

3. UNE MÉTHODOLOGIE DES PROGRAMMES DE RECHERCHE SCIENTIFIQUES

J'ai parlé du problème de l'évaluation objective du développement des sciences en termes de déplacements progressifs et dégénéralifs de problèmes dans des séries de théories scientifiques. Les séries les plus importantes pour le développement des sciences se caractérisent par une certaine *continuité* qui relie leurs termes, et qui provient d'un authentique programme de recherche ébauché dès le début. Ce programme se compose de règles méthodologiques sur les voies de recherche à éviter (*heuristique négative*) ou à poursuivre (*heuristique positive*)¹.

On peut même considérer la science dans son entier comme un immense programme de recherche qui obéit à la règle heuristique suprême de Popper : « imaginer des conjectures qui aient plus de contenu empirique que les conjectures précédentes ». Des règles méthodologiques de ce genre peuvent être formulées, Popper l'a fait remarquer, sous forme de principes métaphysiques². On peut par exemple énoncer la règle *universelle* anti-conventionnaliste qui interdit les exceptions sous la forme du principe métaphysique : « La nature ne permet pas d'exception ». C'est pour cette raison que Watkins a qualifié ces règles de « métaphysique influente »³.

Pourtant, ce que j'ai avant tout à l'esprit n'est pas la science dans

1. On peut remarquer que l'heuristique, négative et positive, donne une définition approximative (implicite) du « cadre conceptuel » (et par conséquent du langage). À reconnaître que l'histoire des sciences est une histoire de programmes de recherche plutôt que de théories, on peut donc y voir la justification partielle de l'idée que l'histoire des sciences est celle de cadres conceptuels ou de langages scientifiques.

2. Popper [1934], sections 11 et 70. Je me sers du mot « métaphysique » comme d'un terme technique du falsificationnisme naïf : une proposition contingente est « métaphysique » si elle ne possède pas d'indicateurs potentiels de fausseté.

3. Watkins [1958], qui met en garde : « le fossé logique qui sépare énoncés et prescriptions dans le domaine métaphysico-méthodologique est illustré par le fait qu'une personne peut rejeter une doctrine [métaphysique] quand elle a la forme d'énoncé de faits tout en acceptant sa version prescriptive » (p. 356-357).

son ensemble, mais des programmes de recherche *particuliers*, tel celui qu'on connaît sous le nom de « métaphysique cartésienne ». La métaphysique cartésienne, c'est-à-dire la théorie mécaniste selon laquelle l'univers est un immense système d'horlogerie (et un système de tourbillons) avec la poussée comme unique cause de mouvement, a fonctionné comme un puissant principe heuristique. Elle a empêché de s'intéresser à des théories scientifiques qui, comme (la version « essentialiste » de) la théorie newtonienne de l'action à distance, étaient incompatibles avec elle (*heuristique négative*). Elle a d'autre part encouragé les travaux sur des hypothèses auxiliaires qui auraient pu la préserver des éléments de contre-preuve apparents, comme les ellipses de Kepler (*heuristique positive*)¹.

a. Heuristique négative : le « noyau dur » du programme

Tout programme scientifique de recherche peut se caractériser par son « noyau dur ». L'heuristique négative du programme nous empêche de diriger le *modus tollens* contre ce « noyau dur ». Nous devons, au contraire, mettre toute notre ingéniosité à formuler ou même à inventer des « hypothèses auxiliaires » formant un glacis protecteur autour de ce noyau ; c'est contre elles que nous devons réorienter le *modus tollens*, et ce sont elles qui doivent soutenir le choc des mises à l'épreuve et être adaptées, ou même remplacées de fond en comble pour défendre le noyau qu'on rend ainsi plus dur. Un programme de recherche rencontre le succès si tout cela conduit à un déplacement de problème progressif ; si le déplacement est dégénéralif, il ne réussit pas.

L'exemple classique d'un programme de recherche qui a réussi est la théorie de la gravitation de Newton et c'est peut-être, de tous, celui qui a rencontré le plus de succès. Il était, quand Newton le proposa, submergé par un océan d'« anomalies » (ou, si l'on veut, de

1. Sur ce programme de recherche cartésien, cf. Popper [1960b] ; Watkins [1958], p. 350-351.

« contre-exemples »¹, et en contradiction avec les théories d'observation qui sous-tendaient ces anomalies. Mais les partisans de Newton usèrent d'une remarquable ténacité et d'une belle ingéniosité pour transformer l'un après l'autre ces contre-exemples en exemples de corroboration, avant tout en renversant les théories initiales d'observation à la lumière desquelles étaient établis ces « éléments de contre-preuve ». Ce faisant, ils produisirent eux aussi de nouveaux contre-exemples qu'ils surent une fois de plus élucider. « Chaque difficulté qui s'est élevée a été pour [la découverte de Newton] le sujet d'un nouveau triomphe. »²

Dans le programme de Newton, l'heuristique négative nous ordonne de détourner le *modus tollens* de ses trois lois de la dynamique et de sa loi de la gravitation. Ce « noyau » est « irréfutable » par décision méthodologique de ses partisans : les anomalies ne doivent conduire qu'à des changements dans le glaci « protecteur » d'hypothèses « d'observation » auxiliaires et de conditions initiales³.

J'ai donné un micro-exemple fictif de déplacement de problème progressif dans le cadre newtonien⁴. Si nous l'analysons, nous trouvons que chacun des maillons, dans cet exercice, prédit un fait nouveau ; chaque étape représente une augmentation de contenu empirique : l'exemple constitue un déplacement théorique régulièrement progressif. Et chaque prédiction se vérifie à la fin, bien qu'en trois occasions consécutives elles puissent avoir semblé momentanément « réfutées »⁵. Alors qu'on peut vérifier immédiatement le « progrès théorique » (au sens décrit ici)⁶, ce n'est pas le cas pour le « progrès empirique » ; dans un programme de recherche, nous pou-

1. Pour la clarification des concepts de « contre-exemple » et d'« anomalie », cf. ci-dessus, p. 29 s. et tout particulièrement ci-dessous, n. 2, p. 101.

2. Laplace [1824], livre IV, chap. 11.

3. Le véritable noyau dur d'un programme ne sort pas vraiment tout armé comme Athéna de la tête de Zeus. Il se développe lentement, dans un long processus préliminaire d'essais et d'erreurs. Je ne traiterai pas ici de ce processus.

4. Cf. ci-dessus, p. 14 s.

5. La « réfutation » était chaque fois détournée avec succès sur des « lemmes cachés », c'est-à-dire des lemmes provenant pour ainsi dire de la clause *ceteris paribus*.

6. Mais cf. ci-dessus, p. 96 s.

vons nous sentir frustrés par une longue série de « réfutations » avant que des hypothèses auxiliaires ingénieuses et bien choisies, en augmentant le contenu, ne transforment une chaîne de défaites — avec le recul — en une histoire de succès retentissants, soit en corrigeant des « faits » erronés, soit en ajoutant des hypothèses auxiliaires inédites. Nous pouvons alors dire qu'il faut exiger que toute nouvelle étape d'un programme de recherche augmente régulièrement son contenu : chaque étape doit constituer un déplacement de problème théorique régulièrement progressif. Tout ce qu'il nous faut de plus, c'est qu'on considère cette augmentation de contenu, au moins de temps à autre, comme corroborée rétrospectivement : le programme pris comme un tout doit aussi présenter un déplacement empirique progressif par moments. Nous n'exigeons pas que chaque étape produise immédiatement un fait observé qui soit nouveau. Notre expression « par moments » laisse assez de marge rationnelle à l'adhésion dogmatique à un programme confronté à des « réfutations » *prima facie*.

L'idée d'« heuristique négative » d'un programme scientifique de recherche rationalise dans une grande mesure le conventionnalisme classique. Nous pouvons décider rationnellement de ne pas permettre aux « réfutations » de transmettre la fausseté au noyau dur tant que s'accroît le contenu empirique corroboré du glaci protecteur d'hypothèses auxiliaires. Mais notre démarche diffère du conventionnalisme justificationniste de Poincaré en ce sens que, contrairement à lui, nous soutenons que si et quand le programme cesse de prédire des faits inédits, il se pourrait qu'on doive abandonner son noyau dur : c'est dire que notre noyau dur, à la différence de celui de Poincaré, peut s'effondrer dans certaines conditions. En ce sens, nous prenons le parti de Duhem, qui pensait qu'il fallait admettre cette possibilité¹ ; mais la raison de cet effondrement est purement esthétique chez lui², alors que pour nous elle est avant tout logique et empirique.

1. Cf. ci-dessus, p. 22.

2. *Ibid.*

b. *Heuristique positive: la construction du « glacis protecteur » et la relative autonomie des sciences théoriques*

Les programmes de recherche, même ceux dont le progrès est le plus rapide et le plus régulier, ne peuvent digérer que partiellement leurs « éléments de contre-preuve » : les anomalies ne s'épuisent jamais totalement. Mais il ne faudrait pas croire que des anomalies encore inexpliquées — des « énigmes », pourrait dire Kuhn — soient prises dans un ordre dû au hasard et que le glacis protecteur soit construit de façon éctectique, sans ordre préconçu. L'ordre est le plus souvent décidé dans le cabinet du théoricien, indépendamment des anomalies connues. Rares sont les théoriciens engagés dans un programme de recherche qui accordent une attention excessive aux « réfutations » ; leur politique de recherche à long terme s'attend à de telles réfutations. Cette politique, ou cet ordre de la recherche, s'exprime, avec plus ou moins de détails, dans l'heuristique positive du programme de recherche. L'heuristique négative spécifie le « noyau dur » du programme qui est « irréfutable » par la décision méthodologique de ceux qui l'ont proposé ; l'heuristique positive consiste en un ensemble de suggestions ou d'allusions partiellement articulées qui indique comment changer et développer les « variantes réfutables » du programme de recherche, comment modifier et raffiner le glacis protecteur « réfutable ».

L'heuristique positive du programme empêche l'homme de science de se perdre dans un océan d'anomalies. Elle établit un programme qui dresse la liste d'une chaîne de modèles de plus en plus compliqués simulant la réalité : l'homme de science attache toute son attention à construire ses modèles en suivant les instructions qui sont exposées dans la partie positive de son programme. Il ne s'occupe pas des contre-exemples réels, des « données » disponibles¹. Newton éla-

1. Si un homme de science (ou un mathématicien) dispose d'une heuristique positive, il refuse de se laisser entraîner dans l'observation. Il va « s'allonger sur son lit, fermer les yeux et oublier les données ». (Cf. mon texte [1963-1964], notamment p. 300 s., où j'étudie en détails un tel programme.) A l'occasion, bien sûr, ce chercheur posera une question intelligente à la Nature : il sera alors encouragé si la Nature répond OUI, mais il ne se découragera pas si elle répond NON.

hora d'abord son programme de système planétaire avec un soleil ponctuel fixe et une seule planète ponctuelle. C'est de ce modèle qu'il déduisit sa loi de l'inverse du carré des distances pour l'ellipse de Kepler. Mais ce modèle était interdit par l'une des lois de Newton, la troisième de sa dynamique : il fallut donc le remplacer par un autre, dans lequel soleil et planète tournaient l'un et l'autre autour d'un centre de gravité commun. Ce changement n'avait pas été motivé par la moindre observation (les données ne suggéraient pas qu'il y avait là une « anomalie »), mais par un obstacle théorique au développement du programme. Newton élaborait ensuite son programme pour un nombre plus grand de planètes avec l'hypothèse qu'il n'y avait pas de forces interplanétaires, mais seulement héliocentriques. Puis il étudia le cas où le soleil et les planètes n'étaient pas des masses ponctuelles, mais des masses sphériques. Encore une fois, pour ce changement, il n'eut pas besoin de l'observation d'une anomalie ; pierre de touche de son système, une théorie (non formulée) interdisait la densité infinie ; par conséquent les planètes devaient avoir de l'étendue. Cette modification entraîna des difficultés mathématiques considérables, elle retarda le travail de Newton — et la publication des *Principia* — de plus de dix ans. Ayant résolu cette « énigme », il commença à travailler sur des sphères tournant sur elles-mêmes et sur leurs oscillations. Puis il admit l'existence de forces interplanétaires et commença à étudier les perturbations. A ce moment-là, il se mit à examiner les faits avec plus d'inquiétude. Bon nombre d'entre eux s'expliquaient magnifiquement (du point de vue qualitatif) par son modèle, mais beaucoup ne le faisaient pas. C'est alors qu'il commença à travailler sur les planètes bombées au lieu de planètes sphériques, etc.

Newton méprisait les hommes qui, comme Hooke, étant tombés sur un premier modèle naïf, n'avaient eu ni la ténacité ni la capacité de le développer pour en faire un programme de recherche, et qui pensaient qu'une première version, un simple aparté, constituait une « découverte ». Il différa la publication jusqu'à ce que son programme ait réalisé un remarquable déplacement progressif¹.

1. Reichenbach, suivant en cela Cajon, donne une autre explication de ce qui a retardé Newton dans la publication des *Principia* : « A son grand désappointement, il

La plupart, sinon toutes les « énigmes » newtoniennes, conduisant à une série de variantes nouvelles qui se sont supplantées l'une l'autre, étaient prévisibles dès le premier modèle naif de Newton et il ne fait pas de doute que Newton et ses collègues les avaient prévues : Newton doit s'être rendu parfaitement compte que ses premières variantes étaient d'une fausseté criante. Rien ne montre plus clairement qu'un programme de recherche possède une heuristique positive que ce fait : c'est pour cela qu'on parle de « modèles » dans les programmes de recherche. Un « modèle » est un ensemble de conditions initiales (avec, peut-être, quelques-unes des théories d'observation) ; on sait qu'elles seront forcément remplacées au cours du développement ultérieur du programme ; et on sait même plus ou moins comment cela se fera. Cela montre une fois de plus à quel point les « réfutations » d'une variante spécifique, quelle qu'elle soit, manquent de pertinence dans un programme de recherche : on s'attend tout à fait à ce qu'elles existent, et l'heuristique positive est là comme stratégie à la fois pour les prédire (les produire) et les digérer. A vrai dire, quand l'heuristique positive est clairement déchiffrée, les difficultés du programme sont plutôt d'ordre mathématique qu'empirique¹.

On peut donner à l'« heuristique positive » d'un programme de recherche la forme d'un principe « métaphysique » ; par exemple, pour le programme de Newton : « les planètes sont pour l'essentiel des toupies de forme grossièrement sphérique soumises à la gravitation ». Cette idée n'a jamais été soutenue avec raideur : les planètes

trouva que les résultats d'observation n'étaient pas en accord avec ses calculs. Plutôt que de faire passer une théorie, aussi belle fût-elle, avant les faits, Newton mit le manuscrit de cette théorie dans son tiroir. Une vingtaine d'années plus tard, après qu'une expédition française eut remesuré la circonférence de la Terre, Newton s'aperçut que les chiffres sur lesquels il avait fondé sa mise à l'épreuve étaient faux, et que les chiffres corrigés s'accordaient avec ses calculs théoriques. Ce n'est qu'après cette mise à l'épreuve qu'il publia sa loi... L'histoire de Newton est l'une des illustrations les plus frappantes de la méthode de la science moderne » (Reichenbach [1951], p. 101-102). Feyerabend critique le récit de Reichenbach (Feyerabend [1965], p. 229), mais sans donner une autre analyse raisonnée.

1. Sur ce point, cf. Truesdell [1960].

ne sont pas uniquement soumises à la gravitation, elles ont aussi des propriétés électromagnétiques, par exemple, qui peuvent influencer leur mouvement. L'heuristique positive est ainsi, en général, plus souple que l'heuristique négative. En outre, il arrive parfois que lorsqu'un programme de recherche entre dans une phase dégénérative, une petite révolution ou bien un déplacement créateur de son heuristique positive puisse à nouveau le faire avancer¹. Il vaut donc mieux séparer le « noyau dur » des principes métaphysiques plus souples qui expriment l'heuristique positive.

Ce qui précède montre que l'heuristique positive va de l'avant en négligeant presque complètement les « réfutations » : il peut sembler que ce soient les « vérifications »², plutôt que les réfutations, qui fournissent des points de contact avec la réalité. Bien qu'on doive remarquer que toute « vérification » de la ($n + 1$)^e version du programme est une réfutation de la n ^e, nous ne pouvons nier que quelques défaites des versions suivantes sont toujours prévues : ce sont les « vérifications » qui permettent de continuer à élaborer des programmes, en dépit des exemples réfractaires.

Nous pouvons évaluer les programmes de recherche, même après leur « élimination », quant à leur pouvoir heuristique : quel nombre de nouveaux faits ont-ils produit, quelle était l'ampleur de « leur capacité à expliquer leurs réfutations au cours de leur développement »³ ?

(Nous pouvons aussi les évaluer quant à la façon dont ils ont stimulé les mathématiques. Pour le théoricien, les véritables difficultés sont plutôt d'ordre mathématique que dues à des anomalies. La

1. La contribution de Soddy au programme de Prout, celle de Pauli au programme de Bohr (ancienne théorie quantique) sont des exemples caractéristiques de ce genre de déplacements créatifs.

2. Une « vérification » est la corroboration du contenu supplémentaire dans le programme qui se développe. Mais, bien sûr, une « vérification » ne vérifie pas un programme, elle montre seulement sa puissance heuristique.

3. Dans [1963-1964], p. 324-330, je n'avais malheureusement pas encore fait de distinction terminologique claire entre théories et programmes de recherche ; cela a compromis ma présentation d'un programme de recherche en mathématiques non formelles, quasi empiriques.

grandeur du programme de Newton tient pour une part au développement par les newtoniens de l'analyse infinitésimale classique, laquelle fut un préalable capital à son succès.)

Ainsi, la méthodologie des programmes scientifiques de recherche rend compte de l'autonomie relative de la science théorique : fait historique dont les premiers falsificationnistes n'ont pu expliquer la rationalité. Quels problèmes les hommes de science engagés dans de puissants programmes de recherche choisissent-ils rationnellement ? Leur choix est déterminé par l'heuristique positive du programme de recherche plutôt que par des anomalies embarrassantes d'un point de vue psychologique (ou pressantes d'un point de vue technique). Ils font la liste des anomalies, mais en les écartant, dans l'espoir qu'elles deviendront, le moment venu, des corroborations du programme. Seuls les hommes de science engagés dans une étude par essais et erreurs¹ ont à s'attacher aux anomalies, ou encore ceux qui travaillent sur une phase dégénérative d'un programme de recherche, lorsque l'heuristique positive est à bout de course. (Tout cela doit bien entendu répugner aux tenants du falsificationnisme naïf qui soutiennent qu'une fois une théorie « réfutée » par l'expérimentation (d'après leur règlement), il est irrationnel (et malhonnête) de continuer à la développer : on doit remplacer l'ancienne théorie « réfutée » par une nouvelle qui ne le soit pas.)

c. Deux illustrations : Prout et Bohr

La dialectique de l'heuristique positive et négative dans un programme de recherche deviendra plus claire si nous l'illustrons par des exemples. Je vais par conséquent esquisser les grandes lignes de deux programmes de recherche qui ont réussi de façon spectaculaire : celui de Prout², fondé sur l'idée que tous les atomes sont composés d'atomes d'hydrogène, et celui de Bohr, fondé sur l'idée que l'émission

1. Cf. ci-dessous, p. 124 s.

2. Déjà mentionné, p. 36 s.

de lumière est due à des électrons qui sautent d'une orbite à une autre à l'intérieur des atomes.

(J'estime que, lorsqu'on écrit une étude de cas historique, on devrait procéder de la manière suivante : 1 / en donner une reconstruction rationnelle ; 2 / essayer de comparer cette reconstruction rationnelle avec l'histoire réelle et critiquer à la fois sa propre reconstruction rationnelle parce qu'elle manque d'historicité et l'histoire réelle parce qu'elle manque de rationalité. Ainsi, toute étude historique doit être précédée d'une étude heuristique : l'histoire des sciences est aveugle sans philosophie des sciences. Je n'ai pas l'intention ici d'entrer sérieusement dans la deuxième étape.)

e1 / Prout : un programme de recherche qui progresse dans un océan d'anomalies

Dans un article non signé de 1815, Prout soutenait que les poids atomiques de tous les éléments chimiques purs sont des nombres entiers. Il savait très bien que les anomalies abondaient, mais affirmait qu'elles provenaient de ce que les substances chimiques telles qu'on les trouve ordinairement sont impures : c'est-à-dire que les « techniques expérimentales » de référence à son époque n'étaient pas fiables, ou, pour le dire dans nos termes à nous, que les théories « d'observation » de l'époque, à la lumière desquelles étaient établies les valeurs de vérité des énoncés de base de sa théorie, étaient fausses¹. Les champions de la théorie de Prout s'embarquèrent donc dans une grande aventure : renverser les théories qui fournissaient les éléments de contre-preuve opposés à leur thèse. Pour cela, ils eurent à révolutionner la chimie analytique admise à l'époque et, pareillement, à réviser les techniques expérimentales à l'aide desquelles les éléments

1. Hélas, tout cela est plus une reconstruction rationnelle que de l'histoire véritable. Prout refusait l'existence de toute anomalie que ce soit. Il prétendait, par exemple, que le poids atomique du chlore était exactement 36.

devaient être séparés¹. A la vérité, la théorie de Prout vainquit l'une après l'autre les théories appliquées précédemment dans la purification des substances chimiques. Pourtant, certains chimistes se lassèrent du programme de recherche et l'abandonnèrent, parce que ses réussites successives étaient loin d'annoncer la victoire finale. Stas, par exemple, déçu par la persistance de certains cas réfractaires, conclut en 1860 que la théorie de Prout était « sans fondements »². Mais d'autres se sentaient plus encouragés par les progrès que découverts parce que le succès total tardait à se produire. Maignac, par exemple, rétorqua sur-le-champ que « bien que [convaincu que] les expériences de Monsieur Stas sont parfaitement exactes, [rien ne prouve] que les différences observées entre ses résultats et ceux qu'exige la loi de Prout ne puissent s'expliquer par le caractère imparfait des méthodes expérimentales »³. Comme le déclare Crookes en 1886 : « Bon nombre de chimistes réputés considèrent que nous avons ici [dans la théorie de Prout] une expression de la vérité, masquée par des phénomènes résiduels ou collatéraux que nous n'avons pas encore réussi à éliminer. »⁴ C'était dire qu'il devait y avoir encore un autre présupposé erroné caché dans les théories « d'observation » sur lesquelles se fondaient les « techniques expérimentales » de la purification chimique avec lesquelles on calculait les poids atomiques : pour Crookes, en 1886, « certains des poids atomiques actuels repré-

1. Prout avait conscience de certains caractères méthodologiques fondamentaux de son programme. Citons ses premières lignes de [1815] : « L'auteur de l'essai qui suit le soumet au public avec la plus grande hésitation... Il espère cependant qu'on verra son importance et qu'on entreprendra de l'examiner et, ainsi, de vérifier ou de réfuter ses conclusions. Si elles devaient se montrer erronées, la recherche pourrait encore mettre au jour des faits nouveaux, ou mieux établir d'anciens faits ; mais si elles devaient être vérifiées, cela jetterait un jour nouveau et intéressant sur toute la science de la chimie. »

2. Clerk Maxwell [1871] était du côté de Stas : il croyait impossible l'existence de deux espèces d'hydrogène, « car, si quelques [molécules] étaient d'une masse un peu plus grande que les autres, nous avons les moyens d'effectuer une séparation entre molécules de masses atomiques différentes ; l'une d'entre elles serait un peu plus dense que l'autre. Comme cela ne peut être fait, nous devons admettre [qu'elles sont toutes pareilles] ».

3. Maignac [1860].

4. Crookes [1886].

sentent seulement une valeur moyenne »¹. En fait, Crookes continua et mit son idée sous une forme scientifique (augmentant le contenu) : il proposa de nouvelles théories concrètes de « fractionnement », un nouveau « démon faisant le tri »². Hélas, ses nouvelles théories d'observation se sont révélées aussi fausses qu'elles étaient audacieuses : incapables de prédire le moindre fait nouveau, elles ont été éliminées de l'histoire des sciences (reconstruite rationnellement). Comme on le découvrit à la génération suivante, il y avait un présupposé caché très fondamental qui faisait échouer les chercheurs : à savoir que deux éléments purs devaient être séparables par des méthodes chimiques. L'idée que deux éléments purs différents puissent se conduire de façon identique dans toutes les réactions chimiques, mais être séparables par des méthodes physiques, exigeait un changement (une « élasticité » du concept d'« élément pur »), qui constituait aussi un changement (par l'amplification de l'élasticité des concepts) pour le programme de recherche lui-même³. Ce déplacement révolutionnaire et extrêmement créatif ne fut réalisé que par l'école de Rutherford⁴ ; alors, « après bien des vicissitudes et les contre-preuves apparentes les plus convaincantes, l'hypothèse lancée si légèrement en 1815 par Prout, un médecin d'Edimbourg, est devenue un siècle plus tard la pierre angulaire des théories modernes sur la structure des atomes »⁵. Cette étape créative n'a été à vrai dire qu'un résultat adventice du progrès d'un autre programme de recherche, très éloigné en fait ; les partisans de Prout, à qui manquait ce stimulus extérieur, n'ont jamais rêvé, par exemple, de tenter de construire de puissantes machines centrifuges pour séparer les éléments.

(« Quand une théorie « d'observation » ou « d'interprétation » est

1. *Ibid.*

2. *Ibid.*, p. 491.

3. Pour l'« extension des concepts », cf. mon texte [1963-1964], IV^e partie.

4. Le déplacement est annoncé par un article passionnant de Crookes [1888], qui indique que la solution est à chercher dans le tracé d'une nouvelle démarcation entre physique et chimie. Mais cette anticipation est demeurée philosophique : il est revenu à Rutherford et à Soddy d'en faire, après 1910, une théorie scientifique.

5. Soddy [1932], p. 50.

en fin de compte éliminée, les mesures « précises » effectuées à l'intérieur du cadre qu'on met au rancart peuvent sembler plutôt absurdes avec le recul. Soddy s'est moqué de la « précision expérimentale » cultivée pour elle-même : « Il y a quelque chose de tragique, ou qui dépasse même la tragédie, dans le sort qui s'est abattu sur l'œuvre de toute une vie pour cette galaxie de chimistes distingués du XIX^e siècle ; ils étaient révérents à juste titre par leurs contemporains parce qu'ils représentaient le comble de la perfection pour les mesures scientifiques précises. Leurs résultats obtenus à grand-peine paraissent, à présent du moins, dotés d'aussi peu d'intérêt et de signification que la détermination du poids moyen d'une série de bouteilles dont certaines seraient pleines et d'autres plus ou moins vides. »¹

Souignons qu'à la lumière de la méthodologie des programmes de recherche que nous proposons ici, il n'y a jamais eu aucune raison rationnelle d'*éliminer* le programme de Prout. En réalité, ce programme a produit un splendide déplacement progressif, marqué aussi par mille contretemps². Notre ébauche montre comment un programme de recherche peut défier un volume considérable de savoir scientifique reçu : on dirait qu'un programme se place dans un environnement hostile qu'il parvient à supplanter et transformer par étapes.

En outre, la véritable histoire du programme de Prout n'illustre que trop bien combien le justificationnisme et le falsificationnisme naïf ont entravé et ralenti le progrès des sciences. (Au XIX^e siècle, l'un et l'autre ont encouragé l'opposition à la théorie atomique.) Un programme de recherche qui pourrait être fructueux pour l'historien des sciences serait d'examiner à fond l'influence particulière que peut avoir une mauvaise méthodologie sur les sciences.

1. *Ibid.*

2. Ces obstacles ont poussé fatalement bien des hommes de science, chacun séparément, à classer le programme, ou à le jeter carrément par-dessus bord, et à collaborer à d'autres programmes où l'heuristique positive se trouvait offrir alors des succès à moindres frais : on ne peut pas comprendre pleinement l'histoire des sciences sans faire appel à la psychologie des foules. (Cf. ci-dessous, p. 128 s.)

e2 / Bohr : un programme de recherche qui progresse à partir de fondements incompatibles

Une brève esquisse du programme de recherche de Bohr sur l'émission de lumière (dans l'ancienne théorie quantique) va illustrer un peu mieux notre thèse, et même l'élargir¹.

Le programme de recherche de Bohr peut être caractérisé par : 1 / son problème initial ; 2 / son heuristique négative et positive ; 3 / les problèmes qu'il a tenté de résoudre au cours de son développement ; 4 / son point de dégénérescence (ou, si l'on veut, « de saturation ») ; et enfin 5 / le programme par lequel il a été supplanté.

Bohr se proposait de résoudre cette énigme : comment les atomes de Rutherford (c'est-à-dire de minuscules systèmes planétaires avec des électrons en orbite autour d'un noyau positif) peuvent-ils demeurer stables ? En effet, selon la théorie bien corroborée de l'électromagnétisme de Maxwell-Lorentz, ils devraient s'effondrer. Mais la théorie de Rutherford était bien corroborée elle aussi. Bohr suggérerait de ne pas tenir compte pour l'instant de l'incompatibilité et d'élaborer, en connaissance de cause, un programme de recherche dont les versions « réfutables » auraient été incompatibles avec la théorie de Maxwell-Lorentz². Il proposa cinq postulats comme noyau dur de son programme :

1 / Le rayonnement d'énergie [à l'intérieur de l'atome] n'est pas émis (ni absorbé) de la manière continue que suppose l'électrodynamique ordinaire, mais il l'est seulement au cours de transitions des systèmes entre différents états stationnaires ;

2 / L'équilibre dynamique des systèmes dans les états stationnaires est gouverné par les lois ordinaires de la mécanique, alors que ces lois ne sont pas valables pour les transitions des systèmes d'un état à un autre ;

1. Cette section peut encore frapper l'historien comme relevant plus de la caricature que de l'esquisse ; j'espère cependant qu'elle sert son but. (Cf. ci-dessus, p. 70.) Certaines de mes affirmations sont à prendre non avec un grain, mais avec une tonne de sel.

2. Cela constitue bien sûr un argument de plus contre la thèse de J. O. Wisdom [1963], pour qui des théories métaphysiques peuvent être réfutées par une théorie scientifique bien corroborée qui les contredit. Cf. aussi ci-dessus p. 31 (et n. 4) et p. 34.

3 / Le rayonnement émis au cours de la transition d'un système entre un état stationnaire et un autre est homogène, et la relation entre la fréquence ν et la quantité totale d'énergie émise E est donnée par la formule $E = h\nu$, où h est la constante de Planck ;

4 / Les différents états stationnaires d'un système simple, consistant en un électron décrivant une orbite autour d'un noyau positif, sont déterminés par la condition que le rapport entre l'énergie totale émise durant la formation de la configuration et la fréquence de révolution de l'électron soit un multiple entier de $1/2 h$. Supposant que l'orbite de l'électron est circulaire, cette hypothèse équivaut à cette autre : le moment angulaire de l'électron autour du noyau est égal à un multiple entier de $h/2\pi$;

5 / L'état permanent de tout système atomique, c'est-à-dire l'état dans lequel l'énergie émise est maximale, est déterminé par la condition que le moment angulaire de chaque électron autour du centre de son orbite est égal à $h/2\pi$.

Il nous faut apprécier la différence méthodologique capitale entre l'incompatibilité introduite par le programme de Prout et celle qu'apporte celui de Bohr. Le programme de recherche de Prout déclarait la guerre à la chimie analytique de son temps : son heuristique positive fut conçue pour la renverser et la remplacer. Mais le programme de recherche de Bohr ne se proposait pas le même but : même dans le cas d'un succès total, son heuristique positive aurait laissé irrésolue l'incompatibilité avec la théorie de Maxwell-Lorentz². Pour lancer une telle idée, il fallait avoir encore plus de courage que Prout ; cette idée traversa l'esprit d'Einstein, qui la trouva inacceptable et la rejeta³. A la vérité, certains des programmes de recherche les plus importants de l'histoire des sciences ont été greffés sur des programmes antérieurs avec lesquels ils étaient ouvertement incompatibles. Par exemple, l'astronomie de Copernic fut « greffée » sur la physique d'Aristote, et le programme de Bohr sur celui de Maxwell. Ces greffes sont irrationnelles pour le justificationniste et pour

1. Bohr [1913a], p. 874.

2. A l'époque, Bohr soutenait que la théorie de Maxwell-Lorentz devrait en fin de compte être remplacée. (La théorie du photon d'Einstein avait déjà montré que c'était nécessaire.)

3. Hevesy [1913] ; cf. aussi ci-dessus, p. 66 (et n. 1).

le tenant du falsificationnisme naïf, car ni l'un ni l'autre ne peut supporter qu'on progresse à partir de fondements incompatibles. Ces greffes sont par conséquent dissimulées le plus souvent par des stratagèmes *ad hoc* — tels la théorie de l'inertie circulaire chez Galilée ou le principe de correspondance de Bohr et, plus tard, son principe de complémentarité — dont le seul objectif est de cacher la « déficience »¹. Quand le jeune programme greffé prend de la force, la coexistence pacifique arrive à son terme, la symbiose se transforme en concurrence et les champions du nouveau programme essaient de remplacer complètement l'ancien...

C'est peut-être bien la réussite de son « programme greffé » qui a ensuite induit Bohr, à tort, à croire que de telles incompatibilités fondamentales dans des programmes de recherche peuvent et doivent être tolérées *par principe*, qu'elles ne posent pas de problème sérieux et qu'il faut simplement s'y habituer. Bohr essaya en 1922 d'abaisser les normes de la critique scientifique ; il prétendait que « le plus qu'on puisse demander à une théorie [c'est-à-dire à un programme], c'est que la classification [qu'elle établit] soit poussée assez loin pour contribuer au développement du domaine d'observation, en prédisant des phénomènes nouveaux »².

(Cette affirmation de Bohr est semblable à celle de d'Alembert confronté à l'incompatibilité des fondements de la théorie infinitésimale : « allez de l'avant et la foi vous viendra ». Selon Margenau, « il est compréhensible que, tout excités par le succès d'une théorie, des hommes n'aient pas perçu une malformation dans son architecture ; car l'atome de Bohr était posé comme une tour baroque sur la base gothique de l'électrodynamique classique »³. Mais, en fait, la « malformation » ne leur avait pas « échappé » : chacun en était conscient, mais faisait plus ou moins semblant de ne pas la voir au

1. Dans notre méthodologie, il n'est nul besoin de stratagèmes protecteurs *ad hoc* de ce genre. Ils sont d'ailleurs inoffensifs tant qu'on les considère clairement comme des problèmes et pas comme des solutions.

2. Bohr [1922], c'est moi qui souligne.

3. Margenau [1950], p. 311.

coûts de la phase progressive du programme¹. Notre méthodologie des programmes de recherche montre la rationalité de cette attitude et aussi l'irrationalité de la défense de telles « malformations », une fois la phase progressive terminée.

Il faut dire ici que dans les années 1930 et 1940, Bohr abandonna son exigence de « phénomènes nouveaux » et qu'il était prêt à « se mettre à la tâche immédiate de coordonner les multiples éléments de preuve concernant les phénomènes atomiques, qui s'accumulaient de jour en jour dans l'exploration de ce nouveau domaine de connaissance »². Cela indique que Bohr, à ce moment-là, était revenu à l'idée de « sauver les phénomènes », alors qu'Einstein insistait sarcastiquement sur le fait que « toute théorie est vraie pourvu qu'on associe convenablement ses symboles aux quantités observées »³.

Mais la *compatibilité*⁴ — au sens fort — doit rester un principe régulateur important (dominant de très haut les exigences du changement progressif de problème); et il faut considérer les incompatibilités (y compris les anomalies) comme des problèmes. La raison en est simple. Si, en science, on vise la vérité, on doit viser la com-

1. Sommerfeld plus que Bohr: cf. ci-dessous, n. 3, p. 87.

2. Bohr [1949], p. 206.

3. Cité par Schrödinger [1958], p. 170.

4. Deux propositions sont incompatibles si leur conjonction n'a pas de modèle, c'est-à-dire s'il n'existe pas d'interprétation de leurs termes descriptifs sous laquelle leur conjonction soit vraie. Mais, dans le discours informel, nous pouvons employer des termes plus formateurs que dans le discours formel: on donne à certains termes descriptifs une interprétation fixe. Au sens informel, deux propositions peuvent être (faiblement) incompatibles, étant donné l'interprétation standard de quelques termes caractéristiques, même si, formellement, dans certaines interprétations non préméditées, elles peuvent être compatibles. Par exemple, les premières théories du spin de l'électron étaient incompatibles avec la théorie de la relativité restreinte si l'on donnait au « spin » son interprétation standard (« forte ») et si on le traitait de ce fait comme un terme formateur; mais l'incompatibilité disparaît si l'on traite le « spin » comme un terme descriptif non interprété. La raison pour laquelle nous ne devons pas abandonner trop facilement les interprétations standard est qu'une telle émasculatation des significations peut émasculer l'heuristique positive de notre programme. (D'autre part, de tels déplacements de signification peuvent dans certains cas être progressifs, cf. plus haut, p. 52.) Sur la ligne mouvante de démarcation entre termes formateurs et termes descriptifs dans le discours informel, cf. mon texte [1963-1964], 9(b), en particulier p. 335, n. 1; trad. p. 131, n. 173.

patibilité; si on renonce à la compatibilité, on renonce à la vérité. Prétendre que « nous devons être modestes dans nos exigences »¹, que nous devons nous résigner à des incompatibilités, faibles ou fortes, c'est toujours un vice de méthode. D'autre part, cela ne veut pas dire que la découverte d'une incompatibilité — ou d'une anomalie — doit interrompre immédiatement le développement d'un programme: il peut être rationnel de placer l'incompatibilité dans une quarantaine temporaire, *ad hoc*, et de poursuivre l'heuristique positive du programme. Cela s'est fait même en mathématiques, comme le montrent les débuts du calcul infinitésimal et la théorie naïve des ensembles².

(De ce point de vue, le « principe de correspondance » de Bohr a joué dans son programme un double rôle intéressant. D'une part, il a fonctionné comme un principe heuristique important pour suggérer maintes hypothèses scientifiques nouvelles qui, à leur tour, ont conduit à des faits inédits, notamment dans le domaine de l'intensité des raies spectrales³. D'autre part, il a aussi fonctionné comme un mécanisme de défense, qui « s'efforçait d'utiliser au maximum les concepts des théories classiques de la mécanique et de l'électrodynamique, malgré l'opposition entre ces théories et le quantum

1. Bohr [1922], dernier alinéa.

2. Les tenants du falsificationnisme naïf ont tendance à considérer ce libéralisme comme un crime contre la raison. Leur principal argument est le suivant: « S'il fallait admettre les contradictions, il conviendrait de renoncer à toute activité d'ordre scientifique: il s'ensuivrait une faillite totale de la science. Pour le montrer, il suffit de démontrer que si l'on admet deux propositions contradictoires, il faut souscrire à n'importe quelle proposition, car, à partir d'un couple de propositions contradictoires, on peut inférer, de manière valide, n'importe quelle proposition... Une théorie qui comporte une contradiction est donc tout à fait inutilisable en tant que théorie » (Popper [1940]; trad. *Conjectures et réfutations*, p. 463 et 466). Pour rendre justice à Popper, il faut souligner qu'il argumente ici contre la dialectique hégélienne, dans laquelle l'incompatibilité devient une vertu; et il a parfaitement raison de faire remarquer ses dangers. Mais Popper n'a jamais analysé de modèles de progrès empirique (ou non) ayant des fondements incompatibles; à vrai dire, en [1934], section 24, il fait de la compatibilité et de la falsifiabilité des exigences obligatoires pour toute théorie scientifique. J'ai traité plus en détail de ce problème dans [1974c].

3. Cf. par exemple Kramers [1923].

d'action¹ », au lieu de faire ressortir l'urgence d'élaborer un programme unifié. Dans ce second rôle, il a rendu le programme moins problématique²).

Bien sûr, le programme de recherche de la théorie quantique prise dans son ensemble était un « programme greffé », et il répugnait par conséquent à des physiciens profondément conservateurs comme Planck. On peut prendre deux positions extrêmes, aussi irrationnelles l'une que l'autre, vis-à-vis d'un programme greffé.

La position des conservateurs consiste à suspendre le nouveau programme jusqu'à ce que l'incompatibilité fondamentale avec l'ancien soit levée d'une manière ou d'une autre : il est irrationnel de travailler sur des fondements incompatibles. Les « conservateurs » vont se concentrer sur l'élimination de l'incompatibilité en exprimant (approximativement) les postulats du nouveau programme dans les termes de l'ancien : ils estiment irrationnel de poursuivre le nouveau programme sans qu'il y ait de réduction réussie de l'espèce mentionnée. C'est la voie que choisit Planck. Il n'y parvint pas, malgré les dix années de dur labeur qu'il y consacra³. Quand Laue déclare que sa conférence du 14 décembre 1900 a marqué « la date de naissance de la théorie quantique », ce n'est pas tout à fait vrai : ce jour est la date de naissance du programme de réduction de Planck. C'est Einstein qui prit en 1905 la décision d'*avancer* sur des fondements provisoirement incompatibles, mais lui-même hésita en 1913 quand Bohr repartit de l'avant.

La position des anarchistes à propos des programmes greffés consiste à exalter l'anarchie des fondements comme une vertu et à

1. Bohr [1923].

2. Born fait dans [1954] un exposé très vivant du principe de correspondance, qui appuie fortement cette double appréciation : « L'art de deviner des formules correctes qui s'écartent des formules classiques tout en les comprenant comme cas limites... a été porté à une grande perfection. »

3. Sur l'histoire passionnante de cette longue série d'échecs frustrants, cf. Whittaker [1953], p. 103-104. Planck lui-même en a dressé un tableau dramatique : « Mes faibles tentatives pour faire entrer le quantum d'action élémentaire dans la théorie classique ont continué pendant pas mal d'années en me demandant de grands efforts. Pour beaucoup de mes collègues, cette obstination frôlait la tragédie » (Planck [1947]).

considérer l'incompatibilité (faible), soit comme une propriété de base de la nature, soit comme une limite ultime de la connaissance humaine, comme l'ont fait certains disciples de Bohr.

La position rationnelle est très bien illustrée par Newton, confronté à une situation qui était dans une certaine mesure comparable à celle que nous décrivons. La mécanique cartésienne du choc, sur laquelle le programme de Newton s'est greffé à l'origine, était (faiblement) incompatible avec la théorie newtonienne de la gravitation. Newton travailla à la fois sur son heuristique positive (avec succès) et sur un programme réductionniste (sans succès) ; il désapprouvait à la fois les cartésiens qui, comme Huygens, pensaient qu'il ne fallait pas perdre son temps sur un programme « inintelligible », et certains de ses disciples imprudents qui, comme Cotes, pensaient que l'incompatibilité ne posait pas de problème¹.

La position rationnelle concernant les programmes « greffés », c'est donc d'exploiter leur pouvoir heuristique sans se résigner au chaos fondamental sur lequel ils se développent. Dans l'ensemble, cette attitude a dominé la première théorie quantique d'avant 1925. Dans la nouvelle théorie quantique, après 1925, la position « anarchiste » est devenue dominante et la physique quantique moderne, dans l'« interprétation de Copenhague », est devenue l'un des véhicules caractéristiques de l'obscurantisme philosophique. Dans la *nouvelle* théorie, le célèbre « principe de complémentarité » de Bohr a introduit l'incompatibilité (faible) comme ultime propriété fondamentale de la nature, et a amalgamé le positivisme subjectiviste, la dialectique antilogique et même la philosophie du langage ordinaire dans une union impie. Après 1925, Bohr et ses associés ont provoqué un abaissement sans précédent des normes critiques concernant les théo-

1. Bien sûr, un programme réductionniste n'est scientifique que s'il explique plus que ce qu'il s'était proposé d'expliquer ; autrement la réduction n'est pas scientifique (cf. Popper [1969]). Si la réduction ne produit pas de contenu empirique nouveau, sans parler de faits inédits, elle représente alors un déplacement dégénératif de problème : c'est un pur et simple expédient linguistique. L'effort des disciples de Descartes pour étayer leur métaphysique afin de pouvoir interpréter dans ses termes la gravitation de Newton est un exemple éminent de ces réductions purement linguistiques. Cf. ci-dessus, n. 1, p. 53.

nies scientifiques. Cela a conduit à une défaite de la raison dans la physique moderne et à un culte anarchiste de l'incompréhensible tranquillisant de Heisenberg-Bohr est si délicatement conçue qu'elle fournit pour le moment un confortable oreiller au vrai croyant. »¹ D'autre part, les normes trop élevées d'Einstein ont peut-être bien constitué la raison qui l'a empêché de découvrir (ou peut-être seulement de publier) le modèle de l'atome de Bohr et la mécanique ondulatoire.

Einstein et ses partisans n'ont pas gagné la bataille. Les manuels de physique sont aujourd'hui pleins d'affirmations de ce genre :

Les deux points de vue, quanta et champ de forces électromagnétiques, sont complémentaires au sens de Bohr. Cette complémentarité est l'une des grandes réussites de la philosophie naturelle dans laquelle l'interprétation de Copenhague de l'épistémologie de la théorie quantique a résolu le vieux conflit entre les théories corpusculaire et ondulatoire de la lumière. Depuis le 1^{er} siècle de notre ère, quand Héron d'Alexandrie découvrit les propriétés de la réflexion et de la propagation linéaire, jusqu'à la découverte par Young et Maxwell au XIX^e siècle des propriétés des interférences et des ondes, la controverse a fait rage. Au cours du dernier demi-siècle, la théorie quantique du rayonnement a complètement résolu la dichotomie, d'une façon hégélienne saisissante.²

1. Einstein [1928]. Parmi les critiques de l'anarchisme de Copenhague, nous devons citer — en plus d'Einstein — Popper, Landé, Schrödinger, Margenau, Blokhintzev, Bohm, Fényes et Jánossy. Défense de l'interprétation de Copenhague, dans Heisenberg [1953]; critique récente et rigoureuse, dans Popper [1967]. Feyerabend [1968-1969] se sert de certaines incompatibilités et hésitations dans la position de Bohr pour faire une grossière falsification apologétique de la philosophie de ce dernier; il présente de façon éronnée l'attitude critique de Popper, de Landé et de Margenau envers Bohr, n'insiste pas suffisamment sur l'opposition d'Einstein et paraît avoir totalement oublié qu'il fut lui-même plus poppérien que Popper en la matière dans certains de ses articles précédents.

2. Power [1964], p. 31 (c'est moi qui souligne). « Complètement » est à prendre au pied de la lettre. Comme nous le lisons dans *Nature* (222, 1969, p. 1034-1035) : « Il est absurde de penser qu'aucun des éléments fondamentaux de la théorie [quantique] puisse être faux... L'argument que des résultats scientifiques sont toujours provisoires ne tient pas. Ce sont les conceptions que les philosophes se font de la physique moderne qui sont provisoires, parce qu'ils n'ont pas encore vu à quel point les découvertes de la physique quantique affectent l'ensemble de l'épistémologie... Les conditions d'observation en

Revenons maintenant à la logique de la découverte de la première théorie quantique et occupons-nous particulièrement de son heuristique positive. Le plan de Bohr consistait à élaborer d'abord la théorie de l'atome d'hydrogène. Son premier modèle devait être fondé sur un proton-noyau fixe avec un électron décrivant une orbite circulaire; dans son second modèle, il se proposait de calculer une orbite elliptique dans un plan fixe; il avait ensuite l'intention de se passer des restrictions visiblement artificielles du noyau fixe et du plan fixe; après quoi il pensait prendre en compte le spin possible de l'électron¹, puis il espérait étendre son programme à la structure d'atomes et de molécules complexes et aux effets des champs électromagnétiques sur ceux-ci, etc. Tout ceci fut planifié dès le début: l'analogie entre les atomes et des systèmes planétaires inspira un programme long et difficile, mais optimiste, elle indiquait clairement quelle était sa politique de recherche². « On pouvait croire à cette époque — en 1913 — qu'on avait enfin trouvé l'authentique clé [du problème] des spectres et qu'avec du temps et de la patience on résoudrait complètement leurs énigmes. »³

Le célèbre article de Bohr (1913) contenait l'étape initiale du programme de recherche. Il comportait son premier modèle (je l'appel-

physique quantique vérifient de la façon la plus convaincante l'assertion que le langage ordinaire est la source ultime de la non-ambiguïté de la description physique. »

1. Il s'agit d'une reconstruction raisonnable. En fait, Bohr n'a accepté cette idée que dans [1926].

2. En dehors de cette analogie, l'heuristique positive de Bohr comportait une autre idée fondamentale: le « principe de correspondance ». Il l'avait mentionnée dès 1913 (cf. le deuxième de ses cinq postulats cités ci-dessus, p. 75), mais il ne la développa que plus tard, quand il l'utilisa comme principe directeur pour résoudre certains problèmes posés par des modèles ultérieurs, plus raffinés (comme les intensités et les états de polarisation). La deuxième partie de son heuristique positive avait ceci de singulier que Bohr ne croyait pas à sa version métaphysique: il pensait que c'était une règle provisoire, qui durerait jusqu'à ce que l'électromagnétisme (et peut-être la mécanique) classique soit remplacé.

3. Davison [1937], MacLaurin [1748], p. 8, avait ressenti une euphorie comparable quant au programme de Newton: « la philosophie [de Newton], étant fondée sur l'expérimentation et la démonstration, ne peut échouer avant que la raison ou la nature des choses ne soit transformée... [Newton] n'a guère plus laissé comme tâche à la postérité que d'observer les cieux et de calculer selon ses modèles ».

lerai M_1) qui déjà prédisait des faits qu'aucune autre théorie n'avait encore prédits : les longueurs d'onde des raies du spectre d'émission de l'hydrogène. Bien qu'on eût connu certaines de ces longueurs d'onde avant 1913 — la série de Balmer (1885) et celle de Paschen (1908) —, la théorie de Bohr prédisait beaucoup plus que ces deux séries. Et leurs mises à l'épreuve vinrent bientôt corroborer ce contenu nouveau : une série de Balmer supplémentaire fut découverte par Lyman en 1914, une autre par Brackett en 1922, puis encore une autre par Pfund en 1924.

Puisque la série de Balmer et celle de Paschen étaient connues avant 1913, certains historiens présentent cette histoire comme un exemple de l'« ascension inductive » baconienne, avec 1 / le chaos des raies spectrales, 2 / une « loi empirique » (Balmer), 3 / l'explication théorique (Bohr). Cela ressemble certainement beaucoup aux trois « étages » de Whewell. Mais les progrès de la science auraient à peine été retardés s'il nous avait manqué le travail méritoire par essais et erreurs de l'ingénieur maître d'école suisse : le courant dominant spéculatif de la science, entraîné par les spéculations hardies de Planck, Rutherford, Einstein et Bohr, aurait produit par déduction les résultats de Balmer, comme énoncés de mise à l'épreuve de leurs théories, sans le prétendu « travail de pionnier » de Balmer. Dans la reconstruction rationnelle des sciences, les découvreurs de « conjectures naïves » ne sont guère récompensés de leurs peines¹.

A vrai dire, le problème que se posait Bohr, c'était de rendre compte non des séries de Balmer et de Paschen, mais de la stabilité paradoxale de l'atome de Rutherford. Bien plus, Bohr n'avait pas

1. J'utilise « conjecture naïve » comme un terme technique, au sens que je lui ai donné dans [1963-1964]. Pour une étude de cas et une critique détaillée du mythe du « fondement inductif » des sciences (naturelles ou mathématiques), cf. *ibid.*, section 7, en particulier p. 298-307. J'y montre que la « conjecture naïve » de Descartes et d'Euler, selon laquelle, pour tout polyèdre, $S - A + F = 2$, fut non pertinente, et superflue pour les développements ultérieurs ; comme autre exemple, on peut mentionner que les efforts de Boyle et de ses successeurs pour démontrer $pV = RT$ ont été non pertinents pour le développement ultérieur de la théorie (à l'exception de quelques techniques expérimentales) ; de même, les trois lois de Kepler peuvent avoir été superflues pour la théorie de la gravitation de Newton. J'étudie plus à fond cette question plus loin, p. 126.

même entendu parler de ces formules avant d'écrire la première version de son article¹.

Le contenu inédit du premier modèle M_1 ne fut pas corroboré en son entier ; par exemple, Bohr prétendait prédire avec M_1 toutes les raies du spectre d'émission de l'hydrogène. Mais il existait un témoignage expérimental de l'existence d'une série de l'hydrogène là où, selon M_1 , il n'aurait pas dû y en avoir. Cette série anormale est la série ultra-violette de Pickering-Fowler.

Pickering avait découvert cette série en 1896 dans le spectre de l'étoile ζ Puppis. Fowler, après avoir lui aussi découvert la première raie dans le Soleil en 1898, produisit la série tout entière dans un tube de décharge contenant de l'hydrogène et de l'hélium. On pouvait à vrai dire prétendre que les raies monstrueuses n'avaient rien à voir avec l'hydrogène : après tout, le Soleil et ζ Puppis comportent de nombreux gaz et le tube de décharge contenait aussi de l'hélium. De fait, la raie ne pouvait *pas* être produite dans un tube contenant de l'hydrogène pur. Mais la « technique expérimentale » de Pickering et de Fowler, qui conduisit à une hypothèse falsificatrice de la loi de Balmer, avait une base théorique plausible, quoique n'ayant jamais été rigoureusement mise à l'épreuve : *a* / leur série avait le même point de convergence que celle de Balmer, elle fut donc prise pour une série de l'hydrogène ; *b* / Fowler expliqua de façon plausible pourquoi l'hélium ne pouvait pas être responsable de la production de la série².

1. Cf. Jammer [1966], p. 77 s.

2. Fowler [1912]. D'ailleurs, sa théorie « d'observation » lui était fournie par « les investigations théoriques de Rydberg » que, « en l'absence de preuve expérimentale stricte, [il] considérait comme justifiant sa conclusion expérimentale » (p. 65). Mais un théoricien, son collègue le professeur Nicholson [1913], se référait trois mois plus tard aux résultats de Fowler comme à « des confirmations de la théorie de Rydberg effectuées en laboratoire ». Je pense que cette anecdote appuie ma thèse favorite : la plupart des hommes de science sont enclins à ne pas comprendre *au sujet* de la science beaucoup plus que les poissons à propos de l'hydrodynamique. A la Royal Astronomical Society, le rapport du Conseil lors de la 93^e réunion générale annuelle décrit « l'observation [faite par Fowler lors d'une expérimentation en laboratoire], de [nouvelles] raies de l'hydrogène qui avaient si longtemps échappé aux efforts des physiciens » comme « un progrès très intéressant » et « un triomphe du travail expérimental bien mené ».

Mais Bohr ne fut pas très impressionné par l'autorité des expérimentateurs. Il ne mit en doute ni leur « précision expérimentale » ni la « fiabilité de leurs observations », mais il discuta leur théorie d'observation. En fait, il proposa une autre voie. D'abord, il élaborait un nouveau modèle (M_2) de son programme de recherche : celui de l'hélium ionisé, avec un double proton autour duquel un électron décrit une orbite. Or ce modèle prédit la présence d'une série ultraviolette dans le spectre de l'hélium ionisé, laquelle coïncide avec la série de Pickering-Fowler. Voilà qui constituait une théorie rivale. Puis il suggéra une « expérience cruciale » : il prédit qu'on pourrait produire la série de Fowler, peut-être même avec des raies plus intenses, dans un tube rempli d'un mélange d'hélium et de chlore. En outre, Bohr expliqua aux expérimentateurs, sans même regarder leur appareillage, le rôle catalytique de l'hydrogène dans l'expérience de Fowler et du chlore dans l'expérience qu'il proposait¹. Et il eut raison². C'est ainsi que la première défaite apparente de son programme de recherche se transforma en victoire retentissante.

Pourtant, la victoire fut aussitôt remise en question. Fowler reconnut que sa série n'était pas une série de l'hydrogène, mais une série de l'hélium. Mais il fit remarquer que l'adaptation de monstres faite par Bohr³ était encore un échec : les longueurs d'onde dans la série de Fowler diffèrent de façon significative des valeurs prédites par M_2 . Ainsi, la série, quoiqu'elle ne réfute pas M_1 , persiste à réfuter M_2 , et, à cause de l'étroite connexion entre M_1 et M_2 , elle sape M_1 ⁴ !

Bohr balaya l'argument de Fowler : il n'avait jamais voulu, *bien entendu*, qu'on prît M_2 trop au sérieux. Ses valeurs étaient le résultat

1. Bohr [1913b].

2. Evans [1913]. Exemple comparable d'un physicien théoricien enseignant à un expérimentateur avide de réfutation ce que celui-ci avait réellement observé : cf. ci-dessus, n. 3, p. 59.

3. Adaptation de monstres : transformation, à la lumière d'une certaine théorie nouvelle, d'un contre-exemple en exemple. Cf. mon texte [1963-1964], p. 127 s. Mais « l'adaptation de monstres » faite par Bohr était empiriquement « progressive » : elle prédisait un fait nouveau (l'apparition de la raie 4686 Å dans des tubes qui ne contenaient pas d'hydrogène).

4. Fowler [1913a].

d'un calcul grossier fondé sur l'électron décrivant une orbite autour d'un noyau fixe ; mais, *bien entendu*, l'électron tourne autour de leur centre de gravité commun ; *bien entendu*, comme on le fait quand on traite des problèmes de deux corps, à la masse on doit substituer la masse réduite¹ :

$$m_e' = \frac{m_e}{1 + (m_e/m_n)}$$

Tel est le modèle modifié M_3 de Bohr. Et Fowler lui-même dut admettre que Bohr avait une fois de plus raison².

La réfutation apparente de M_2 se transformait en une victoire de M_3 ; et on voyait clairement que M_2 et M_3 — et peut-être même M_{17} ou M_{20} — se seraient développés à l'intérieur du programme de recherche sans aucune stimulation venant de l'observation ou de l'expérimentation. C'est à cette étape qu'Einstein dit de la théorie de Bohr que « c'est l'une des plus grandes découvertes que l'on ait faites »³.

Le programme de recherche de Bohr se poursuivit alors comme prévu. L'étape suivante consistait à calculer des orbites elliptiques. Sommerfeld le fit en 1915, mais avec ce résultat (inattendu) que le nombre accru d'orbites n'entraînait pas un nombre accru de niveaux d'énergie possibles, de sorte qu'il ne semblait pas y avoir de possibilité d'expérimentation cruciale pour départager la théorie des orbites elliptiques et celle des orbites circulaires. Les électrons tournent cependant à une très grande vitesse autour du noyau ; leur masse devrait donc changer de manière notable quand ils accélèrent si la mécanique d'Einstein est juste. En calculant de telles corrections relativis-

1. Bohr [1913c]. Cette adaptation de monstres était aussi « progressive » : Bohr prédisait que les observations de Fowler devaient être légèrement imprécises et la « constante » de Rydberg avoir une structure fine.

2. Fowler [1913b]. Mais, sceptique, il remarquait que le programme de Bohr n'avait pas encore expliqué les raies du spectre de l'hélium ordinaire, *non ionisé*. Cependant, il abandonna bientôt son attitude sceptique pour collaborer au programme de recherche de Bohr (Fowler [1914]).

3. Cf. Hevesy [1913] : « Quand je lui parlai du spectre de Fowler, les grands yeux d'Einstein me parurent s'agrandir encore et il me dit : "Alors, c'est l'une des plus grandes découvertes que l'on ait jamais faites." »

tes, Sommerfeld obtint en effet un nouvel arrangement des niveaux d'énergie et par là la « structure fine » du spectre.

Passer à ce nouveau modèle relativiste demandait encore plus d'habileté et de talent mathématique que de développer les premiers modèles. La réussite de Sommerfeld fut principalement d'ordre mathématique¹.

Chose curieuse, les doublets du spectre de l'hydrogène avaient été découverts dès 1891 par Michelson². Après la publication du premier article de Bohr, Moseley avait tout de suite fait remarquer qu'« il ne tenait pas compte de la seconde raie plus faible trouvée dans chaque spectre »³. Bohr ne s'en était pas ému : il était sûr que l'heuristique positive de son programme de recherche expliquerait et même corrigerait, *le moment venu*, les observations de Michelson⁴. Et c'est ce qui arriva. La théorie de Sommerfeld était bien sûr incompatible avec les premières versions de celle de Bohr ; les expérimentations sur la structure fine fournirent, avec les anciennes observations corrigées, des éléments de preuve cruciaux en sa faveur. Beaucoup d'échecs des premiers modèles de Bohr furent transformés en victoire de son programme de recherche par Sommerfeld et son école de Munich.

Il est intéressant de noter qu'Einstein commença à se tourmenter et à ralentir ses recherches en 1913, en plein milieu des progrès spectaculaires de la physique quantique ; de même, en 1916, l'inquiétude gagna Bohr dont le travail se fit plus lent ; comme Bohr, face à Einstein, avait pris l'initiative en 1913, Sommerfeld la reprit à Bohr en 1916. Il y avait une différence flagrante entre l'école de Copenhague et celle de Munich :

A Munich, on employait des formulations plus concrètes, donc on se faisait mieux comprendre ; on était parvenu à systématiser les spectres et à utiliser le modèle vectoriel avec succès. Mais à Copenhague, on croyait qu'il restait encore à trouver un langage adéquat pour décrire les nouveaux [phé-

1. Sur les aspects mathématiques, d'une importance vitale pour les programmes de recherche, voir ci-dessus, p. 69 s.

2. Michelson [1891-1892], notamment p. 287-289, qui ne cite même pas Balmer.

3. Moseley [1914].

4. Sommerfeld [1916], p. 68.

nomènes), on était réticent devant des formulations trop définies, on s'exprimait avec plus de précautions et en usant davantage de termes généraux, on était donc plus difficile à comprendre¹.

Notre esquisse montre comment un déplacement progressif peut prêter de la crédibilité — et une logique — à un programme non consistant. Born décrit ce processus avec vigueur dans la notice néo-logique de Planck :

Bien sûr, l'introduction pure et simple du quantum d'action ne signifie pas encore qu'on a édifié une théorie quantique vraie... Les difficultés rencontrées dès le début en cherchant à introduire le quantum d'action dans la théorie classique bien établie ont déjà été indiquées. Elles n'ont fait que croître ; et bien qu'en avançant, la recherche en ait déjà surmonté quelques-unes, les lacunes qui demeurent dans la théorie sont d'autant plus douloureuses pour le physicien théoricien scrupuleux. En fait, ce qui servait de fondement aux lois d'action dans la théorie de Bohr consiste en certaines hypothèses que tout physicien, il y a une génération, aurait sans aucun doute catégoriquement rejetées. Qu'à l'intérieur de l'atome certaines orbites quantifiées (c'est-à-dire choisies selon le principe quantique) jouent un rôle particulier, cela, on pouvait l'admettre ; il était un peu plus difficile d'accepter le postulat suivant, à savoir que les électrons qui tournent sur ces orbites curvilignes, et qui sont donc accélérés, ne rayonnent pas d'énergie. Mais que la fréquence nettement définie d'un quantum de lumière émise soit différente de celle de l'électron qui l'émet, voilà quelque chose de monstrueux, de presque inconcevable pour un théoricien élevé dans l'école classique. Mais ce sont les chiffres [ou plutôt les déplacements progressifs de problèmes] qui décident, et la situation s'en est donc retournée. Alors qu'à l'origine il s'agissait de faire entrer avec le moins de tension possible un nouvel élément, étranger, dans un système existant qui était en règle générale considéré comme fixé, l'intrus, après avoir obtenu une position bien assurée, passe désormais à l'offensive ; dès lors il semble certain qu'il va faire

1. Hund [1961]. Feyerabend [1968-1969], p. 83-87, parle assez longuement de tout cela, mais son article est extrêmement partiel. Il a pour objectif principal de mettre en scène l'anarchisme méthodologique de Bohr et de montrer que celui-ci était opposé à l'interprétation, faite à Copenhague, du nouveau programme quantique (après 1925). Pour ce faire, d'une part Feyerabend insiste trop lourdement sur la gêne de Bohr devant l'incompatibilité de l'ancien programme quantique (avant 1925) et, d'autre part, il donne trop d'importance au fait que Sommerfeld se préoccupait moins que Bohr du caractère problématique des fondements incompatibles de l'ancien programme.

éclater en quelque endroit l'ancien système. Désormais une seule question se pose : en quel point et dans quelles proportions cela va-t-il advenir¹ ?

L'une des choses les plus importantes que nous apprenne l'étude des programmes de recherche est qu'il est relativement peu d'expérimentations qui comptent vraiment. Les mises à l'épreuve et les « réfutations » fournissent d'ordinaire au physicien théoricien un guide heuristique si trivial que cela pourrait bien être une perte de temps que de pratiquer une mise à l'épreuve à grande échelle — ou même de trop se tracasser au sujet des données disponibles. Dans la plupart des cas, nous n'avons pas besoin de réfutations pour savoir que la théorie a grand besoin d'être remplacée : l'heuristique positive du programme, de toute façon, nous entraîne de l'avant. De plus, en donnant une « interprétation réfutable » sérieuse à une version encore dans l'enfance d'un programme, on fait preuve d'une dangereuse dureté méthodologique. Il se peut même que les premières versions ne « s'appliquent » qu'à des cas « idéals » inexistants ; il faudra peut-être des dizaines d'années de travail théorique pour atteindre les premiers faits inédits et plus de temps encore pour parvenir à des versions des programmes de recherche susceptibles d'une intéressante mise à l'épreuve, arrivé au stade où il n'y a plus de réfutation prévisible à la lumière du programme lui-même.

La dialectique des programmes de recherche n'équivaut donc pas nécessairement à une série alternée de conjectures spéculatives et de réfutations empiriques. L'interaction entre le développement du programme et les contrôles empiriques peut prendre des formes très diverses ; le schéma qui se réalise effectivement ne dépend que d'un accident de l'histoire. En voici trois variantes caractéristiques.

1 / Imaginons que chacune des trois premières versions consécutives, H_1 , H_2 , H_3 , prédise certains faits nouveaux avec succès, mais d'autres à tort, c'est-à-dire que chaque version soit successivement corroborée et réfutée. Finalement, on propose H_4 , qui prédit des faits inédits, mais résiste aux épreuves les plus rigoureuses. Le dépla-

1. Born [1948], p. 180, c'est moi qui souligne.

cement de problème est progressif, et nous avons aussi une belle alternance poppérienne de conjectures et de réfutations¹. On l'admira comme un exemple classique de travail théorique et de travail expérimental allant de pair.

2 / Un autre schéma aurait pu consister en un Bohr isolé (peut-être même sans le précédent d'un Balmer) élaborant H_1 , H_2 , H_3 , H_4 , mais très critique envers lui-même, et attendant H_4 pour publier. Alors, H_4 est mis à l'épreuve : tous les éléments de preuve vont se transformer en corroborations de H_4 , première (et unique) hypothèse publiée. On voit ici que le théoricien — travaillant à sa table — est bien en avance sur l'expérimentateur : nous avons là une période de relative autonomie du progrès théorique.

3 / Imaginons maintenant que tous les éléments de preuve empiriques mentionnés dans ces trois schémas soient déjà disponibles au moment de l'invention de H_1 , H_2 , H_3 , H_4 . Dans ce cas, H_1 , H_2 , H_3 , H_4 ne représentent pas un déplacement de problème progressif et, par conséquent, quoique tous les éléments de preuve appuient ses théories, l'homme de science doit continuer à travailler pour prouver la valeur scientifique de son programme². Cet état de choses peut provenir soit de ce qu'un programme antérieur de recherche (contesté par celui conduisant à H_1 , H_2 , H_3 , H_4) a déjà produit tous ces résultats ; soit de ce qu'on a consacré des fonds publics trop importants à réunir des données sur les raies spectrales et que des tâcherons sont tombés sur toutes ces données. Ce dernier cas est cependant fort improbable, car, comme le disait souvent Cullen : « le nombre de faits erronés qui flottent de par le monde dépasse énormément celui des théories erronées »³. Dans la plupart des cas, le programme

1. Dans les trois premiers schémas, nous n'incluons pas des complications telles que lorsqu'on fait appel avec succès contre le verdict des expérimentateurs.

2. Cela montre que si l'on reconstruit rationnellement les mêmes théories et les mêmes éléments de preuve dans des découpages temporels différents, on peut y voir tantôt un déplacement progressif, tantôt un déplacement dégénératif. Cf. aussi Lakatos [1978], chap. 8, p. 178.

3. Cf. McCulloch [1825], p. 19. Pour un argument puissant en faveur de l'extrême improbabilité d'un tel schéma, cf. ci-dessous, p. 98.

de recherche viendra contredire les « faits » disponibles, le théoricien examinera les « techniques expérimentales » de l'expérimentateur et, après avoir démoli, puis remplacé ses théories d'observation, il corrigera ses faits en sorte qu'il en produira par là d'*inédits*¹.

Après cette incursion dans la méthodologie, revenons au programme de Bohr. Ses développements n'avaient pas tous été prévus et planifiés quand Bohr avait ébauché son heuristique positive. Lorsqu'on aperçut de curieuses lacunes dans les modèles raffinés de Sommerfeld (certaines des raies prédites n'apparurent jamais), Pauli proposa une profonde hypothèse auxiliaire (son « principe d'exclusion ») qui ne se contentait pas de rendre compte des lacunes connues, mais reformulait la théorie des couches atomiques dans le système périodique des éléments et annonçait des faits encore inconnus.

Je n'ai pas l'intention de faire ici un compte rendu minutieux du développement du programme de Bohr. Mais son étude détaillée est une véritable mine du point de vue méthodologique : sa progression merveilleusement rapide — sur des fondations incompatibles — est à couper le souffle ; la beauté, l'originalité et la réussite empirique des hypothèses auxiliaires avancées par des hommes de science d'une intelligence éclatante, de génie même, sont sans précédent dans l'histoire de la physique². Parfois, pour passer à la version suivante du programme, il n'a fallu qu'une amélioration triviale, par exem-

1. Peut-être faut-il mentionner qu'une collecte maniaque de données — ainsi qu'une précision « excessive » — empêche même la formation d'hypothèses « empiriques » naïves comme celle de Balmer. Si Balmer avait connu le spectre fin de Michelson, aurait-il jamais trouvé sa formule ? Ou encore, si les données de Tycho Brahé avaient été plus précises, la loi des trajectoires elliptiques de Kepler aurait-elle été avancée ? On peut dire la même chose à propos de la première version naïve de la loi générale des gaz, etc. Il se pourrait que la conjecture de Descartes-Euler sur les polyèdres n'eût jamais été formulée si les données n'avaient pas été si rares ; cf. mon texte [1963-1964], p. 298 s.

2. « Entre la parution de la grande trilogie de Bohr en 1913 et l'advenue de la mécanique ondulatoire en 1925, on a publié un grand nombre d'articles qui développaient les idées de Bohr en une impressionnante théorie des phénomènes atomiques. Ce fut un travail collectif et les noms des physiciens qui y ont participé composent une liste imposante (Bohr, Born, Klein, Rosseland, Kramers, Pauli, Sommerfeld, Planck, Einstein, Ehrenfest, Epstein, Debye, Schwarzschild, Wilson) » (Ter Haar [1967], p. 43).

ple le remplacement de la masse par la masse réduite. Mais il a parfois été nécessaire de faire appel à de nouvelles mathématiques plus complexes, par exemple celles du problème à plusieurs corps, ou à de nouvelles théories physiques auxiliaires raffinées. Ces mathématiques ou cette physique supplémentaires ont été soit tirées d'un domaine du savoir existant (comme la théorie de la relativité), soit inventées (comme le principe d'exclusion de Pauli) ; dans ce dernier cas, nous avons un « déplacement créatif » dans l'heuristique positive.

Mais même ce grand programme en vint à un point où son pouvoir heuristique s'épuisait. Les hypothèses *ad hoc* se multipliaient et ne pouvaient être remplacées par des explications augmentant le contenu. Par exemple, la théorie des spectres moléculaires (de bandes) de Bohr prédisait la formule suivante pour des molécules diatomiques :

$$v = \frac{h}{8 \pi^2 I} [(m+1)^2 - m^2]$$

Mais cette formule fut réfutée. Les disciples de Bohr remplacèrent le terme m^2 par $m(m+1)$, ce qui était en accord avec les faits, mais tristement *ad hoc*.

Ensuite se posa la question de certains doublets inexplicables dans les spectres alcalins. Landé en rendit compte en 1924 par une « règle de dédoublement relativiste » *ad hoc*, Goudsmit et Uhlenbeck en 1925 par le spin de l'électron. Si l'explication de Landé était *ad hoc*, celle de Goudsmit et Uhlenbeck était elle aussi incompatible avec la théorie de la relativité restreinte : des points de la surface du « gros » électron devaient se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière et l'électron devait même être plus grand que l'atome tout entier¹. Il fallait vraiment beaucoup de courage pour proposer cette explication (Kronig avait déjà eu la même idée, mais, la jugeant inadmissible, il renonça à la publier)².

1. Ils écrivent en note : « Il faut observer que [selon notre théorie] la vitesse périodique de l'électron dépasserait considérablement celle de la lumière » (Uhlenbeck et Goudsmit [1925]).

2. Jammer [1966], p. 146-148 et 151.

Mais la fortune ne souriait plus aux audacieux qui proposaient des incompatibilités sauvages. Le programme était à la traîne derrière la découverte de « faits ». Le champ était submergé d'anomalies inassemblables. Avec encore plus d'incompatibilités stériles, encore plus d'hypothèses *ad hoc*, la phase dégénérative du programme de recherche s'était installée ; celui-ci commençait — pour reprendre une des expressions préférées de Popper — « à perdre son caractère empirique »¹. En outre, à l'intérieur du programme, on ne pouvait même pas espérer résoudre de nombreux problèmes, par exemple la théorie des perturbations. Un programme de recherche rival fit bientôt son apparition : la mécanique ondulatoire. Ce nouveau programme ne se contenta pas, même dans sa première version (Louis de Broglie, 1924), d'expliquer les conditions quantiques de Planck et de Bohr, il conduisit aussi à un nouveau fait passionnant, l'expérience de Davisson-Germer. Dans ses versions ultérieures encore plus raffinées, il proposa des solutions à des problèmes restés totalement hors de portée pour le programme de Bohr et expliqua les dernières théories *ad hoc* de Bohr par des théories satisfaisant à des normes méthodologiques élevées. Bientôt la mécanique ondulatoire rattrapa, vainquit et remplaça le programme de Bohr.

L'article de Louis de Broglie parut au moment où le programme de Bohr était en dégénérescence. Mais c'est pure coïncidence. On peut se demander ce qui serait arrivé si Louis de Broglie avait écrit et publié son article en 1914 plutôt qu'en 1924.

1. Pour une description très vivante de cette phase dégénérative du programme de Bohr, cf. Margenau [1950], p. 311-313. Dans la phase progressive d'un programme, le principal stimulus heuristique provient de l'heuristique positive : on néglige grandement les anomalies. Dans la phase dégénérative, le pouvoir heuristique du programme s'épuise. En l'absence d'un programme rival, cette situation peut se refléter dans la psychologie des hommes de science : ils sont beaucoup plus sensibles que d'habitude aux anomalies et ont le sentiment de traverser une « crise » à la Kuhn.

d. *Nouveau regard sur les expériences cruciales : la fin de la rationalité immédiate*

On aurait tort de supposer qu'on doit conserver un programme de recherche jusqu'à l'épuisement de tout son pouvoir heuristique et qu'on ne doit pas avancer un programme rival avant que, de l'avis général, le point de dégénérescence n'ait été probablement atteint. (Bien qu'on puisse comprendre l'irritation d'un physicien confronté, au milieu d'une phase progressive d'un programme de recherche, à une prolifération de vagues théories métaphysiques n'entraînant aucun progrès empirique.)¹ On ne doit jamais permettre à un programme de recherche de devenir une *Weltanschauung* ou une sorte de *rigueur scientifique* se posant en arbitre entre l'explication et la non-explication, comme le fait la rigueur mathématique entre la preuve et la non-preuve. Telle est malheureusement la position que Kuhn est enclin à prôner : ce qu'il nomme « science normale » n'est rien d'autre, à vrai dire, qu'un programme de recherche qui a établi son monopole. En réalité, il est très rare que des programmes de recherche aient établi un monopole total, et ce n'est que pour des périodes relativement brèves, en dépit des efforts déployés par quelques disciples de Descartes, de Newton ou de Bohr. L'histoire des sciences a été et devrait être celle de la rivalité entre programmes de recherche (ou, si l'on veut, entre « paradigmes »), mais elle n'a pas été et ne doit pas devenir une succession de périodes de science normale : plus la compétition commence tôt, mieux cela vaut pour le progrès. Le « pluralisme théorique » est préférable au « monisme théorique » : sur ce point, Popper et Feyerabend ont raison et Kuhn a tort².

1. C'est ce qui doit avoir le plus irrité Newton dans la « prolifération sceptique » de théories due aux cartésiens.

2. Il peut cependant y avoir un certain avantage à ce que quelques personnes au moins restent attachées à un programme de recherche jusqu'à ce qu'il atteigne son « point de saturation » ; un nouveau programme est alors avancé, qu'on défie de rendre compte de tout le succès de l'ancien. Le programme rival peut bien, quand il a été proposé, avoir déjà expliqué toutes les réussites du premier ; mais ce n'est pas un argument : on ne peut

L'idée de programmes de recherche scientifiques concurrents conduit à poser une autre question : comment ces programmes de recherche sont-ils éliminés ? Ce qui précède nous a laissé entendre qu'un déplacement dégénératif de problème ne constitue pas plus une raison suffisante pour éliminer un programme de recherche que ne le fait une « réfutation » démodée ou une « crise » à la Kuhn. Peut-il y avoir la moindre raison objective (par opposition à des raisons socio-psychologiques) de rejeter un programme, c'est-à-dire d'éliminer son noyau dur et son programme d'édification de glaciis protecteurs ? Notre réponse serait, dans ses grandes lignes, qu'une telle raison objective est fournie par un programme de recherche rival qui explique la réussite antérieure du premier et le supplante en déployant un pouvoir heuristique supérieur¹.

Cependant, le critère du « pouvoir heuristique » dépend beaucoup de la manière dont nous concevons la « nouveauté factuelle ». Jusqu'ici, nous avons supposé qu'on peut immédiatement s'assurer si oui ou non une théorie nouvelle prédit un fait inédit². Mais il arrive souvent qu'on ne discerne l'inédit d'une proposition factuelle qu'après un long laps de temps. Pour le montrer, je vais d'abord donner un exemple.

La théorie de Bohr impliquait logiquement comme conséquence la formule de Balmer pour les raies de l'hydrogène³. Était-ce un fait inédit ? On aurait pu être tenté de répondre non, puisque, après tout, la formule de Balmer était bien connue. Mais ce n'est qu'une demi-vérité. Balmer avait simplement « observé » B_1 , à savoir que les

pas prédire comment un programme de recherche se développera ; il peut stimuler pour sa part des théories auxiliaires importantes et imprévisibles qui lui sont propres. Et aussi, si la version A_n d'un programme de recherche P_1 est mathématiquement équivalente à la version A_m d'un programme rival P_2 , on doit les développer toutes les deux : il est toujours possible qu'elles aient des pouvoirs heuristiques très différents.

1. J'emploie ici l'expression « pouvoir heuristique » comme terme technique pour définir le pouvoir que possède ce programme de recherche d'anticiper sur des faits théoriquement inédits au cours de son développement. Je pourrais bien sûr dire « pouvoir explicatif » ; cf. ci-dessus, n. 2, p. 42.

2. Cf. ci-dessus, p. 38 et 64.

3. Cf. ci-dessus, p. 84.

raies de l'hydrogène obéissent à la formule de Balmer. Bohr prédisait B_2 , à savoir que les différences entre les niveaux d'énergie sur les différentes orbites de l'électron d'hydrogène obéissent à la formule de Balmer. Or on peut dire que B_1 contenait déjà tout le contenu « d'observation » de B_2 ; mais cette assertion présuppose qu'il peut exister un pur « niveau d'observation », non entaché par la théorie et insensible à ses changements. En fait, on n'acceptait B_1 que parce que les théories optique, chimique et autres appliquées par Balmer étaient bien corroborées et acceptées comme théories d'observation ; et ces théories pouvaient toujours être discutées. On pourrait soutenir que nous sommes capables de « purger » même B_1 de ses présupposés théoriques pour atteindre ce que Balmer avait réellement « observé », ce qui pourrait s'exprimer par l'assertion plus modeste B_0 , à savoir que les raies émises dans certains tubes dans certaines circonstances bien déterminées (ou au cours d'une expérience contrôlée)¹ obéissent à la loi de Balmer. Or certains des arguments avancés par Popper montrent qu'ainsi nous ne pourrions jamais atteindre aucun sol stable et définitif « d'observation » ; il est facile de montrer que des théories « d'observation » sont impliquées dans B_0 ². D'autre part, étant donné que le programme de Bohr avait démontré son pouvoir heuristique après un long développement progressif, son noyau dur devait lui-même être bien corroboré³, et par

1. Cf. ci-dessus, n. 1, p. 31.

2. L'un des arguments avancés par Popper, [1934], section 27, est particulièrement important : « Selon une croyance répandue, l'énoncé "je vois que cette table est blanche" possède, du point de vue épistémologique, un avantage sérieux sur l'énoncé "cette table-ci est blanche". Pourtant, quand il s'agit d'évaluer les tests objectifs auxquels ils peuvent être soumis, le premier énoncé, qui parle de moi, ne m'apparaît pas plus sûr que le second, qui parle de cette table-ci » (trad. p. 98). Neurath fait un commentaire particulièrement stupide de ce passage : « Pour nous, de tels énoncés protocolaires présentent l'avantage d'avoir plus de stabilité. On peut conserver l'énoncé : "Les hommes du XVI^e siècle voyaient des épées de feu dans le ciel" et supprimer : "Il y avait des épées de feu dans le ciel" » (Neurath [1935], p. 362).

3. Cette remarque définit d'ailleurs un « degré de corroboration » pour les noyaux durs « irréfutables » des programmes de recherche. La théorie de Newton (prise isolément) n'avait pas de contenu empirique, mais elle était, dans ce sens, hautement corroborée.

conséquent reconnu comme théorie « d'observation » ou d'interprétation. Dès lors, on ne considérera plus B_2 comme une simple réinterprétation théorique de B_1 , mais comme un *fait nouveau* de plein droit.

Ces considérations mettent l'accent sur l'élément rétrospectif de nos évaluations et nous conduisent à rendre nos normes plus libérales. Un nouveau programme de recherche, qui vient d'entrer dans la compétition, peut commencer par expliquer des « faits anciens » d'une manière inédite, mais un très long intervalle peut s'écouler avant qu'il soit considéré comme produisant des faits « authentiquement inédits ». Par exemple, la théorie cinétique de la chaleur a semblé pendant des dizaines d'années à la traîne derrière les résultats de la théorie phénoménologique avant qu'elle ne la rattrape en fin de compte en 1905 avec la théorie du mouvement brownien d'Einstein-Smoluchowski. Après quoi, ce qui avait précédemment semblé une réinterprétation spéculative de faits anciens (à propos de la chaleur, etc.) s'est révélé être une découverte de faits inédits (sur les atomes).

Tout cela nous fait penser que nous ne devons pas écarter un programme de recherche naissant parce qu'il n'est pas encore parvenu à supplanter un puissant rival. Nous ne devrions pas l'abandonner s'il constituait un déplacement progressif de problème, à supposer que son rival n'existe pas¹. Et nous devrions certainement considérer un fait qui a reçu une interprétation nouvelle comme un fait nouveau, en refusant de tenir compte de la priorité à laquelle prétendent insolemment les amateurs qui collectionnent les faits. Tant qu'un programme de recherche naissant peut être reconstruit rationnellement sous la forme d'un déplacement progressif de problème, il faut le protéger contre un puissant rival bien établi².

1. D'ailleurs, dans la méthodologie des programmes de recherche, la signification pragmatique du « rejet » [d'un programme] devient claire comme de l'eau de roche : le rejet désigne la décision de cesser de travailler sur ce programme.

2. Certains peuvent considérer — prudemment — cette période protégée du développement comme « pré-scientifique » (ou « théorique ») : ce n'est que lorsqu'elle commence à produire des faits « authentiquement inédits » qu'ils sont prêts à reconnaître

Ces considérations soulignent dans leur ensemble l'importance de la tolérance en méthodologie et laissent sans réponse la question de savoir comment les programmes de recherche sont éliminés. A tant insister sur la faillibilité, le lecteur pourrait même nous soupçonner de rendre nos normes plus libérales, ou plutôt de les assouplir au point d'en venir à un scepticisme radical. Alors, même les célèbres « expériences cruciales » n'auront plus la force de renverser un programme de recherche ; ainsi, tout marche¹.

Mais ce soupçon n'est pas fondé. A l'intérieur d'un programme de recherche, des « expériences cruciales mineures » départageant des versions successives sont tout à fait courantes. L'expérimentation « décide » facilement entre la n° et la $(n+1)^{\circ}$ version scientifique, puisque la $(n+1)^{\circ}$ est non seulement incompatible avec la n° , mais la supplante. Si la $(n+1)^{\circ}$ version possède plus de contenu corroboré à la lumière du *même* programme et des *mêmes* théories d'observation bien corroborées, l'élimination est relativement une affaire de routine (je dis relativement, parce que, même ici, cette décision peut faire l'objet d'un appel). Les procédures d'appel sont parfois faciles elles aussi : dans bien des cas, la théorie d'observation discutée, loin d'être bien corroborée, est en réalité une hypothèse informulée, naïve, « cachée » ; c'est seulement la mise en question qui révèle l'existence de cette hypothèse cachée et conduit à sa formulation, sa mise à l'épreuve et sa chute. Pourtant, il arrive maintes fois que les théories d'observation soient elles-mêmes encadrées dans un certain programme de recherche ; la procédure d'appel provoque alors un conflit entre deux programmes de recherche : dans ces cas-là, nous pouvons avoir besoin d'une « expérience cruciale majeure ».

Lorsque deux programmes de recherche sont en compétition, leurs premiers modèles « idéals » concernent d'ordinaire différents aspects du domaine (par exemple, dans l'optique semi-corpulaire de

son caractère véritablement *scientifique* (ou « empirique »), mais alors ils ne le feront qu'après coup.

1. D'ailleurs, on peut dire à juste titre que ce conflit entre faillibilité et criticisme est le problème majeur — et la force motrice — du programme de recherche de Popper en théorie de la connaissance.

Newton, le premier modèle décrit la réfraction de la lumière, dans l'optique ondulatoire de Huygens, le premier modèle décrit les interférences lumineuses). Lorsque les programmes de recherche rivaux s'étendent, ils empiètent peu à peu l'un sur l'autre et la n^{e} version du premier est incompatible avec la m^{e} version du second d'une manière criante et spectaculaire¹. On réalise une expérimentation à plusieurs reprises et il en résulte que la première théorie perd cette bataille, alors que la deuxième gagne. Mais la guerre n'est pas finie pour autant : un programme peut se permettre quelques défaites de ce genre. Tout ce dont il a besoin pour faire retour, c'est de produire une $(n+1)^{\text{e}}$ ou une $(n+k)^{\text{e}}$ version qui augmente son contenu avec une vérification d'une partie de ce contenu inédit.

Si, après des efforts soutenus, un retour de ce genre ne s'annonce pas, la guerre est perdue et on considère, avec le recul, que l'expérience initiale était « cruciale ». Mais, en particulier si le programme vaincu est un programme jeune, en pleine expansion, et si nous décidons de lui faire suffisamment crédit à cause de ses réussites « pré-scientifiques », les expériences prétendument cruciales se dissolvent l'une après l'autre dans son sillage. Même si le programme vaincu est un programme ancien, bien établi et « fatigué », proche de son « point naturel de saturation »², il peut longtemps se maintenir grâce à des innovations ingénieuses qui augmentent son contenu, même si ces dernières ne sont pas couronnées de succès empirique. Il est très difficile de vaincre un programme de recherche que soutiennent

1. Cas particulièrement intéressant d'une telle concurrence : la symbiose compétitive, qui se produit quand un programme nouveau est greffé sur un programme ancien avec lequel il est incompatible ; cf. ci-dessus, p. 77.

2. Il n'existe rien qui ressemble à un « point de saturation » naturel ; dans [1963-1964], en particulier p. 327-328, j'étais plus hégélien et je pensais qu'un tel point existait ; maintenant j'utilise cette expression entre guillemets, avec ironie. On ne peut prévoir ni fixer de limites à l'imagination des hommes pour inventer des théories nouvelles augmentant le contenu ou à la « base de la raison » (*limit der Vernunft*) pour la couronner de quelque succès empirique, même si elles sont fausses ou même si la nouvelle théorie a moins de vraisemblance — au sens que Popper donne à ce terme — que la précédente. (Il est probable qu'aucune théorie scientifique jamais énoncée par les hommes ne sera vraie : des théories peuvent pourtant être couronnées de succès empiriques et même avoir une vraisemblance croissante.)

des hommes de science pleins de talent et d'imagination. Il se peut aussi que des défenseurs obstinés du programme vaincu proposent des explications *ad hoc* pour les expérimentations ou une astucieuse « réduction » *ad hoc* du programme victorieux au programme vaincu. Mais de tels efforts sont à rejeter comme non scientifiques¹.

Ce que nous venons d'exposer explique pourquoi des expériences cruciales ne semblent telles que des dizaines d'années plus tard. Les ellipses de Kepler ne furent généralement admises comme élément de preuve crucial pour Newton et contre Descartes qu'une centaine d'années après que Newton l'eut affirmé. On savait depuis des dizaines d'années que le comportement anormal du périhélie de Mercure était l'une des difficultés non encore résolues du programme de Newton ; mais c'est seulement parce que la théorie d'Einstein l'explique mieux que ce fait est passé du rang de vulgaire anomalie à celui de brillante « réfutation » du programme de recherche de Newton². Young prétendait qu'avec son expérimentation de 1802 (les « trous d'Young »), il avait réalisé une expérience cruciale départageant, en optique, le programme corpusculaire et le programme ondulatoire, mais on ne reconnut qu'il avait raison que bien plus tard, quand Fresnel eut développé « de façon progressive » le programme ondulatoire et qu'il apparut clairement que les disciples de Newton ne pouvaient égaler ce pouvoir heuristique. L'anomalie, connue depuis des dizaines d'années, ne reçut le titre honorifique de réfutation, l'expérimentation celui d'« expérience cruciale », qu'après une longue période qui vit les deux programmes rivaux se développer de façon inégale. Le

1. Par exemple, cf. ci-dessus, n. 1, p. 53.

2. Ainsi, une anomalie dans un programme de recherche est un phénomène que nous considérons comme devant être expliqué dans les termes du programme. Plus généralement, nous pouvons parler, suivant Kuhn, d'« énigmes » (*puzzles*) : une « énigme » dans un programme est un problème que nous considérons comme un défi à ce programme particulier. Il y a trois façons de la résoudre : en la résolvant dans le cadre du programme original (l'anomalie se transforme en exemple), en la neutralisant, c'est-à-dire en la résolvant dans le cadre d'un programme différent indépendant (l'anomalie disparaît), ou enfin en la résolvant dans le cadre d'un programme rival (l'anomalie se transforme en contre-exemple).

mouvement brownien était resté au cœur du combat pendant presque un siècle avant qu'on ne le vit vaincre le programme de recherche phénoménologique et décider du sort de la guerre en faveur des atomistes. Pendant toute une génération, on refusa de prendre en compte la « réfutation » de la série de Balmer par Michelson, jusqu'à ce que le programme triomphant de Bohr vint l'appuyer.

Il vaut peut-être la peine d'examiner en détail quelques exemples d'expériences dont le caractère « crucial » n'est devenu évident qu'avec le recul. Je parlerai d'abord de la célèbre expérience de Michelson-Morley en 1887, qui, soi-disant, falsifia la théorie de l'éther et « conduisit à la théorie de la relativité », puis aux expériences de Lummer-Pringsheim, qui, soi-disant encore, falsifièrent la théorie classique du rayonnement et « conduisirent à la théorie quantique »¹. Enfin, j'examinerai une expérimentation dont de nombreux physiciens ont cru qu'elle emporterait la décision contre les lois de conservation, mais qui finit en réalité par être leur plus triomphale corroboration.

d1 / L'expérience de Michelson-Morley

Michelson imagina en 1881, lors d'un séjour à l'institut que dirigeait Helmholtz à Berlin, une expérience destinée à mettre à l'épreuve les théories contradictoires de Fresnel et de Stokes sur l'influence du mouvement de la Terre sur l'éther². Selon la théorie de Fresnel, la Terre se meut à travers un éther au repos, mais l'éther intérieur à l'espace terrestre est partiellement emporté par elle dans son mouvement ; cela implique donc que la vitesse relative par rapport à la Terre de l'éther extérieur est positive (il existe donc un « vent d'éther »). Selon la théorie de Stokes, l'éther est entraîné par la Terre, et, juste à la surface terrestre, Terre et éther ont la même vitesse ; la

1. Cf. Popper [1934], section 30.

2. Cf. Fresnel [1818], Stokes [1845] et [1846]. Exposé bref et excellent dans Lorentz [1895].

vitesse relative de l'éther est donc nulle (il n'y a pas de vent d'éther à la surface de la Terre). Initialement, Stokes jugeait les deux théories équivalentes du point de vue de l'observation : par exemple, avec des hypothèses auxiliaires convenables, les deux théories expliquent les aberrations de la lumière. Mais Michelson soutint que son expérience de 1881 était une expérience cruciale départageant les deux théories et *prouvant* celle de Stokes¹. Il affirmait que la vitesse relative de la Terre par rapport à l'éther était bien plus faible que ne le veut la théorie de Fresnel. En fait, selon lui, son expérience « entraîne la conclusion nécessaire que l'hypothèse [d'un éther stationnaire] est erronée. Cette conclusion contredit directement l'explication du phénomène des aberrations qui... présuppose que la Terre se meut dans l'éther, ce dernier restant au repos »². Comme il arrive souvent, un théoricien fit alors la leçon à l'expérimentateur Michelson. Dans ce que Michelson a décrit par la suite comme « une analyse très fouillée... de toute l'expérience »³, Lorentz, le grand homme de la physique théorique à l'époque, montra que Michelson « interprétait mal » les faits et que ce qu'il observait ne contredisait pas, en réalité, l'hypothèse de l'éther stationnaire. Lorentz prouva que Michelson s'était trompé dans ses calculs : la théorie de Fresnel ne prédit que la moitié de l'effet calculé par Michelson ; il en conclut que l'expérience de Michelson ne réfute pas la théorie de Fresnel et qu'elle ne prouve certainement pas davantage celle de Stokes. Lorentz continua en montrant que la théorie de Stokes est incohérente : elle suppose l'éther à la surface terrestre au repos par rapport à la Terre, et exige en même temps que la vitesse relative ait un potentiel — deux conditions qui sont incompatibles. Mais, même si Michelson avait réfuté une certaine théorie de l'éther stationnaire, le programme restait intact : il est facile d'imaginer d'autres versions, qui prédisent des valeurs très faibles pour les vents d'éther et lui, Lorentz, en produisit une sur le champ. Cette théorie était susceptible d'être mise à l'épreuve et

1. Cela transparait, de façon détournée, dans la conclusion de Michelson [1881].

2. *Ibid.*, p. 128, c'est moi qui souligne.

3. Michelson et Morley [1887], p. 335.

Lorentz la soumit fièrement au verdict de l'expérimentation¹. Michelson, en collaboration avec Morley, releva le défi. La vitesse relative de la Terre par rapport à l'éther semblait cette fois encore être nulle, contrairement à la théorie de Lorentz. A cette époque, Michelson était devenu plus prudent dans l'interprétation de ses données et il pensa même à la possibilité que le système solaire se soit déplacé dans son entier dans la direction opposée à la Terre; il décida donc de répéter l'expérience « à des intervalles de trois mois, et d'éviter ainsi toute incertitude »². Dans son deuxième article, Michelson ne parle plus de « conclusions nécessaires » ni de « contradictions directes ». Il pense seulement que selon son expérience « il paraît, d'après tout ce qui précède, raisonnablement certain que, s'il y a un mouvement relatif de la Terre et de l'éther luminifère, il doit être faible; bien assez faible pour réfuter l'explication des aberrations par Fresnel »³. Ainsi, dans cet article, Michelson continue à soutenir qu'il a réfuté la théorie de Fresnel (ainsi que la nouvelle théorie de Lorentz); mais il ne dit pas un mot de ce qu'il soutenait en 1881, à savoir qu'il avait réfuté « la théorie de l'éther stationnaire » en général. (A vrai dire, il pense que pour ce faire il lui faudra mettre aussi à l'épreuve le vent d'éther à haute altitude, « en haut d'un sommet isolé, par exemple ».)⁴

Tandis que certains théoriciens de l'éther, comme Kelvin, ne faisaient pas confiance à « l'habileté expérimentale »⁵ de Michelson, Lorentz remarqua que, malgré les prétentions naïves de Michelson,

1. Lorentz [1886]. Sur l'incompatibilité de la théorie de Stokes, cf. aussi Lorentz [1892*b*].

2. Michelson et Morley [1887], p. 341. Mais Pearce Williams [1968], p. 34, a remarqué qu'il ne le fit jamais.

3. *Ibid.*, p. 341, c'est moi qui souligne.

4. Michelson et Morley [1887]. Cette remarque montre que Michelson s'était bien rendu compte que son expérimentation de 1887 était totalement compatible avec un vent d'éther en altitude. Trente-trois ans après, Max Born [1920] affirme que, de l'expérimentation de 1887, « nous devons conclure que le vent d'éther n'existe pas » (c'est moi qui souligne).

5. Kelvin déclara en 1900 au Congrès international de physique que « le seul nuage dans le ciel pur de la théorie [de l'éther] était le résultat nul de l'expérience de Michelson-Morley » (cf. Miller [1925]) et il persuada immédiatement Morley et Miller, qui étaient présents, qu'ils devaient répéter l'expérience.

même sa nouvelle expérience « ne fournit nul élément de preuve sur la question »¹. On peut parfaitement considérer la théorie de Fresnel comme une théorie d'interprétation, qui, au lieu d'être réfutable par des faits, les interprète, et alors, comme le montre Lorentz, « la signification de l'expérience de Michelson-Morley consiste plutôt dans le fait qu'elle peut nous apprendre quelque chose sur les changements de dimension »²: les dimensions des corps sont modifiées quand ils se meuvent dans l'éther. Lorentz elabora avec une grande ingéniosité ce « déplacement créatif » dans le cadre du programme de Fresnel et soutint qu'il avait ainsi « supprimé la contradiction entre la théorie de Fresnel et le résultat de Michelson »³. Mais il admit que « puisque la nature des forces moléculaires nous est totalement inconnue, il nous est impossible de mettre l'hypothèse à l'épreuve »⁴: pour le moment du moins, elle ne peut pas prédire de faits inédits⁵.

1. Lorentz [1892*a*].

2. *Ibid.*, c'est moi qui souligne.

3. Lorentz [1895].

4. Lorentz [1892*b*].

5. Au même moment, Fitzgerald proposa, indépendamment de Lorentz, une version, susceptible d'être mise à l'épreuve, de son « déplacement créatif », version rapidement réfutée par les expérimentations de Trouton, Rayleigh et Brace; cette version était progressive du point de vue théorique, mais pas du point de vue empirique. Cf. Whittaker [1947], p. 53, et [1953], p. 28-30. On croit généralement que la théorie de Fitzgerald était *ad hoc*. Les physiciens de l'époque voulaient dire qu'elle était *ad hoc*₂ (cf. n. 1, p. 51): c'est dire qu'il n'y avait pas « d'élément de preuve [positive] indépendante » en sa faveur. (Cf. par exemple Larmor [1904], p. 624). Par la suite, sous l'influence de Popper, le terme « *ad hoc* » a surtout été utilisé dans le sens de *ad hoc*₁, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de mise à l'épreuve indépendante possible pour cela. Mais, comme le montrent les expérimentations de réfutation, c'est une erreur de prétendre, comme le fait Popper, que la théorie de Fitzgerald était *ad hoc*₁ (cf. Popper [1954], section 20). Cela montre une fois de plus combien il importe de séparer *ad hoc*₁ et *ad hoc*₂. Quand Grünbaum [1959*a*] lui fit remarquer son erreur, Popper l'admit, mais répliqua que la théorie de Fitzgerald était certainement *plus ad hoc* que celle d'Einstein (Popper [1959*b*]), et que cela donne encore un « excellent exemple des degrés dans la qualité *ad hoc* des énoncés et de l'une des thèses principales de [son] livre: que ces degrés sont en relation (inverse) avec les degrés de possibilité de mise à l'épreuve et de signification ». Mais la différence n'est pas simplement une affaire de degré dans une qualité *ad hoc* unique que l'on peut mesurer par sa possibilité de mise à l'épreuve. Cf. aussi plus loin, p. 125.

Entre-temps, Michelson avait réalisé, en 1897, l'expérience prévue depuis longtemps pour mesurer la vitesse du vent d'éther au sommet d'une montagne. Il fut abasourdi de ne pas trouver de vent, car il pensait avoir prouvé la théorie de Stokes prédisant un vent d'éther à haute altitude. Si, cependant, la théorie de Stokes était correcte, le gradient de vitesse de l'éther devait être très faible. Michelson fut obligé d'en conclure que « l'influence de la Terre sur l'éther s'étendait à des distances de l'ordre du diamètre terrestre »¹. Il estima que c'était un résultat « improbable » et décida qu'en 1887 il avait tiré une conclusion fautive de son expérience : il fallait rejeter la théorie de Stokes et accepter celle de Fresnel ; et il décida d'accepter *n'importe quelle* hypothèse auxiliaire raisonnable pour la sauvegarder, y compris la théorie de Lorentz de 1892². *Désormais*, semblait-il, il donna la préférence à la contraction de Fitzgerald-Lorentz et, en 1904, ses collègues de Case essayèrent de découvrir si cette contraction variait avec les matériaux³.

Tandis que la plupart des physiciens tentaient d'interpréter les expériences de Michelson dans le cadre du programme de l'éther, Einstein, ignorant Michelson, Fitzgerald et Lorentz, mais stimulé essentiellement par la façon dont Mach critiquait la mécanique de Newton, parvenait à élaborer un programme de recherche nouveau et progressif⁴, par lequel il ne se contentait pas de « prédire » et d'expliquer le résultat de l'expérience de Michelson-Morley, mais prédisait aussi tout un ensemble de faits dont on n'avait encore jamais rêvé et qui furent corroborés de façon spectaculaire. C'est alors seulement, après vingt-cinq ans, que l'expérience de Michelson-Morley en vint à être considérée comme « la plus grande expérience négative

1. Michelson [1897], p. 478.

2. En fait, Lorentz [1897] fit immédiatement le commentaire suivant : « Alors que [Michelson] considère comme improbable une influence de la Terre s'étendant si loin, je m'y attendrais au contraire » (les italiques sont de moi).

3. Morley et Miller [1904].

4. On a beaucoup discuté de l'arrière-plan historico-heuristique de la théorie d'Einstein : à cette lumière, cette affirmation-ci pourrait se révéler fautive.

en histoire des sciences »¹. Mais, sur le moment, il aurait été impossible de s'en apercevoir. Quoique l'expérience fût négative, on ne savait pas trop sur quoi portait la négation. Bien plus, en 1881, Michelson avait cru qu'elle était aussi positive : il soutenait avoir *réfuté* la théorie de Fresnel mais *vérifié* celle de Stokes. Michelson lui-même, puis Fitzgerald et Lorentz, expliquaient aussi le résultat positivement dans le cadre du programme de l'éther². Comme pour tous les résultats expérimentaux, sa négativité pour l'ancien programme ne fut établie que *plus tard*, après une lente accumulation de tentatives *ad hoc* pour en rendre compte dans le cadre de l'ancien programme dégénératif et grâce à l'élaboration graduelle d'un nouveau programme *progressif* victorieux, programme dans lequel ce résultat prend une valeur positive. Mais la possibilité de réhabiliter une partie de l'ancien programme « dégénératif » n'a jamais pu être exclue rationnellement.

Seul un processus très difficile et infiniment long permet d'établir qu'un programme de recherche supprime son rival ; et il n'est pas raisonnable d'utiliser inconsidérément le terme d'« expérience cruciale ». Même quand un programme de recherche est balayé par son prédécesseur, ce n'est pas par quelque « expérience cruciale » ; même si par la suite une telle expérience cruciale est mise en doute, le nouveau programme de recherche ne peut alors être interrompu sans que l'ancien programme effectue une puissante remontée progressive³. Le caractère négatif, et l'importance, de l'expérience de Michelson-

1. Bernal [1965], p. 530. Pour Kelvin, en 1905, ce n'était qu'« un nuage dans un ciel pur » : cf. ci-dessus, n. 5, p. 104.

2. En fait, l'excellent manuel de physique de Chwolson disait en 1902 que la probabilité de l'hypothèse de l'éther frisait la certitude. (Cf. Einstein [1909], p. 817.)

3. Polanyi nous raconte avec délectation que Miller annonça en 1925, dans son discours comme président de l'American Physical Society, qu'en dépit des comptes rendus de Michelson et Morley, il avait « des éléments de preuve écrasants » en faveur d'un mouvement relatif de la Terre et de l'éther ; l'auditoire resta pourtant convaincu par la théorie d'Einstein. Polanyi [1958], p. 12-14, en tire la conclusion qu'aucun « cadre "objectiviste" » ne peut rendre compte de l'acceptation ou du rejet de théories par des hommes de science. Mais ma reconstruction fait de la ténacité du programme de recherche d'Einstein confronté à des éléments de contre-preuve un phénomène totalement *rationnel* et s'aperçoit ainsi le message mystique « post-critique » de Polanyi.

Morley tiennent principalement au déplacement progressif dans le nouveau programme de recherche auquel elle est venue prêter main forte et sa « grandeur » n'est que le reflet de la grandeur des deux programmes en jeu.

Il serait intéressant d'analyser en détail les déplacements rivaux impliqués dans le déclin de la théorie de l'éther. Mais, sous l'influence du falsificationnisme naïf, la plupart des partisans d'Einstein ne tiennent pas compte de sa phase dégénérative, la plus intéressante après l'« expérience cruciale » de Michelson. Ils croient que l'expérience de Michelson-Morley a vaincu toute seule la théorie de l'éther, dont la ténacité ne venait que d'un conservatisme obscurantiste. D'autre part, les adversaires d'Einstein n'examinent pas d'un œil critique ce qu'a été la théorie de l'éther après l'expérience de Michelson; ils croient qu'elle n'a pas subi le moindre recul: ce qu'il y a de bon dans la théorie d'Einstein se trouve déjà pour l'essentiel dans la théorie de l'éther de Lorentz et la victoire d'Einstein n'est due qu'à une mode positiviste. En fait, la longue série d'expériences réalisées par Michelson de 1881 à 1935 dans le but de mettre à l'épreuve les versions successives de la théorie de l'éther nous fournit un exemple passionnant de déplacement de problème dégénératif¹. (Les programmes de recherche peuvent pourtant sortir des ornières dégénératives. Il est bien connu que la théorie de l'éther de Lorentz peut facilement être consolidée de manière à devenir équivalente, dans un sens intéressant, à la

1. Je n'étudie pas dans ce chapitre un signe caractéristique de dégénérescence de programme, à savoir la prolifération de « faits » contradictoires. Lorsqu'on utilise une théorie fautive, en tant que théorie d'interprétation, on peut obtenir — sans commettre aucune « erreur expérimentale » — des propositions factuelles contradictoires et des résultats expérimentaux incompatibles. Michelson, qui se cramponna à l'éther jusqu'à la fin, était surtout déçu par l'incompatibilité des « faits » auxquels il arrivait par des mesures ultra-précises. Son expérimentation de 1887 « montrait » qu'il n'y avait pas de vent d'éther à la surface de la Terre, mais l'aberration « montrait » le contraire. Bien plus, sa propre expérimentation de 1925 (qu'on ne mentionne jamais, ou qu'on défigure comme Jaffe [1960]), « prouvait » aussi qu'il y en avait un (cf. Michelson et Gale [1925]; pour une critique acerbe, Runge [1925]).

théorie de la non-existence de l'éther selon Einstein¹. L'éther peut encore faire retour dans le contexte d'un « déplacement créatif » majeur.)²

Il faut du recul pour évaluer des expériences, ce qui explique pourquoi celle de Michelson n'est même pas citée dans les articles parus entre 1881 et 1886. A vrai dire, quand le physicien français Potier fit remarquer à Michelson son erreur de 1881, ce dernier décida de ne pas publier de correction. Il s'en explique en mars 1887 dans une lettre à Rayleigh: « J'ai essayé à de nombreuses reprises d'intéresser mes amis scientifiques à cette expérience, sans succès, et la raison pour laquelle je n'ai jamais publié cette correction (j'ai honte de l'avouer) est que j'étais découragé du peu d'attention accordée à mon travail; je pensais que cela ne valait pas la peine de le faire. »³ Ce texte répond d'ailleurs à une lettre de Rayleigh qui attire l'attention de Michelson sur l'article de Lorentz; elle déclenchera l'expérimentation de 1887. Mais même après 1887, même après 1905, en règle générale, l'expérience de Michelson-Morley ne fut pas considérée comme réfutant l'existence de l'éther et cela avec de bonnes raisons. C'est peut-être pour cela que le prix Nobel fut attribué à Michelson (en 1907), non pour « avoir réfuté la théorie de l'éther », mais pour « ses instruments d'optique de précision et pour les recherches spectroscopiques et méthodologiques menées grâce à eux »⁴; et c'est pourquoi, dans le discours de présentation, l'expérience de Michelson-Morley n'est même pas citée. Michelson, dans son discours de récep-

1. Cf. par exemple Ehrenfest [1913], p. 17-18, cité et discuté par Dorling [1968]. Mais on ne doit pas oublier que deux théories spécifiques, équivalentes du point de vue mathématique (et pour l'observation), peuvent rester encastrées dans deux programmes différents et rivaux, dotés d'une puissance heuristique positive elle aussi différente. Ce point a été négligé par ceux qui proposent de telles preuves d'équivalence (un bon exemple en est la preuve de l'équivalence entre les voies de Schrödinger et de Heisenberg en physique quantique). Cf. aussi ci-dessus, n. 2, p. 95.

2. Cf. par exemple Dirac [1951]: « Si l'on réexamine la question à la lumière des connaissances actuelles, on trouve que l'éther n'est plus exclu par la relativité, et qu'on peut aujourd'hui avancer de bonnes raisons pour en postuler l'existence. » Cf. aussi le paragraphe de conclusion de Rabi [1956] et Prokhovnik [1967].

3. Shankland [1964], p. 29.

4. C'est moi qui souligne.

tion du prix Nobel, n'en fait pas plus mention ; et il garde pour lui le fait que, bien qu'il ait pu, à l'origine, imaginer ses instruments pour mesurer avec précision la vitesse de la lumière, il avait été poussé à les améliorer pour mettre à l'épreuve certaines théories spécifiques de l'éther et que la « précision » de son expérience de 1887 était motivée en grande partie par les critiques théoriques de Lorentz, ce que les ouvrages classiques de l'époque ne mentionnent jamais¹.

Enfin, on a tendance à oublier que même si l'expérience de Michelson-Morley avait montré l'existence d'un « vent d'éther », le programme d'Einstein pouvait néanmoins l'emporter. Lorsque Miller², ardent partisan du programme classique de l'éther, publia son article sensationnel où il prétendait que l'expérience de Michelson-Morley avait été menée avec négligence et qu'il y avait en réalité un vent d'éther, le correspondant de *Science* cria victoire : « Les résultats du professeur Miller jettent complètement à bas la théorie de la relativité. » Selon Einstein, cependant, même si Miller avait rendu compte de l'état réel des choses, « [seule] la forme actuelle de la théorie de la relativité » aurait dû être abandonnée³. Synge a fait remarquer qu'en réalité les résultats de Miller, même pris à leur valeur faciale, ne contredisent pas la théorie d'Einstein ; c'est seulement l'explication qu'en donne Miller qui le fait. Il est facile de remplacer la théorie auxiliaire existante des corps rigides par une théorie nouvelle, celle de Gardner-Syngé, alors les résultats sont complètement assimilés par le programme d'Einstein⁴.

1. Pour sa part, Einstein était enclin à penser que Michelson avait imaginé son interféromètre pour mettre à l'épreuve la théorie de Fresnel (cf. Einstein [1931]). Les premières expérimentations de Michelson sur des raies spectrales — comme celles qu'il décrit dans [1881-1882] — étaient d'ailleurs elles aussi en relation avec les théories de l'éther de son temps. Michelson n'insista sur sa réussite dans le « relevé de mesures précises » que quand il fut déçu de ne pas parvenir à évaluer leur pertinence pour les théories. Quand Einstein, qui n'aimait pas la précision pour elle-même, lui demanda pourquoi il y consacrait tellement d'énergie, Michelson répondit que c'était « parce que cela l'amusa ». (Cf. Einstein [1931].)

2. En 1925.

3. Einstein [1927], c'est moi qui souligne.

4. Synge [1952-1954].

d2 / Les expériences de Lummer-Pringsheim

Nous allons maintenant discuter un autre ensemble d'expériences soi-disant cruciales. Planck a prétendu que les expériences de Lummer et Pringsheim qui, au tournant du siècle, « réfutèrent » les lois du rayonnement thermique de Wien et de Jeans, « conduisirent à » — ou même « provoquèrent » — la théorie des quanta¹. Mais, cette fois encore, leur rôle est beaucoup plus complexe et se situe tout à fait dans notre ligne d'approche. Ce n'est pas seulement que les expériences de Lummer et de Pringsheim ont marqué la fin de la méthode classique, mais que la physique des quanta en a rendu compte avec une grande netteté. D'une part, certaines versions anciennes de la théorie des quanta dues à Einstein entraînent la loi de Wien ; elles sont donc tout autant réfutées par les expériences de Lummer et Pringsheim que la théorie classique². D'autre part, plusieurs explications classiques furent avancées pour la formule de Planck. Par exemple, en 1913, lors de la réunion de la British Association for the Advancement of Science, une séance à part fut consacrée au rayonnement thermique, à laquelle assistaient entre autres Jeans, Rayleigh, J. J. Thomson, Larmor, Rutherford, Bragg, Poynting, Lorentz, Pringsheim et Bohr. Pringsheim et Rayleigh conservèrent une neutralité calculée à propos des spéculations théoriques sur les quanta, mais le professeur Love

se fit le représentant des idées anciennes en maintenant qu'il était possible d'expliquer les faits concernant le rayonnement thermique sans adopter la théorie des quanta. Il critiqua l'application de la théorie de l'équipartition de l'énergie sur laquelle repose une partie de la théorie des quanta. L'élément de preuve qui a le plus de poids en faveur de la théorie des quanta, c'est que la formule de Planck sur le pouvoir émissif d'un corps noir est en accord avec l'expérience. Du point de vue mathématique, beau-

1. Planck [1929], Popper [1934], section 30, trad. fr. p. 108, et Gamow [1966], p. 37, reprennent cette locution. Bien sûr, des énoncés d'observation ne « conduisent » pas à quelque théorie déterminée de manière unique.

2. Cf. Ter Haar [1967], p. 18. Un programme de recherche naissant commence d'ordinaire par rendre compte de « lois empiriques » déjà réfutées, ce qui, dans ma perspective, peut être rationnellement considéré comme un succès.

oup d'autres formules s'accorderaient aussi bien avec l'expérience. On étudia une formule due à A. Kohn, qui donnait des résultats dans un large spectre, et s'accordait aussi bien avec l'expérience que la formule de Planck. En insistant encore que les ressources de la théorie ordinaire ne sont pas épuisées. Love fit remarquer qu'il était possible d'étendre à d'autres cas le calcul de Lorentz sur le pouvoir émissif d'une plaque mince. Pour ce calcul, il n'y a pas d'expression analytique simple qui représente les résultats sur tout le spectre des longueurs d'ondes et il se pourrait bien que dans le cas général il n'y eût pas de formule simple applicable à toutes les longueurs d'onde. Il pourrait bien se faire que la formule de Planck ne soit rien de plus qu'une formule empirique¹.

Callendar proposa une explication classique :

Le désaccord avec l'expérience de la formule bien connue de Wien pour la partition de l'énergie dans l'ensemble du rayonnement thermique s'explique aisément si nous supposons qu'elle ne représente que l'énergie intrinsèque. On trouve facilement la valeur correspondante de la pression par déduction à partir du principe de Carnot, comme l'a indiqué lord Rayleigh. La formule que j'ai proposée (*Phil. Mag.*, octobre 1913) représente seulement la somme de la pression et de la densité d'énergie ainsi obtenue, et s'accorde de façon très satisfaisante avec l'expérience, à la fois pour le rayonnement thermique et pour la chaleur spécifique. Je la préfère à la formule de Planck, entre autres pour la raison qu'on ne peut concilier cette dernière avec la thermodynamique classique et qu'elle implique l'idée d'un *quantum*, ou unité indivisible, d'action, ce qui est impensable. La grandeur physique correspondante dans ma théorie, que j'ai appelée ailleurs une molécule de calorique, n'est pas nécessairement indivisible, mais se trouve dans une relation très simple avec l'énergie intrinsèque d'un atome : c'est tout ce dont on a besoin pour expliquer le fait que le rayonnement thermique peut dans des cas particuliers être émis par unités atomiques qui sont des multiples d'une grandeur particulière².

Ces citations ont peut-être été longues et ennuyeuses, mais elles montrent au moins de façon convaincante l'absence d'expériences immédiatement cruciales. Les réfutations de Lummer et de Pringsheim n'ont pas éliminé les méthodes classiques pour aborder le problème du rayonnement thermique. On décrira mieux la situation en

1. *Nature* [1913-1914], p. 306, c'est moi qui souligne.

2. Callendar [1914].

faisant ressortir que la formule originale *ad hoc* de Planck³ — qui s'accorde bien avec les données de Lummer et Pringsheim (et les corrigés) — pouvait s'expliquer de façon *progressive* dans le cadre du nouveau programme théorique quantique⁴, alors que ni sa formule *ad hoc* ni ses rivales demi-empiriques ne pouvaient s'expliquer dans le cadre du programme classique, sinon au prix d'un déplacement de problème déguisant. D'ailleurs, le développement « progressif » avait pour point le « déplacement créatif » qui s'est produit quand Einstein remplaça la statistique de Maxwell-Boltzmann par celle de Bose-Einstein⁵. Le nouveau développement présente clairement un caractère « progressif » : dans la version de Planck, il prédit correctement la valeur de la constante de Boltzmann-Planck et, dans celle d'Einstein, il prédit une série stupéfiante de faits inédits⁶. Mais,

1. Je me réfère à la formule de Planck [1900a] : dans cet article, il admet qu'après avoir longtemps essayé de prouver que « la loi de Wien doit nécessairement être vraie », on l'a réfutée. Ainsi, il abandonna lui-même la tâche de prouver de sublimes lois éternelles pour passer brusquement à « la construction d'expressions complètement arbitraires ». Mais, bien sûr, toute théorie physique apparaît « complètement arbitraire » selon les normes des justificationnistes. En fait, la formule arbitraire de Planck contredisait, en les corrigant de façon victorieuse, les éléments de preuve expérimentale de son temps. (Planck raconte cette partie de l'histoire dans son autobiographie scientifique.) La formule originale de Planck pour le rayonnement thermique était bien sûr « arbitraire », « formelle », « *ad hoc* », en un sens important : il s'agissait d'une formule assez isolée qui ne faisait pas partie d'un programme de recherche. (Cf. ci-dessous, n. 2, p. 125.) Comme il le dit lui-même : « Même si l'on considère comme établie la validité absolument précise de la formule du rayonnement thermique, tant qu'elle n'a que le statut d'une loi découverte par une intuition heureuse, on ne peut s'attendre qu'elle possède plus qu'une signification formelle. C'est pour cette raison que je commençai le jour même où je formulai cette loi à m'efforcer de lui donner un véritable sens physique » ([1948], p. 41). Mais il importe de « donner à la formule un sens physique » — pas forcément un « véritable sens physique » — principalement parce qu'une telle interprétation conduit souvent à un programme de recherche et à des développements suggestifs.

2. D'abord par Planck lui-même [1900b], un texte « fondateur » du programme de recherche de la théorie des quanta.

3. Planck l'avait déjà fait, mais seulement par inadvertance, comme s'il s'agissait d'une erreur. Cf. Ter Haar [1967], p. 18. À vrai dire, les résultats de Pringsheim et de Lummer ont eu, pour l'un de leurs effets, celui de stimuler l'analyse critique des déductions informelles dans la théorie quantique du rayonnement thermique, déductions chargées de « lemmes cachés » d'importance vitale, qu'on articula seulement par la suite. Dans ce « processus d'articulation », Ehrenfest [1911] fit un pas important.

4. Cf. par exemple la liste donnée par Joffé [1911], p. 347.

avant que, dans l'ancien programme, ne soient inventées des hypothèses auxiliaires nouvelles, mais déplorablement *ad hoc*, avant que le nouveau programme ne se soit pleinement déployé, et avant la découverte de faits nouveaux indiquant un déplacement progressif de problème dans le nouveau programme, la pertinence objective des expérimentations de Lummer-Pringsheim est restée très limitée.

d3 / La désintégration bêta et les lois de conservation

Pour terminer, j'en viens à l'histoire d'une expérience devenue presque, mais pas tout à fait, « la plus grande expérience négative dans toute l'histoire des sciences ». Elle illustre une fois de plus combien il est difficile de déterminer ce que l'expérience nous apprend, ce qu'elle « prouve » et ce qu'elle « réfute ». L'expérience que nous allons examiner de très près est l'observation de la désintégration bêta faite par Chadwick en 1914. Nous verrons comment une expérimentation peut d'abord être considérée comme une énigme de routine à l'intérieur d'un programme, puis se voir quasiment promue au rang d'« expérience cruciale », enfin être rétrogradée jusqu'à représenter une (*nouvelle*) énigme de routine, toutes fluctuations dépendant de l'ensemble d'un paysage théorique et empirique en pleine transformation. Dans la plupart des comptes rendus classiques, on s'est emmêlé dans tous ces changements et on a préféré « arranger » l'histoire¹.

Lorsque Chadwick découvrit en 1914 le spectre continu d'émission de la désintégration radioactive bêta, il ne vint à l'esprit de personne que ce phénomène curieux avait quelque chose à voir avec les lois de conservation. En 1922, deux ingénieuses explications rivales, toutes deux en référence à la physique atomique d'alors, l'une due à Lise Meitner, l'autre à C. D. Ellis, furent proposées. Selon Lise Meitner, les électrons étaient pour une part des électrons primaires

1. Exception partielle notable : le récit de Pauli [1958]. Dans ce qui suit, j'essaie à la fois de corriger l'histoire racontée par Pauli et de montrer qu'il est facile d'en discerner la rationalité dans notre mode d'approche.

appartenant au noyau, pour une autre des électrons secondaires provenant de la couche électronique. Selon C. D. Ellis, tous étaient des électrons primaires. Ces deux théories comportaient des hypothèses auxiliaires sophistiquées, mais prédisaient des faits inédits, qui étaient en contradiction ; le témoignage de l'expérimentation soutint Ellis contre Lise Meitner¹. Lise Meitner fit appel ; la « cour d'appel » expérimentale refusa de la soutenir, mais jugea qu'une hypothèse auxiliaire cruciale de la théorie d'Ellis devait être rejetée². Le résultat de cette contestation fut un match nul.

Personne, pourtant, n'aurait pensé que l'expérience de Chadwick défiait la loi de conservation de l'énergie si, au moment même de la controverse Ellis-Meitner, Bohr et Kramers n'étaient arrivés à l'idée qu'ils ne pouvaient pas développer une théorie cohérente sans renoncer au principe de conservation de l'énergie dans les processus isolés. L'un des principaux traits de cette fascinante théorie de Bohr-Kramers-Slater de 1924 est que les lois classiques de la conservation de l'énergie et du moment étaient remplacées par des lois statistiques³. Cette théorie (ou plutôt ce « programme ») fut immédiatement « réfutée » et aucune de ses conséquences ne fut corroborée ; à vrai dire, elle n'eut jamais un développement suffisant pour rendre compte de la désintégration bêta. Mais, malgré l'abandon immédiat du programme (non seulement à cause de ses « réfutations » par les expériences de Compton-Simon et de Bothe-Geiger, mais aussi à cause de l'apparition d'un puissant rival : le programme de Heisenberg-Schrödinger)⁴, Bohr resta convaincu qu'on aurait finalement à abandonner les lois non statistiques de conservation et qu'on

1. Ellis et Wooster [1927].

2. Meitner et Orthmann [1930].

3. Slater ne participa qu'avec réticence au sacrifice du principe de conservation. Il écrivait en 1964 à Van der Waerden : « Comme vous vous en doutez, l'idée de conservation statistique de l'énergie et du moment fut introduite dans la théorie par Bohr et Kramers, contre ma conviction. » Chose amusante, Van der Waerden [1967], p. 13, fait de son mieux pour exonérer Slater du crime horrible d'être responsable d'une théorie fautive.

4. Popper [1963a], p. 242, a tort quand il suggère que ces « réfutations » étaient suffisantes pour amener la chute de cette théorie.

ne pourrait expliquer la désintégration bêta avant le remplacement de ces lois ; c'est alors qu'on verrait que la désintégration bêta était une expérience cruciale à l'encontre des lois de conservation. Gamow a raconté comment Bohr essaya d'utiliser l'idée de la non-conservation de l'énergie dans la désintégration bêta pour donner une explication ingénieuse de la production d'énergie apparemment éternelle dans les étoiles¹. Seul Pauli, ardent, tel Méphistophélès, à défier le Seigneur, resta conservateur² et, en 1930, il imagina sa théorie du neutrino pour rendre compte de la désintégration bêta et sauvegarder le principe de conservation de l'énergie. Il exposa son idée dans une lettre facétieuse adressée à un colloque réuni à Tübingen, tout en restant lui-même à Zurich pour assister à un bal³. En 1931, il en fit mention pour la première fois, à Pasadena, dans une conférence publique, mais il ne laissa pas publier le texte de cette conférence, parce qu'il « ne se sentait pas assez sûr de lui ». A cette époque (en 1932), Bohr pensait encore qu'on avait, du moins en physique nucléaire, « à renoncer à l'idée même d'équilibre énergétique »⁴. Pauli se décida finalement à publier son exposé sur le neutrino, prononcé à la Conférence Solvay (1933), en dépit du fait qu'il « avait été reçu avec scepticisme par le Congrès, à l'exception de deux jeunes physiciens »⁵. Mais la théorie de Pauli avait certains mérites d'ordre méthodologique. Elle sauvegardait non seulement le principe de la conservation de l'énergie, mais aussi celui de la conservation du spin et de la statistique : elle rendait compte non seulement du spectre de

1. Gamow [1966], p. 72-74. Bohr n'a jamais publié cette théorie (telle quelle, elle n'était pas susceptible d'être mise à l'épreuve), mais « on aurait dit — écrit Gamow — que cela ne l'aurait pas tellement étonné qu'elle fût vraie ». Gamow ne date pas cette théorie restée inédite ; il semble que Bohr s'en occupait en 1928-1929, alors que Gamow travaillait à Copenhague.

2. Cf. l'amusante pièce de théâtre intitulée *Faust* montée en 1932 à l'institut de Bohr ; Gamow l'a publiée en appendice dans [1966].

3. Cf. Pauli [1961], p. 160.

4. Bohr [1932]. Ehtenfest prit lui aussi fait et cause fermement avec Bohr contre le neutrino. La découverte du neutron par Chadwick en 1932 n'ébranla que légèrement leur opposition : ils redoutaient toujours l'idée d'une particule qui ne possédait ni charge ni, peut-être même, masse (au repos), mais seulement un spin « désincarné ».

la désintégration bêta, mais aussi de l'« anomalie de l'azote »¹. Selon les normes de Whewell, cette « concordance d'inductions » aurait dû suffire à établir la respectabilité de la théorie de Pauli. Mais, selon nos critères à nous, il fallait aussi la prédiction réussie de quelque fait inédit. Ce critère était satisfait aussi par la théorie de Pauli, qui avait une intéressante conséquence observable : si la théorie était juste, le spectre bêta devait avoir une limite supérieure bien marquée. A cette époque-là, la question était en suspens, mais Ellis et Mott s'y intéressèrent², et bientôt Henderson, un élève de Mott, montra que l'expérience soutenait le programme de Pauli³. Cela n'impressionna pas Bohr, qui savait que si un programme majeur, fondé sur la conservation statistique de l'énergie, se mettait jamais en marche, le glacis protecteur d'hypothèses auxiliaires prendrait en charge en se développant les éléments de preuve qui paraissaient les plus négatifs.

A vrai dire, la plupart des grands physiciens, en ces années-là, croyaient à l'effondrement, en physique nucléaire, des lois de conservation de l'énergie et du moment⁴. Lise Meitner en avait exposé clairement la raison, n'admettant sa défaite qu'en 1933 : « Toutes les tentatives faites pour maintenir que la loi de conservation de l'énergie est aussi valide pour des processus isolés exigeaient l'existence d'un second processus [dans la désintégration bêta]. Mais ce second processus n'a pas été découvert. »⁵ Autrement dit, le programme de la conservation de l'énergie pour le noyau présentait un déplacement de problème dégénératif du point de vue empirique. On fit diverses tentatives ingénieuses pour rendre compte du spectre continu

1. Discussion passionnante des problèmes ouverts par la désintégration bêta et l'anomalie de l'azote dans la conférence Faraday de Bohr, 1930, prononcée avant, mais publiée après la solution de Pauli (Bohr [1932], notamment p. 380-383).

2. Ellis et Mott [1933].

3. Henderson [1934].

4. Mott [1933], p. 823. Dans un article célèbre [1932] qui proposait le modèle du noyau composé de protons et de neutrons, Heisenberg fit remarquer qu'« à cause de l'effondrement de la conservation de l'énergie lors de la désintégration bêta, on ne peut définir de manière unique l'énergie de liaison de l'électron à l'intérieur du neutron » (p. 164).

5. Meitner [1933], p. 132.

d'émission bêta sans supposer l'existence d'une « particule voleuse »¹. Elles furent discutées avec un vif intérêt², mais abandonnées parce qu'elles ne parvenaient pas à créer un déplacement progressif.

A ce moment-là, Fermi entra en scène. Il réinterpréta en 1933-1934 le problème de l'émission bêta dans le cadre du programme de recherche proposé par la nouvelle théorie des quanta. Il suscita ainsi un nouveau petit programme de recherche sur le neutrino (qui grandit par la suite pour devenir le programme des interactions faibles). Il calcula quelques-uns des premiers modèles, assez sommaires³. Quoique sa théorie ne prédit pas encore le moindre fait nouveau, il fit clairement comprendre que ce n'était qu'une affaire de temps et de travail.

Deux années passèrent et Fermi n'avait toujours pas tenu sa promesse. Mais le nouveau programme de physique des quanta se développait rapidement, dans la mesure du moins où il s'agissait de phénomènes non nucléaires. Bohr se convainquit que certaines des idées fondamentales originales du programme de Bohr-Kramers-Slater étaient désormais solidement encadrées dans le nouveau programme quantique, lequel résolvait les problèmes théoriques intrinsèques de l'ancien programme sans toucher aux lois de conservation ; Bohr suivit donc avec sympathie les travaux de Fermi et, en 1936, dans une suite inhabituelle d'événements, il les soutint publiquement, de manière prématurée selon nos normes.

Cette année-là, Shankland imagina une nouvelle mise à l'épreuve des théories rivales sur la dispersion des photons. Ses résultats semblaient appuyer la théorie écartée de Bohr-Kramers-Slater et mettre en doute la fiabilité des expériences qui l'avaient réfutée plus de dix ans auparavant⁴. L'article de Shankland fit sensation. Ceux d'entre les physiciens qui détestaient la tendance nouvelle acclamèrent immédiatement son expérience. Dirac, par exemple, salua le retour du pro-

1. Par exemple Thomson [1929] et Kudar [1929-1930].

2. Discussion fort intéressante dans Rutherford, Chadwick et Ellis [1930], p. 335-336.

3. Fermi [1933] et [1934].

4. Shankland [1936].

gramme « réfuté » de Bohr-Kramers-Slater ; il écrivit un article très acerbe attaquant la « soi-disant électrodynamique quantique » et exigea « une profonde modification des idées théoriques courantes, qui demandent qu'on s'écarte des lois de conservation [pour] obtenir une mécanique quantitative relativiste satisfaisante »¹. Dans son article, Dirac avance à nouveau l'idée que la désintégration bêta pourrait bien devenir un élément crucial de contre-preuve envers les lois de conservation et il se moque du « neutrino, nouvelle particule inobservable postulée en particulier par certains chercheurs qui tentent de conserver formellement la conservation de l'énergie en supposant que la particule inobservable emporte l'équilibre »². Peierls se joignit tout de suite à la discussion, suggérant que l'expérience de Shankland pouvait réfuter même la conservation statistique de l'énergie. Il ajoutait : « Cela aussi semble satisfaisant, une fois abandonnée la conservation détaillée. »³

Les expériences de Shankland furent immédiatement répétées à Copenhague, à l'institut de Bohr, et écartées, comme l'exposa Jacobsen, un collègue de Bohr, dans une lettre à *Nature*. Les résultats de Jacobsen étaient accompagnés d'une lettre de Bohr lui-même, qui se prononçait fermement contre les rebelles et défendait le nouveau programme quantique de Heisenberg. En particulier, il se prononçait pour le neutrino contre Dirac :

On peut remarquer que les raisons de douter sérieusement que les lois de conservation soient strictement valides dans le problème de l'émission des rayons bêta par les noyaux des atomes sont maintenant dans une grande mesure écartées, grâce à l'accord suggestif entre les éléments expérimentaux de preuve qui s'accumulent rapidement à propos des phénomènes d'émission de rayons bêta et les conséquences des hypothèses de Pauli sur le neutrino, si remarquablement développées dans la théorie de Fermi⁴.

La théorie de Fermi, dans ses premières versions, n'avait pas connu

1. Dirac [1936].

2. *Ibid.*

3. Peierls [1936].

4. Bohr [1936].

de succès empirique frappant. En fait, même les données dont on disposait, tout particulièrement dans le cas du radium E sur lequel on centrait alors les recherches concernant l'émission bêta, contredisaient nettement la théorie de Fermi de 1933-1934. Ce dernier avait l'intention de s'en occuper dans la seconde partie de son article, mais elle ne fut pas publiée. Même en interprétant la théorie de Fermi de 1933-1934 comme la première version d'un programme flexible, on ne pouvait plus en 1936 déceler le moindre signe sérieux d'un déplacement progressif¹. Mais Bohr voulait appuyer de son *autorité* l'application osée que Fermi faisait du grand programme nouveau de Heisenberg sur le noyau ; et, puisque l'expérimentation de Shkunkland et l'attaque de Dirac et Peierls faisaient de la désintégration bêta la cible principale de la critique concernant le grand programme nouveau, il loua exagérément le programme du neutrino de Fermi qui promettait de combler une lacune sensible. Sans aucun doute, les développements ultérieurs épargnèrent une humiliation spectaculaire à Bohr ; les programmes fondés sur les principes de conservation avançaient, alors qu'aucun progrès ne se produisait dans le camp adverse².

1. Plusieurs physiciens proposèrent entre 1933 et 1936 des solutions de rechange ou des modifications *ad hoc* pour la théorie de Fermi ; cf. par exemple Beck et Sitte [1933], Bethe et Peierls [1934], Konopinski et Uhlenbeck [1934], Wu et Moszkowski, [1966] p. 6, écrivent qu'« on sait maintenant que la théorie [c'est-à-dire le programme] de la désintégration bêta de Fermi prédit avec une précision remarquable à la fois la relation entre le taux de désintégration bêta et l'énergie de désintégration, et la forme du spectre bêta ». Mais ils insistent sur le fait qu'« au tout début, la théorie de Fermi fut malheureusement l'objet d'une mise à l'épreuve injuste. Avant que des noyaux radioactifs artificiels pussent être produits en abondance, le radium E était le seul candidat qui remplît parfaitement nombre d'exigences expérimentales en tant que source de rayonnement bêta pour étudier la forme de son spectre. Comment aurions-nous pu savoir alors que le spectre bêta du radium E se trouverait n'être qu'un cas très particulier, dont on n'a en réalité compris le spectre que tout récemment ? Sa façon bizarre de dépendre de l'énergie contredisait ce que faisait prévoir la théorie simple de Fermi pour la désintégration bêta, ce qui ralentit fortement le rythme de la progression initiale de la théorie. »

2. On peut se demander si le programme du neutrino de Fermi était progressif ou dégénératif, même entre 1936 et 1950 ; après 1950, le verdict n'est toujours pas clair comme de l'eau de roche. Mais j'essaierai d'examiner cela à une autre occasion. (Schrödinger [1958] a d'ailleurs soutenu l'interprétation statistique des principes de conservation en dépit de son rôle capital dans le développement de la nouvelle physique quantique.)

La morale de l'histoire est une fois de plus que le statut « crucial » d'une expérience dépend du statut de la compétition théorique dans laquelle elle s'insère. L'interprétation et l'évaluation de l'expérience peuvent changer avec la fortune des camps qui s'affrontent.

Pourtant, notre folklore scientifique est imprégné par des théories de la rationalité immédiate. L'histoire que je viens de raconter est « déformée » dans la plupart des récits et reconstruite dans les termes de quelque théorie erronée de la rationalité. Les meilleurs exposés de vulgarisation eux-mêmes fourmillent de « déformations » de ce genre.

Voici ce qu'un article nous apprend sur la désintégration bêta :

Quand cette situation se présenta pour la première fois, les physiciens furent confrontés à une alternative plutôt sombre. Ils avaient soit à accepter l'effondrement de la loi de conservation de l'énergie, soit à supposer l'existence d'une particule nouvelle, qu'on n'avait jamais vue. Une telle particule, émise en même temps que le proton et l'électron lors de la désintégration du neutron, pouvait sauver le pilier central de la physique en emportant avec elle l'énergie manquante. Cela se passait au début des années 1930, et à cette époque l'introduction d'une nouvelle particule n'était pas chose courante comme aujourd'hui. Néanmoins, après une période d'indécision des plus brèves, les physiciens choisirent le deuxième terme de l'alternative¹.

On étudia bien entendu beaucoup d'autres possibilités, et la période d'indécision ne fut certes pas « des plus brèves ».

Un célèbre manuel de philosophie des sciences nous apprend que : 1 / « la loi (ou principe) de la conservation de l'énergie fut sérieusement mise en question par des expériences sur la désintégration bêta dont le résultat était indéniable » ; 2 / « néanmoins, la loi ne fut pas abandonnée, et on supposa l'existence d'une nouvelle espèce d'entité (appelée "neutrino") pour mettre la loi en accord avec les données expérimentales » ; et 3 / « la logique de cette hypothèse est que le rejet de la loi de conservation aurait privé de sa cohérence systé-

1. Treiman [1959], c'est moi qui souligne.

matique une grande partie de nos connaissances en physique »¹. Mais les trois points sont tous faux. L'énoncé 1 / est faux parce qu'une loi ne peut pas « être sérieusement mise en question » par des expériences seules; l'énoncé 2 / est faux parce qu'on ne fait pas des hypothèses scientifiques nouvelles simplement dans le but de combler des lacunes entre les données et la théorie, mais dans celui de prédire des faits inédits; et l'énoncé 3 / est faux parce qu'à l'époque il semblait que *seul* le rejet de la loi de conservation assurerait la « cohérence systématique » de nos connaissances en physique.

d4 / Conclusion. L'exigence de croissance continue

Il n'existe pas d'expériences cruciales, du moins si on désigne par là des expériences qui peuvent renverser de façon *immédiate* un programme de recherche. En fait, quand un programme de recherche subit une défaite et qu'il est supplanté par un autre, nous pouvons dire, avec un grand recul, qu'une expérience a été cruciale si elle a apporté un exemple de corroboration spectaculaire au programme victorieux et un échec au programme vaincu (en ce sens qu'elle n'a jamais été « expliquée progressivement » — ou, en abrégé, « expliquée »² — à l'intérieur du programme vaincu). Mais, bien entendu, les hommes de science ne sont pas toujours bons juges en matière de situations heuristiques. Un homme de science téméraire peut *prétendre* que son expérience a vaincu un programme et une partie de la communauté scientifique peut même, avec témérité, acquiescer. Mais si un membre du camp « vaincu » avance, quelques années plus tard, une explication scientifique de la prétendue « expérience cruciale » à l'intérieur du (ou en compatibilité avec le) programme prétendument vaincu, le titre honorifique d'expérience cruciale sera retiré et ladite expérience se transformera de défaite en nouvelle victoire pour le programme.

1. Nagel [1961], p. 65-66.

2. Cf. plus haut, n. 2, p. 42.

Les exemples abondent. Au XVIII^e siècle, de nombreuses expériences — c'est un fait historico-sociologique — furent largement acceptées comme éléments « cruciaux » de preuve à l'encontre de la loi de la chute libre de Galilée et de la théorie de la gravitation de Newton. Au XIX^e siècle, il y eut de nombreuses « expériences cruciales » fondées sur des mesures de la vitesse de la lumière qui réfutèrent la théorie corpusculaire et se révélèrent ensuite erronées par rapport à la théorie de la relativité. Ces « expériences cruciales » ont été par la suite supprimées des manuels justificationnistes parce qu'on y a vu un grave défaut de perspicacité, ou même une marque de jalousie. (Elles ont fait leur réapparition dans quelques manuels récents, cette fois pour illustrer l'irrationalité inévitable des modes scientifiques.) Néanmoins, dans les cas où des « expériences cruciales » furent en fait confirmées ultérieurement par la défaite du programme, des historiens ont accusé ceux qui leur résistaient d'être stupides, envieux ou d'aduler de manière injustifiée le père du programme en question. (« Sociologues — ou psychologues — de la connaissance » à la mode ont tendance à expliquer les positions prises en termes purement sociologiques ou psychologiques, alors qu'elles sont en réalité déterminées par des principes de rationalité. On a ainsi expliqué l'opposition d'Einstein au principe de complémentarité de Bohr : « En 1926, Einstein avait 47 ans, et c'est peut-être la force de l'âge, mais pas pour un physicien. »)¹

1. Bernstein [1967], p. 129. Si l'on veut évaluer les éléments de progrès ou de dégénérescence que comportent des déplacements de problèmes rivaux, on doit comprendre les idées en jeu. Mais la sociologie de la connaissance sert souvent de couverture pour cacher efficacement une ignotance crasse : la plupart des sociologues de la connaissance ne comprennent pas les idées, ou même ne s'y intéressent pas ; ils examinent les modèles socio-psychologiques du comportement. Popper a coutume de raconter l'histoire d'un « psychologue social », M. X, qui s'intéressait au comportement de groupe des hommes de science. Dans le but d'étudier la psychologie des sciences, il assista à un séminaire de physique où il observa « l'émergence d'un chef », « l'effet de regroupement » chez certains et la « réaction de défense » chez d'autres, la corrélation entre l'âge, le sexe et l'agressivité de la conduite etc. (M. X prétendait avoir utilisé certaines techniques sophistiquées de statistique moderne sur les petits échantillons). Quand il eut fini son compte rendu enthousiaste, Popper lui demanda : « Quel était le problème discuté par le groupe ? » M. X, tout étonné, répondit : « Quelle question ! Je n'écouterai pas les mots ! De toute façon, qu'est-ce que cela a à faire avec la psychologie de la connaissance ? »

Ces considérations font bien voir que l'idée de rationalité immédiate est utopique. Mais cette idée utopique est la marque distinctive de la plupart des variétés d'épistémologie. Les justificationnistes voudraient que les théories scientifiques fussent prouvées avant même d'être publiées; les probabilistes espéraient qu'une machine indiquerait en un éclair la valeur d'une théorie (son degré de confirmation), étant donné les éléments de preuve; les tenants du falsificationnisme naïf espéraient que l'élimination, au moins, était le résultat immédiat du verdict de l'expérience¹. J'espère avoir montré que toutes ces théories de la rationalité immédiate, et du savoir immédiat, ont échoué. Les études de cas dans cette section montrent que la rationalité opère beaucoup plus lentement que ne le pensent la plupart des gens et que, même ainsi, elle est faillible. La chouette de Minerve vole à la tombée de la nuit. J'espère aussi avoir montré qu'en science la continuité, la ténacité de certaines théories, la rationalité d'une certaine quantité de dogmatisme ne peuvent s'expliquer que si nous interprétons la science comme un champ de bataille où s'affrontent des programmes de recherche plutôt que des théories isolées. On ne comprendra qu'une faible partie de la croissance de la science en ayant, comme paradigme pour une portion de connaissance scientifique, une théorie isolée du type: « Tous les cygnes sont blancs », une théorie qui se tient toute seule à l'écart et ne s'intègre à aucun programme de recherche majeur. Mon exposé implique qu'il y a un nouveau critère de démarcation pour une « science dans sa maturité », consistant en programmes de recherche, et une « science immature », qui suit un simple enchaînement, tout rapetassé, par essais et erreurs². Par exemple, nous pouvons faire une conjecture, la voir réfutée, puis

1. Bien sûr, des tenants du falsificationnisme naïf peuvent avoir besoin d'un certain temps pour arriver au « verdict de l'expérimentation »: celle-ci doit être répétée et examinée d'un œil critique. Mais une fois la discussion achevée sur un accord entre les experts, qui ont ainsi « accepté » un « énoncé de base » et décidé quelle théorie spécifique il heurte, l'adepte du falsificationnisme naïf n'aura guère de patience envers ceux qui continuent à « hésiter ».

2. J'ai amélioré la façon dont je formule cette démarcation dans ce qui suit, alors que ce texte-ci était déjà sous presse, grâce à de précieuses discussions avec Paul Meehl à Minneapolis en 1969.

sauvée par une hypothèse auxiliaire qui n'est pas *ad hoc* aux sens définis antérieurement. Elle peut prédire des faits inédits, dont quelques-uns peuvent même être corroborés¹. Un « progrès » de ce genre peut cependant être réalisé grâce à une série rapetassée et arbitraire de théories sans lien entre elles. Les hommes de science sérieux ne sauraient se satisfaire de tels progrès obtenus grâce à des expédients; ils pourraient même les rejeter comme dépourvus d'une authentique qualité scientifique. Ils diront de ce type d'hypothèses auxiliaires qu'elles sont purement et simplement « formelles », « arbitraires », « empiriques », « semi-empiriques » ou même *ad hoc*².

La science dans sa maturité consiste en programmes de recherche dans lesquels sont prévus non seulement des faits inédits, mais aussi, ce qui est significatif, des théories auxiliaires inédites; la science qui a atteint sa maturité, à la différence du processus piétinant par essais et erreurs, possède un « pouvoir heuristique ». Rappelons-nous que l'heuristique positive d'un programme puissant contient, dès le début, une esquisse générale de la façon dont on construira ses glaciés protecteurs: cette heuristique positive engendre l'autonomie de la science théorique³.

Cette exigence d'une croissance continue, c'est ma reconstruction rationnelle de l'exigence, largement reconnue, d'« unité » ou de

1. Dans [1968b], je distinguais, suivant en cela Popper, deux critères de la qualité *ad hoc*. J'appelais *ad hoc*₁ les théories sans contenu supplémentaire par rapport à celles qui les précédaient (ou à leurs rivales), c'est-à-dire qui ne prédisaient aucun fait inédit; j'appelais *ad hoc*₂ les théories qui prédisaient des faits inédits mais échouaient totalement, non dans leur contenu supplémentaire n'étant corroboré (cf. aussi ci-dessus n. 1, p. 50 et n. 1, p. 51).

2. La formule de Planck pour le rayonnement thermique [1900a] en est un bon exemple: cf. ci-dessus n. 1, p. 113. Nous pouvons appeler *ad hoc*₃ de telles hypothèses qui, tout en n'étant ni *ad hoc*₁ ni *ad hoc*₂, sont tout de même insatisfaisantes au sens spécifié dans le texte. Ces trois utilisations — indubitablement péjoratives — du terme *ad hoc* pourraient fournir une bonne entrée à l'*Oxford English Dictionary*. Il est curieux qu'« empirique » et « formel » soient l'un et l'autre utilisés comme synonymes de notre *ad hoc*₃. Dans un texte brillant [1967], Meehl rapporte qu'en psychologie aujourd'hui — notamment en psychologie sociale — nombre de prétendus « programmes de recherche » consistent en fait en chaînes de stratagèmes *ad hoc*₃ de ce genre.

3. Cf. ci-dessus, p. 70.

« beauté » de la science. Elle fait ressortir la faiblesse de deux types de théorisation, apparemment très différents. En premier lieu, elle montre l'insuffisance de programmes tels que le marxisme ou la psychanalyse freudienne, qui sont certes « unifiés » et présentent les grandes lignes du type de théories auxiliaires qu'ils vont utiliser pour absorber les anomalies, mais qui inventent, à tout coup, leurs véritables théories auxiliaires en réponse aux faits et sans, en même temps, en prédire de nouveaux. (Quel fait inédit le marxisme a-t-il prédit depuis 1917 ?) En second lieu, cette exigence s'attaque aux séries rapetassées sans imagination faites d'adaptations « empiriques » qui piètent, si fréquentes, par exemple, dans la psychologie sociale aujourd'hui. De telles adaptations peuvent bien, à l'aide de ce qu'on appelle des « techniques statistiques », faire certaines prédictions « inédites » et même faire apparaître quelques grains de vérité non pertinents. Mais cette théorisation est sans idée unificatrice, sans pouvoir heuristique, sans continuité. Les théories ne s'additionnent pas pour former un authentique programme de recherche et elles sont, dans l'ensemble, sans valeur¹.

Bien que ma description de la rationalité scientifique soit fondée

1. Après avoir lu Meehl [1967] et Lykken [1968], on se demande si, dans les sciences sociales, les techniques statistiques n'ont pas avant tout pour fonction de fournir un mécanisme qui produit des corroborations factices et, par là, un semblant de « progrès scientifique », quand, en réalité, elles ne font qu'ajouter à la masse des déchets pseudo-intellectuels. Meehl écrit que « dans les sciences physiques, quand on améliore le protocole d'expérience, l'instrumentation ou la masse de données numériques, cela a le plus souvent pour résultat de rendre plus difficile à passer l'obstacle des observations » que la théorie physique qui nous intéresse doit surmonter ; alors qu'en psychologie et dans certaines des sciences du comportement voisines, une telle amélioration de la précision expérimentale a d'ordinaire pour effet de fournir à la théorie un obstacle plus facile à surmonter ». Ou, pour reprendre ce que dit Lykken : « La signification statistique [en psychologie] est peut-être l'attribut le moins important d'une bonne expérimentation ; ce n'est jamais une condition suffisante pour prétendre qu'une théorie a été utilement corroborée, qu'on a établi un fait empirique intéressant, ou qu'un compte rendu d'expérience est digne d'être publié. » Il me semble que la théorisation condamnée par Meehl et Lykken doit être en grande partie *ad hoc*. La méthodologie des programmes de recherche pourrait ainsi nous aider à établir des lois pour endiguer cette pollution intellectuelle qui peut-être détruira notre environnement culturel avant même que la pollution causée par l'industrie et la circulation ne détruise notre environnement physique.

sur celle de Popper, elle s'éloigne de certaines de ses idées générales. J'endosse dans une certaine mesure et le conventionnalisme de Le Roy pour les théories et celui de Popper pour les propositions de base. De ce point de vue, les hommes de science (ainsi que les mathématiciens, comme je l'ai montré)¹ ne font pas preuve d'irrationalité quand ils sont enclins à ne pas tenir compte des contre-exemples ou, comme ils préfèrent les appeler, des cas « récalcitrants » ou « résiduels » ; ils aiment mieux suivre la séquence de problèmes prescrite par l'heuristique positive de leur programme et ils élaborent — et appliquent — leurs théories sans s'en préoccuper². En opposition avec la morale falsificatrice de Popper, les hommes de science soutiennent souvent, et rationnellement, « qu'on ne peut se fier aux résultats expérimentaux ou que les divergences qui existent prétendument entre ces derniers et la théorie ne sont qu'apparentes et disparaîtront quand notre compréhension aura progressé »³. Ce faisant, peut-être n'adoptent-ils pas « exactement le contraire de cette attitude critique qui est [...] celle qui convient à l'homme de science »⁴. Popper a bien raison de souligner que « l'attitude dogmatique qui consiste à rester fidèle à une théorie aussi longtemps que possible a une grande importance. Sans elle, nous ne pourrions jamais découvrir ce que contient une théorie, nous l'abandonnerions avant d'avoir vraiment eu l'occasion de découvrir sa force ; par conséquent, aucune théorie ne serait jamais capable de jouer son rôle pour mettre de l'ordre dans le monde et nous prélever aux événements à venir, d'attirer notre

1. Cf. mon texte [1963-1964].

2. L'asymétrie méthodologique entre énoncés universels et énoncés singuliers disparaît ainsi. Nous pouvons adopter l'un ou l'autre type d'énoncés par convention : dans le « noyau dur », nous décidons d'accepter les énoncés universels, dans la « base empirique » les énoncés singuliers. L'asymétrie logique entre énoncés universels et énoncés singuliers n'est fatale que pour le tenant de l'inductivisme dogmatique qui ne veut apprendre que de la dure expérience et de la logique. Le conventionnaliste peut bien sûr « accepter » cette asymétrie logique ; il n'a pas à être aussi un inductiviste (bien qu'il le puisse). Il « accepte » certains énoncés universels, mais ce n'est pas parce qu'il prétend les déduire (ou les induire) d'énoncés singuliers.

3. Popper [1934], section 9 ; trad. p. 47.

4. *Ibid.*

attention sur des événements qu'autrement nous n'aurions jamais observés¹. Ainsi le « dogmatisme » de la « science normale » ne l'empêche pas de se développer, mais il faut en même temps reconnaître avec Popper qu'il existe une science normale, bonne et progressive, et une science normale, mauvaise et dégénérative, et rester déterminés à éliminer quelques programmes de recherche dans certaines conditions objectivement définies.

En science, l'attitude dogmatique qui expliquerait les périodes de stabilité a été décrite par Kuhn comme un des traits fondamentaux de la « science normale »². Mais le cadre conceptuel dans lequel Kuhn traite de la continuité en science est socio-psychologique : le mien est normatif. Je regarde la continuité en science à travers des « lunettes poppériennes ». Quand Kuhn voit des « paradigmes », je vois aussi des « programmes de recherche » rationnels.

4. LE PROGRAMME DE RECHERCHE DE POPPER

FACE A CELUI DE KUHN

Résumons maintenant la controverse opposant Kuhn à Popper. Nous avons montré que Kuhn a raison d'élever des objections

1. Popper [1940], première note. Remarque semblable dans [1963a], p. 49. Mais ces remarques sont en contradiction *prima facie* avec une partie de ce qu'il avait écrit dans [1934] (cité ci-dessus, p. 30) : on ne peut donc les interpréter que comme indiquant que

contre le falsificationnisme naïf et aussi dans la croissance de la science et sur la *fa* rics scientifiques. Mais il a tort de penser sificationnisme naïf, il s'est ainsi débarrass falsificationnisme. Kuhn trouve à redire au de Popper pris dans son ensemble et il e reconstruction rationnelle de la croissance d une brève comparaison entre Hume, Carn que la croissance de la science est, selon H nelle ; selon Carnap, inductive et rationn inductive et rationnelle¹. On peut élargir en ajoutant que cette croissance est selon tionnelle. Du point de vue de Kuhn, il que de la découverte, mais seulement découverte². Par exemple, pour Kuhn, il y dance d'anomalies et d'incompatibilité « normales », le paradigme dominant fo sance, qu'une « crise » finit par renverse particulière ne provoque l'apparition d'un « crise » est un concept psychologique ; i tagieuse. Ensuite émerge un nouveau « p ble avec le précédent. Il n'y a pas d permettem de les comparer ; chaque para normes. La crise ne balaie pas seuleme anciennes, mais aussi les normes qui ne Le nouveau paradigme entraîne une rati