guillaume d', 48

- Olbers Heinrich Wilhelm, 214, 244
Oswald Lee Harvey, 187
- Paley William, 20, 157
Patterson Clair, 101
Penfield G., 200
Penzias Arno, 129
Perrin Jean, 64
Piazzi Giuseppe, 213
Pie XII, 20
Poincaré Henri, 42
- Queloz Didier, 254
- Roentgen Wilhelm Konrad, 29
Ruby Jack, 187
Rutherford of Nelson (Ernest, lord),
35, 51, 77, 79, 125
Ryle Martin, 176
- Salpeter Edwin, 143
Sklodowska Curie Marie, 33
Scopes John Thomas, 1
Score Roberta, 105
Soddy Frederick, 54, 87
Sosigène, 8
Szilard Leo, 76
- Thomson William, lord Kelvin, 21
Titius Johann Daniel, 211
Tombaugh Clyde, 238
Turing Alan, 219
- Urey Harold, 265
Ussher James, 2
- Villard Paul, 36
Voltaire, 157
- Wallace Alfred, 17
Walpole Horace, 179
Wedgwood (Darwin-) Emma, 20
Wegener Alfred, 78
Weierstrass Karl, 41
Weinberg Steven, 130
Westfall Richard, 216
Wigner Eugene P., 114
Wilson Robert W., 129
Wolszczan Alexander, 250
Wren Christopher, 225
- Zanoguera A. Camargo, 200
Zapruder Abraham, 187
Zwicky Fritz, 174

