

Les origines de la formule $\varepsilon = h\nu$, ou comment l'analogie est vecteur de nouveauté

Léna Soler

LPHS — Archives Poincaré, Université de Nancy 2

Résumé. Le présent article s'interroge tout d'abord sur la nature du raisonnement par analogie et sur le fameux 'pouvoir heuristique' dont il est traditionnellement crédité, puis examine la nature des rapports logiques et historiques qui existent entre raisonnement par analogie et apparition de nouveauté radicale en physique. L'exemple de l'introduction, par Planck en 1900, de la fameuse formule $\varepsilon = h\nu$ — aujourd'hui érigée en symbole de la naissance de la physique quantique et obtenue en 1900 par Planck en prenant pour modèle une démonstration antérieure de Boltzmann — est pris comme base de la réflexion. L'on s'emploie notamment à montrer que l'analogie doit son pouvoir heuristique à des contraintes d'un certain type, des contraintes 'systémiques' qui tiennent à la nature du langage dans lequel est exprimée toute théorie physique.

Abstract. The present paper questions the nature of analogical reasoning and its heuristic power, then examines the nature of logical and historical relationships between analogical reasoning and the rise of radical novelty in physics. The analysis will be conducted on the example of Planck's introduction of the famous formula $\varepsilon = h\nu$ in 1900 — today considered as a symbol of the birth of quantum mechanics and obtained by Planck in 1900 by taking one's cue from a demonstration of Boltzmann. I'll try to show that what confers to analogy its heuristic power is a special kind of systemic constraint which proceeds from the nature of the language in which physical theory is expressed.

Je vais dans ce qui suit considérer l'un des aspects les plus étudiés des travaux de Max Planck¹ : la toute première introduction, en 1900, de la fameuse formule $\varepsilon = h\nu$. Comme c'est bien connu, cette formule sera plus tard physiquement interprétée par Einstein comme signifiant la distribution spatiale discrète de l'énergie électromagnétique et la variation par saut de l'énergie des systèmes physiques microscopiques. Son introduction en physique en 1900 est traditionnellement considérée comme marquant la naissance de la physique quantique.

Planck introduit cette formule au terme d'un raisonnement par analogie qui prend pour modèle une démonstration combinatoire élaborée par Boltzmann en 1877. L'épisode est en lui-même bien connu, et d'excellentes analyses historiques en existent [Kuhn 1978], [Darrigol 1992]. Je me propose ici de reconsidérer cet épisode sous un angle philosophique particulier : sous l'angle d'une analyse des contraintes qui pèsent sur la pensée en mouvement de l'homme de science.

Par « contraintes qui pèsent sur la pensée du physicien », j'entends tout ce qui, *du point de vue d'un physicien donné à un moment donné de sa recherche* :

- Soit ne peut *pas ne pas* être pris en compte par la théorie scientifique, c'est-à-dire doit nécessairement être intégré d'une manière ou d'une autre par cette théorie (contraintes *absolument inéliminables*).
- Soit *devrait idéalement* être pris en compte par la théorie, mais apparaît pouvoir être sacrifié à des impératifs supérieurs (à des contraintes plus fortes) au cas où des concessions par rapport à l'idéal, où des compromis entre différentes exigences, semblent inévitables en l'état de l'investigation (contraintes éventuellement éliminables, sacrificables).

Exemple de contraintes : certains résultats expérimentaux que le physicien considéré assimile à des faits cruciaux bien établis dont la théorie se doit absolument de rendre compte ; ou encore, certaines exigences 'esthétiques' auxquelles doit nécessairement satisfaire d'après lui toute théorie physique digne de ce nom. . .

Les définitions précédentes montrent qu'un facteur est contraignant non pas dans l'absolu, mais toujours en référence à *un sujet spécifié* (individu singulier ou groupe d'individus) considéré à *une période temporelle déterminée*.

1. Voir par exemple [Klein 1962] [Klein 1963] [Klein 1966] [Klein, Pinch & Shi-

Aborder l'histoire des sciences sous l'angle des contraintes² qui s'y exercent, consiste à présenter les hypothèses nouvellement émises par un scientifique donné comme des solutions proposées par ce scientifique en vue de satisfaire un réseau généralement complexe de contraintes à spécifier et à caractériser.

Analyser *de manière complète*, sous l'angle des contraintes impliquées, l'introduction en physique par Planck, en 1900, de la formule $\varepsilon = h\nu$, exigerait de reconstituer le réseau de tous les facteurs qui, pris ensemble :

- 1/ ont conduit Planck à décider de mettre en œuvre une démonstration combinatoire discrète analogue à celle de Boltzmann ;
- 2/ ont infléchi la conduite de l'analogie dans certaines directions plutôt que dans d'autres ;
- 3/ ont amené Planck à juger acceptable la démonstration combinatoire produite (et en conséquence à la rendre publique) ;

Le réseau en question apparaît à l'examen extrêmement touffu et enchevêtré, et la justification de la reconstitution proposée exigerait des développements complexes et subtils [Soler 1997]. Mais je m'assigne ici une tâche beaucoup plus modeste : mettre en évidence, à partir d'une analyse très partielle de l'analogie Planck/Boltzmann prise comme exemple et paradigme, l'intervention en physique d'un type bien particulier de contraintes que je qualifierai de 'symboliques' et de 'systémiques'.

L'objectif est de montrer :

- 1/ que l'ordre symbolique (et j'entends par là à la fois le langage verbal et le langage mathématique) génère certaines contraintes qui tiennent à son caractère *systémique*, et
- 2/ que ce sont essentiellement des contraintes de cette espèce qui confèrent à l'analogie, ou au moins à un certain type d'analogie souvent qualifiée de 'formelle', son fameux pouvoir heuristique.

J'ai choisi ici de me focaliser sur de telles contraintes, car si l'on a en philosophie des sciences beaucoup insisté sur d'autres types de facteurs contraignants, telles les contraintes esthétiques ou « thématiques »³, il me semble que l'importance des contraintes symboliques a été comparativement globalement négligée.

2. Pour d'autres tentatives dans cette direction, voir par exemple le débat entre Galison et Pickering dans [Buchwald 1995]

Planck et Boltzmann : deux formulations analogues de l'énoncé général du problème

J'en viens maintenant à la présentation de ceux des éléments de la séquence historique considérée qui sont nécessaires à l'analyse ultérieure de la situation en termes de contraintes. Je vais pour commencer camper le problème général qui se pose à Boltzmann et à Planck à la fin du 19^e siècle.

Chacun des deux physiciens s'intéresse à deux systèmes physiques au premier abord radicalement différents. Boltzmann au gaz, conçu comme un système matériel discret ; Planck au rayonnement, conçu comme un système immatériel continu.

En dépit de cette différence, Boltzmann et Planck formulent leur problème physique fondamental dans des termes globalement analogues.

L'un comme l'autre s'attaque en effet au même type d'énigme : tous deux entendent résoudre la tension qui existe entre irréversibilité des évolutions macroscopiques et réversibilité des processus microscopiques. L'irréversibilité semble à échelle humaine attestée par l'expérience, et elle trouve son expression mathématico-physique dans la seconde loi de la thermodynamique selon laquelle l'entropie augmente toujours jusqu'à devenir stationnaire à l'équilibre. La réversibilité s'exprime quant à elle dans le fait que les lois de la mécanique et de l'électro-magnétisme sont parfaitement symétriques par inversion du temps.

Boltzmann et Planck caractérisent par ailleurs tous deux le champ de phénomènes qu'ils étudient (comportement des gaz et comportement du rayonnement) au moyen de deux niveaux de description : un niveau supérieur ou macroscopique pris en charge par la thermodynamique phénoménologique ; un niveau inférieur ou microscopique, régi dans le cas de Boltzmann par la théorie cinétique des gaz, dans le cas de Planck par l'électromagnétisme de Maxwell. Le problème est, pour Boltzmann comme pour Planck, de trouver une manière de raccorder harmonieusement ces deux niveaux.

L'un comme l'autre des deux physiciens se représente que l'énergie totale du système macroscopique considéré (gaz ou rayonnement) est à chaque instant distribuée d'une certaine manière au niveau microscopique (sur les différentes molécules du gaz ou bien sur les différentes fréquences constitutives du rayonnement) ; l'un comme l'autre entend au départ montrer qu'une distribution initiale quelconque de l'énergie

versible vers une distribution d'équilibre déterminée, à savoir, dans le cas du gaz, la dite distribution de Maxwell, et dans le cas du rayonnement, la distribution qui correspond à la dite loi du rayonnement de Planck.

En résumé :

- Les programmes de recherche de Boltzmann et de Planck ont en commun : un *même objectif*, démontrer l'irréversibilité des lois macroscopiques à partir de lois microscopiques réversibles ; un *même schème à deux niveaux* comme cadre de raisonnement ; une *même théorie* chargée de décrire le niveau supérieur, la thermodynamique ; une *même propriété* centrale des systèmes étudiés : la distribution de l'énergie sur les constituants des micro-systèmes.
- Les programmes de recherche de Boltzmann et de Planck diffèrent : par le type de système étudié (gaz et rayonnement) ; et corrélativement, par le paradigme choisi pour caractériser le niveau microscopique (mécanique discontinue et électrodynamique continue).

Le problème de Planck en décembre 1900

Examinons à présent d'un peu plus près le problème physique qui, en 1900, conduit Planck à mettre en œuvre la démonstration analogique combinatoire de laquelle émerge la fameuse formule $\varepsilon = h\nu$.

Depuis 1895, Planck s'intéresse au rayonnement noir [Planck 1958], c'est-à-dire au rayonnement de toutes fréquences émis dans une cavité aux parois parfaitement absorbantes maintenue à une température T . Son objectif *intermédiaire* est de montrer que tout état initial du rayonnement dans la cavité évolue irrémédiablement vers une loi de distribution d'équilibre déterminée. Toutefois, l'objectif *ultime* et l'enjeu fondamental sont ailleurs à ses yeux.

- L'objectif ultime est de démontrer *en général* que le second principe de la thermodynamique est *absolument valide* (et non pas seulement statistique comme a fini par le conclure Boltzmann) : de montrer que ce principe ne souffre *aucune* exception, que l'entropie est toujours *strictement* croissante jusqu'à sa valeur d'équilibre, et que les systèmes évoluent *toujours irréversiblement* vers un état stationnaire, sans qu'aucun retour en arrière soit possible.
- L'enjeu fondamental coordonné à un tel objectif ultime est de ne pas renoncer à (voire de conforter) une conviction première :

thermodynamique macroscopique, offre une caractérisation *absolue* du monde.

Lorsque Planck s'attaque au dit 'problème du corps noir' en 1895, il se l'approprie d'une certaine manière.

1/ Il introduit les *résonateurs*, nom donné aux entités matérielles qui, au sein de la cavité, interagissent avec le rayonnement. Il faut éviter de se les représenter à travers les systèmes matériels qui les incarneront plus tard, par exemple chez Einstein : le résonateur n'est rien de plus pour Planck qu'un courant d'oscillation localisé caractérisé par une fréquence et une constante d'amortissement déterminées.

Ce qui permet à Planck d'en rester à une caractérisation si superficielle des résonateurs, c'est un théorème de Kirchhoff de 1859 montrant que la loi de rayonnement est une fonction universelle qui dépend uniquement de la fréquence et de la température, mais non des caractéristiques de la cavité dans laquelle se trouve enfermé le rayonnement noir (type de matériau, dimensions, etc.).

Les résonateurs de fréquence voisine sont censés interagir entre eux, et réémettre de ce fait des ondes sphériques de fréquences différentes, amenant ainsi la distribution initiale de l'énergie sur les différentes fréquences du spectre à évoluer de manière *unidirectionnelle* jusqu'à la répartition stationnaire d'équilibre⁴.

2/ Deux lois interviennent de manière centrale dans le programme de recherche de Planck, qui seront mobilisées dans les analyses à venir.

(a) La première n'est pas un apport de Planck. Elle a été démontrée par Wilhelm Wien en 1893, et est connue sous le nom de 'loi de déplacement de Wien', en raison du fait qu'elle montre comment le graphe de l'énergie rayonnante en fonction de la fréquence est 'déplacé' quand varie la température de la cavité noire. Elle n'explicite pas la forme précise de la fonction de distribution de l'énergie du rayonnement noir sur les différentes fréquences, mais restreint les fonctions de distribution possibles. Elle s'énonce en effet comme suit :

$$\rho_\nu = \nu^3 f(\nu/T)$$

où ρ_ν désigne la densité d'énergie rayonnante de l'onde de fréquence ν , T la température, et f une fonction inconnue quelconque. En 1900, la

4. En fait, les résonateurs de Planck n'ont aucun pouvoir de redistribuer l'énergie sur les différentes fréquences, et donc de faire évoluer la distribution jusqu'à l'équilibre. Mais Planck ne se rendra compte de cet état de choses que plus tard, autour de 1906. Ehrenfest en avait fourni la démonstration. Einstein lui soupçonnera très

loi de déplacement est l'un des éléments centraux et bien assurés de la théorie du rayonnement noir.

(b) La seconde loi cruciale est quant à elle spécifiquement introduite par Planck en 1897. Planck souligne lui-même le caractère fondamental de cette relation, qu'il appelle justement son « équation fondamentale ».

Cette équation a pour expression :

$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_\nu d\nu,$$

où u_ν est la densité d'énergie du rayonnement de fréquence ν , U_ν l'énergie moyenne d'un résonateur de fréquence ν , et c la vitesse de la lumière.

Deux caractéristiques confèrent à cette équation une grande valeur et justifient la dénomination de « fondamentale » :

- L'équation ne fait intervenir *que des grandeurs directement accessibles à la mesure* : elle établit entre les grandeurs mesurables caractéristiques du problème (densité spectrale du champ exciteur et énergie moyenne d'un résonateur), une relation dans laquelle n'intervient aucune des grandeurs instantanées (valeur du champ électrique et du moment électrique du résonateur) caractéristiques du niveau microscopique et en l'état de l'investigation inaccessibles à la connaissance humaine.
- L'équation fonctionne *comme une sorte de transformateur symbolique* permettant de passer, de résultats établis pour les résonateurs, à des résultats valant pour le rayonnement. En effet elle corrèle, d'un côté les grandeurs mesurables ayant trait au rayonnement noir, de l'autre les valeurs mesurables relatives aux résonateurs. L'on peut du coup se contenter dans un premier temps de restreindre la plupart des raisonnements au seul système de résonateurs, sachant que l'on pourra dans un second temps convertir les résultats ainsi obtenus en résultats applicables au rayonnement. Une simplification considérable des problèmes en résulte.

L'équation fondamentale ne vaut que sous l'hypothèse du « rayonnement naturel », expression employée par Planck pour désigner le rayonnement pour lequel vaut de manière absolue le second principe.

Quelle est la situation en 1900, année où Planck met en œuvre la démonstration combinatoire analogique ?

L'élément central du problème du corps noir est la loi du rayonne-

rayonnement que la plupart des spécialistes du corps noir admettaient jusque-là, est remise en cause par de nouvelles expériences.

En octobre, Planck propose alors une nouvelle loi du rayonnement. Il semble qu'il ait procédé par tâtonnements, à partir des nouveaux résultats expérimentaux relatifs au domaine de l'infra-rouge, et d'un certain nombre de considérations mi-théoriques mi-esthétiques (considérations de simplicité). Toujours est-il que la nouvelle loi du rayonnement qu'il propose, qui portera désormais son nom, s'avère très vite représenter adéquatement l'ensemble des données expérimentales disponibles.

Seulement, cette loi manque cruellement de fondements théoriques. Et c'est dans le but de la légitimer que Planck en vient à procéder par analogie avec une démonstration combinatoire élaborée par Boltzmann en 1877.

La démonstration combinatoire de Boltzmann

Examinons à présent dans ses grandes lignes la démonstration combinatoire de Boltzmann.

Boltzmann a établi un lien de proportionnalité entre l'entropie S du gaz d'une part, et le logarithme de la probabilité W d'obtenir un état macroscopique donné quelconque d'autre part.

Il s'agit dans la démonstration combinatoire, tout d'abord de déterminer l'expression de la probabilité W , puis, de là, de remonter à la loi de distribution d'équilibre (celle qui correspond à une valeur maximale de l'entropie, c'est-à-dire aussi de la probabilité).

Le principe de la détermination de la probabilité W est basé sur les considérations suivantes. Un même état macroscopique du gaz peut, au niveau microscopique, être réalisé d'un plus ou moins grand nombre de manières, c'est-à-dire correspondre à un nombre plus ou moins grand de répartitions énergétiques différentes possibles sur les molécules. Plus le nombre de micro-états susceptibles de réaliser un macro-état est élevé, plus la probabilité W de ce macro-état est grande.

Boltzmann offre plusieurs versions de sa démonstration : une version *continue* et une version *discrète*.

Dans la version continue, une molécule donnée quelconque du gaz peut à chaque instant posséder n'importe quelle valeur de l'énergie comprise entre zéro et l'énergie moyenne E du gaz. En d'autres termes, toutes

Dans la version discrète simplifiée, celle qui servira quelques années plus tard de modèle à Planck, Boltzmann remplace, en première approximation, l'infinité des valeurs du continuum énergétique E par un nombre fini de valeurs entières. Il découpe ainsi E en p petits éléments ε , et distribue des multiples entiers de cette quantité d'énergie minimale ε sur les molécules du gaz. Chaque molécule, au lieu de recevoir n'importe quelle valeur de l'énergie entre 0 et E comme dans la version continue, ne peut donc plus recevoir qu'une énergie 0, ou ε , ou 2ε , \dots , ou $p\varepsilon$, avec $p\varepsilon = E$.

La version continue est, d'après les déclarations explicites de Boltzmann, supposée correspondre à ce qui a effectivement lieu dans la nature (à ce qui est 'en réalité', 'en fait'). La version discrète est quant à elle présentée comme une sorte de caricature des processus réels, une fiction, un artifice mathématique, plus précisément une *approximation du cas réel*, ayant l'avantage d'être plus simple, « plus claire et plus intuitive » [Boltzmann 1872, 346].

Je n'ai sans doute pas besoin de remarquer que [...] [dans la version discrète] nous n'avons pas ici affaire à un problème physique réel. Ce serait difficile d'inventer un dispositif qui réglerait le choc de deux corps de telle façon qu'après ce dernier, la force vive [i. e. l'énergie cinétique] de chaque corps serait toujours un multiple de ε . [...] Cette hypothèse [la discrétisation] [...] n'est rien censée être d'autre qu'un moyen utile de faciliter le calcul du processus physique. Car à la fin, nous poserons ε infiniment petit et $p\varepsilon$ infiniment grand, de manière à ce que la série [...] des forces vives se transforme en série continue [Boltzmann 1872, 348]⁵.

Le recours aux sommes discrètes est présenté comme une méthode *équivalente* mais plus naturelle et plus facile à saisir que celle qui requiert les intégrales. Les conclusions auxquelles Boltzmann parvient dans son article ne sont donc aucunement tributaires du procédé de discrétisation de l'énergie. Le rapport entre les deux traitements est celui d'une fonction à sa limite mathématique : on retrouve le cas réel en faisant tendre l'élément discret ε vers zéro et le nombre p d'éléments vers l'infini.

Bref, la discrétisation de l'énergie est considérée par Boltzmann comme un traitement mathématique alternatif, commode et susceptible de

5. Du point de vue de Boltzmann, le ε est fini, mais il disparaît néanmoins du résultat final (et conduit ainsi à la distribution continue de Maxwell), du fait que l'on peut le choisir suffisamment petit pour que son influence soit négligeable. Voir plus

faciliter l'interprétation physique, mais ne correspondant à aucun processus physique effectivement réalisé dans la nature.

L'énergie totale du gaz étant fixée, l'état macroscopique du gaz est défini dès qu'est définie ce que Boltzmann appelle une *distribution*. Dans le traitement discret, une distribution correspond à la donnée du nombre de molécules dont l'énergie est nulle, et du nombre de molécules dont l'énergie est ε , et du nombre de molécules dont l'énergie est 2ε , et ainsi de suite jusqu'à $p\varepsilon$, *sans que soit spécifié quelles molécules possèdent quelle énergie*. Une distribution est donc la donnée d'autant de multiples entiers de ε qu'il y a de molécules. J'appellerai ici ces multiples entiers des 'agrégats', et représenterai une distribution en mettant la série des agrégats entre crochets.

Exemple : $[0^3, 3\varepsilon^1, 5\varepsilon^1]$ dénote un cas particulier de distribution, pour un gaz d'énergie totale $E = 8\varepsilon$ constitué de cinq molécules, dans lequel trois molécules ont une énergie nulle, une molécule possède une énergie 3ε , et une molécule une énergie 5ε , sans que l'on sache quelles molécules possèdent quels agrégats.

Chaque macro-état possible (chaque distribution) peut, au niveau microscopique, être réalisée de différentes manières. En effet, les molécules sont des êtres individués discernables. Du coup, la permutation, toutes choses restant égales par ailleurs, de deux agrégats de valeur distincte entre deux molécules M_1 et M_2 , correspond à deux états microscopiques distincts. Boltzmann nomme ces états microscopiques des *complexions*. Une complexion sera représentée ici par la donnée d'une série d'agrégats dont le caractère ordonné sera signalé par des parenthèses.

Exemple : $(0, 0, 0, 5\varepsilon, 3\varepsilon)$ dénote une complexion dans laquelle les molécules M_1 , M_2 et M_3 possèdent toutes trois une énergie nulle, la molécule M_4 a une énergie 5ε , et la molécule M_5 une énergie 3ε . $(0, 0, 0, 3\varepsilon, 5\varepsilon)$ dénote une complexion *différente*, puisque c'est cette fois M_4 qui possède une énergie 3ε et M_5 une énergie 5ε . Chacune de ces deux complexions distinctes précédentes sont des micro-états susceptibles de réaliser le macro-état (la distribution) $[0^3, 3\varepsilon^1, 5\varepsilon^1]$.

Il s'agit, pour chaque macro-état possible, de compter le nombre de micro-états susceptibles de le réaliser. Boltzmann fait l'hypothèse que les mécanismes de collision entre molécules n'aboutissent à privilégier aucune complexion en particulier : toutes les complexions sont alors équiprobables (apparaissent avec la même fréquence d'apparition).

Sous cette hypothèse, le nombre de micro-états réalisant un macro-

gats qui définissent la distribution sur les n molécules du gaz. Diverses techniques mathématiques permettent alors de déterminer l'état le plus probable (à savoir la distribution qui, parce qu'elle est coordonnée au plus grand nombre de complexions, a le plus de chances de survenir).

La loi de distribution correspondant à l'état le plus probable s'avère coïncider avec la loi de distribution de Maxwell ou, plus exactement, avec une version discrète de cette loi : on retrouve le cas réel, c'est-à-dire la loi de distribution continue de Maxwell (et d'une manière générale toutes les formules obtenues dans la version continue de la démonstration combinatoire), quand on fait tendre l'étendue de l'intervalle ε vers zéro, et le nombre p d'éléments d'énergie vers l'infini⁶.

La démonstration combinatoire analogue de Planck

Passons maintenant à la démonstration combinatoire analogue de Planck [Planck 1900], [Planck 1901].

C'est à un groupe de résonateurs de même fréquence que Planck applique la procédure combinatoire boltzmanienne discrète⁷.

Rappelons que Planck cherche à fonder sa loi du rayonnement, c'est-à-dire à démontrer à partir d'arguments théoriques solides que c'est bien cette loi qui vaut à l'équilibre. La loi du rayonnement est déterminée dès lors qu'est déterminée l'expression de l'entropie d'un groupe de résonateurs équifréquence (puisque l'équation fondamentale de Planck permet ensuite, comme on l'a vu, de traduire ce résultat en terme de caractéristiques relatives au rayonnement).

Soit un groupe donné quelconque de N résonateurs, oscillant à la fréquence ν et possédant une énergie totale E . Il s'agit de considérer les différentes manières de distribuer l'énergie E sur les N résonateurs de fréquence ν .

Comme Boltzmann, Planck découpe le continuum énergétique en éléments discrets : $E = P\varepsilon$. Comme Boltzmann, il forme des agrégats (des

6. En fait c'est la vitesse, et non l'énergie, qu'il faut discrétiser pour retrouver la distribution de Maxwell.

7. En fait la situation est plus complexe, mais je me permets de simplifier, dans la mesure où les subtilités mises en jeu ne sont pas fondamentalement pertinentes par

multiples entiers de ε) et les distribue sur les résonateurs. Une complexion (Planck reprend le vocable de Boltzmann) est ainsi définie par l'attribution d'un agrégat spécifié à chaque résonateur spécifié.

Exemple de complexion, pour $N = 10$ et $P = 100$:

$$(7\varepsilon, 38\varepsilon, 11\varepsilon, 0, 9\varepsilon, 2\varepsilon, 20\varepsilon, 4\varepsilon, 4\varepsilon, 5\varepsilon)$$

La notation signifie, selon le même principe que précédemment, que le résonateur R_1 possède l'énergie 7ε , le résonateur R_2 l'énergie 38ε , etc.

Deux complexions distinctes sont générées en permutant les nombres d'éléments d'énergie attribués à deux résonateurs différents (par exemple, en allouant à R_1 38 éléments d'énergie, et à R_2 7 éléments d'énergie, toutes choses restant égales par ailleurs).

Planck, comme Boltzmann, fait l'hypothèse de *l'équiprobabilité des complexions*. Il présente cette hypothèse comme le seul point problématique de sa démonstration, l'élément que les connaissances physiques en vigueur ne permettent pas de justifier.

La théorie des permutations permet alors de calculer le nombre d'états microscopiques (complexions) correspondant à un état macroscopique, et, ainsi, la probabilité W de chaque macro-état⁸. L'état le plus probable peut de là être déterminé. Après quoi, Planck remonte de l'expression de la probabilité correspondant à cet état à la formule de l'entropie S , au moyen de la formule $S = k \ln W$. Enfin il convertit, au moyen de son équation fondamentale, les résultats qui viennent d'être trouvés pour les résonateurs en formules valant pour le rayonnement, et aboutit à la loi du rayonnement suivante :

$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{\varepsilon/kT} - 1}$$

où u_ν est la densité d'énergie du rayonnement de fréquence $d\nu$, T la température, k la constante dite de Boltzmann, et c la vitesse de la lumière.

Pour suivre Boltzmann jusqu'au bout, Planck aurait dû, dans cette formule, faire tendre l'élément ε vers zéro. Mais ce n'est pas ce qu'il fait (nous verrons pourquoi un peu plus loin). Non : il cherche à préciser l'expression de ε en fonction des données de son problème. Présentons les étapes de son calcul avant d'en commenter les résultats et notamment d'examiner les différences avec la procédure boltzmanienne.

8. Le macro-état de Planck présente en fait des différences par rapport à celui de Boltzmann. Mais ce point, qui exigerait pour être précisé un développement assez

- (A) La loi de déplacement de Wien, combinée avec la loi de Kirchoff-Clausius stipulant que u_ν est inversement proportionnelle à c^2 , implique que :

$$u_\nu = \frac{\nu^3}{c^3} f\left(\frac{T}{\nu}\right)$$

où f est une fonction quelconque de T/ν seulement. Cette formule, à son tour combinée avec l'équation fondamentale

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_\nu,$$

mène à l'expression :

$$T = \nu f'\left(\frac{U_\nu}{\nu}\right)$$

où f' est une fonction quelconque de U_ν/ν seulement. Comme, d'après une formule standard de la thermodynamique,

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= \frac{dS}{dU_\nu}, \\ \frac{dS}{dU_\nu} &= \frac{1}{\nu} f''\left(\frac{U_\nu}{\nu}\right) \end{aligned}$$

On obtient en intégrant :

$$S = f'''\left(\frac{U_\nu}{\nu}\right)$$

où f''' est une fonction quelconque de U_ν/ν seulement. Conclusion de Planck : l'entropie d'un résonateur ne dépend que de la seule variable U_ν/ν et de constantes universelles.

- (B) Par ailleurs, la démonstration combinatoire aboutit, pour l'entropie d'un résonateur, à l'expression suivante :

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right\}$$

Il résulte de (A) et (B) pris ensemble que

$$\varepsilon = h\nu$$

où h est une constante.

En remplaçant cette expression de ε dans la formule de u_ν , donnée plus haut, l'on retrouve l'expression de la loi du rayonnement proposée par Planck quelques semaines plus tôt et corroborée par toutes les expériences alors connues (loi que Planck estime manifestement démontrée, sous réserve toutefois de justifier ultérieurement l'hypothèse de l'équiprobabilité des complexions).

Ou plus exactement, l'on aboutit à une expression qui présente une forme générale semblable à celle de la loi du rayonnement de Planck, et dépend d'un paramètre h à ce stade indéterminé. Indéterminé, et que rien dans les considérations précédentes n'empêche d'être nul : le raisonnement de Planck dans la démonstration combinatoire, augmenté des considérations (A) et (B), imposent une loi du rayonnement en h homologue à la loi de Planck, mais ne suffisent en eux-mêmes *pas* à déterminer la valeur de h et notamment à *exclure le cas particulier où h s'annule* (c'est-à-dire ne suffisent pas à exclure, si l'on peut dire en s'autorisant quelque anachronisme, le cas 'non quantique'). Ce sont, comme on va le voir à présent, des conditions *supplémentaires* qui imposent cette exclusion.

Le cas où $h = 0$ correspond à une loi, aujourd'hui appelée loi de Rayleigh-Jeans, qui constitue un cas limite de la loi de rayonnement de Planck, et qui est tout à fait irrecevable en ce que :

- (C) elle ne s'avère empiriquement corroborée *que* dans le domaine des basses fréquences et des hautes températures ; et
- (D) elle conduit à attribuer au rayonnement noir une énergie totale *infinie*⁹.

Les considérations (C) et (D) (ou plus exactement : (C) *ou* (D)) conduisent donc à rejeter, étant admise la formule générale $\varepsilon = h\nu$, le cas particulier correspondant à $\varepsilon = h = 0$.

On comprend que Planck, qui pour suivre Boltzmann jusqu'au bout, aurait dû, comme souligné plus haut, faire tendre l'élément ε vers zéro,

9. Planck était-il conscient de cette conséquence indésirable de la loi de Rayleigh-Jeans correspondant au cas $h = 0$? Ses déclarations explicites ne permettent pas de trancher. Ce sont Einstein et Rayleigh qui, cinq ans plus tard, expliciteront, l'un indépendamment de l'autre — mais pour en tirer des conséquences tout à fait différentes

ne le fasse pas. S'il l'avait fait, il n'aurait pas retrouvé la loi du rayonnement qui porte son nom, celle qu'il cherche justement à démontrer par le biais de la démonstration combinatoire : il aurait bien plutôt aboutit à l'inacceptable loi de Rayleigh-Jeans.

Etant donnés (C) et (D), Planck n'a, pourrait-on dire, *pas le choix* de faire tendre ou de ne pas faire tendre l'élément d'énergie ε (ou le paramètre h) vers zéro. Les données fondamentales — théoriques et expérimentales — constitutives de son problème interdisent à cet élément d'être nul¹⁰. Elles lui imposent même une extension $h\nu$ bien déterminée pour chaque fréquence : Planck calcule en effet la valeur numérique de h à l'aide de résultats expérimentaux récemment obtenus relatifs à la dépendance en fréquence et en température de l'énergie du rayonnement noir.

Rien de tel n'intervenait dans le problème de Boltzmann. Ce problème imposait seulement au ε d'être compris dans une certaine fourchette de valeurs. En effet, ε devait être :

- suffisamment petit pour que les sommes discrètes puissent être transformées en intégrales, et
- suffisamment grand pour contenir un nombre important de molécules, de manière à pouvoir appliquer une certaine formule simplificatrice, dite « de Stirling », dans la procédure visant à rechercher l'état de plus grande probabilité.

La formule $E = p\varepsilon = ph\nu$, comme résultat nécessaire de la rencontre entre deux systèmes symboliques préstructurés

Je voudrais à présent reconsidérer l'épisode historique qui vient d'être présenté du point de vue des contraintes systémiques qui y sont intervenues. L'objectif général est de montrer que le caractère systémique

10. Les données expérimentales sont utilisées pour la détermination de la valeur numérique de la constante h . Elles constituent également l'un des arguments (plus haut noté (C)) pour rejeter le cas particulier $\varepsilon = h = 0$. Notons que s'il pouvait être établi avec certitude que l'argument (D) était connu de Planck, l'on pourrait conclure que ce sont des considérations *exclusivement théoriques* ((démonstration combinatoire) + (A) + (B) + (D)) qui imposent à Planck la formule plus tard dite de la quantification de l'énergie (même si calculer la valeur numérique de h , ou en d'autres termes chiffrer l'extension de l'élément d'énergie, exige de recourir aux résultats expérimentaux

du langage au moyen duquel le physicien traite de la réalité physique est susceptible de générer du nouveau en physique (nouvelles formules, nouvelles idées, etc.).

Précisons pour commencer le sens de l'expression « caractère systémique du langage au moyen duquel le physicien parle de la réalité physique ».

Le physicien vise une réalité, qu'il pense presque toujours comme indépendante de lui-même et de ce qu'il est susceptible d'en dire. Pour caractériser une telle réalité, il en parle, il énonce un certain nombre de choses à son propos. Les énoncés en question sont soit des phrases en mots (des phrases formées à l'aide des termes du langage ordinaire et aussi, en général, de vocabulaires spécialisés); soit des formules mathématiques physiquement interprétées. La physique présuppose donc un langage au sens le plus large du terme (langage verbal et langage mathématique).

Or, qu'est-ce qu'un langage? On peut de manière très générale se risquer à la définition suivante : un langage est un *système de signes* (que les unités signifiantes mises en jeu soient des mots ou des symboles mathématiques : je parlerai de 'système symbolique' pour désigner les diverses possibilités au moyen d'une seule et même expression). L'on a affaire à un *système*, en ce que les signes qui constituent le langage (mots ou symboles mathématiques), ou les composés signifiants de tels signes (phrases ou formules mathématiques), n'ont pas de sens *isolément* (par exemple en vertu d'une correspondance plus ou moins directe avec des états de choses non linguistiques), mais n'acquièrent de signification *qu'en tant qu'ils sont connectés en réseau les uns avec les autres*¹¹. C'est ce qu'illustre le « principe du dictionnaire » dans le cas du langage ordinaire : pour indiquer la signification d'un terme (i. e. pour cerner 'ce que veut dire' ce terme), il faut faire appel à d'autres termes. De même, une phrase ne prend sens que rapportée à beaucoup d'autres avec lesquelles elle entretient des rapports à spécifier.

Un langage est donc davantage assimilable à une sorte de tissu qu'à

11. Pour des conceptions du langage de ce type, voir par exemple : du côté de la linguistique et indépendamment de toute application à la physique [Saussure 1916]; du côté de la philosophie des sciences, avec tentatives pour appliquer à la physique une théorie systémique du langage [Kuhn 1983].

Insister sur le caractère systémique du langage et sur le fait que la signification d'un terme est holistiquement déterminée par la structure du système symbolique, ne revient évidemment pas à nier l'existence de référents extra-linguistiques et à récuser l'existence de liens entre langage et expérience. Pour de plus amples développements

la juxtaposition d'unités séparées autonomes : tout langage peut être vu comme un *nexus* extrêmement complexe, ramifié et très enchevêtré, à l'intérieur duquel la signification d'une unité (signe ou suite de signes) dépend très largement de la situation de cette unité par rapport aux autres unités de la structure d'ensemble.

Or la physique étant, *d'un certain point de vue* (qui, évidemment, n'épuise pas sa nature), un langage, elle peut être caractérisée comme système symbolique, au sens où elle est incontestablement (entre autres choses) un ensemble d'énoncés étroitement interconnectés (énoncés verbaux et formules mathématiques).

Ceci étant admis, je vais maintenant, en vue d'attirer l'attention sur l'existence de contraintes symboliques systémiques en physique et sur le rôle joué par de telles contraintes, traduire en termes de réseau symbolique certains aspects de l'épisode historique qui a été présenté plus haut.

J'appellerai SRN le système symbolique constitué par l'ensemble des énoncés ayant été en 1900 émis à propos du problème du rayonnement noir ; et SRNp, le réseau des énoncés constitutifs du programme de recherche de Planck sur le rayonnement noir en 1900. Les deux systèmes d'énoncés ont évidemment une large intersection non vide : d'une part parce que Planck reprend à son compte un grand nombre d'affirmations physiques sur le rayonnement noir ayant été antérieurement émises par d'autres que lui et étant également admises par la grande majorité des spécialistes du problème corps noir autour de 1900 ; d'autre part parce qu'inversement, un certain nombre d'énoncés physiques élaborés par Planck à propos du problème du corps noir en sont venus à être acceptés par tous les spécialistes et, ainsi, à s'intégrer au système symbolique correspondant à la physique d'alors — c'est notamment le cas de la loi du rayonnement de Planck).

SRNp comporte (entre autres) une série d'énoncés de base (en un sens quasi-popperien du terme : énoncés que Planck admet en l'état de l'investigation comme étant assez directement et sûrement 'imposés par l'expérience'). Pour mentionner quelques-uns des principaux d'entre eux : 'la loi du rayonnement de Planck gouverne effectivement le comportement du rayonnement noir à l'équilibre' ; 'la loi de déplacement de Wien vaut pour le rayonnement noir à l'équilibre' ; 'l'équation fondamentale de Planck s'applique au rayonnement noir' ; etc.

Chacun des énoncés mentionnés fonctionne pour Planck *comme une contrainte absolument inéliminable*, puisque chacun de ces énoncés, tenu

gré par toute théorie physique du corps noir digne de ce nom. Accepter ces divers énoncés comme des contraintes inéliminables, c'est, en même temps, accepter en tant que contraintes inéliminables les liens logiques nécessaires qui existent éventuellement entre ces énoncés (par exemple, la loi du rayonnement présuppose l'équation fondamentale : pour que la première soit vraie, il faut au moins que la seconde le soit aussi). On définit de cette manière le réseau des contraintes coordonnées au fragment de système symbolique SRNp (je me contente ici d'une caractérisation très partielle).

Le principe de la reformulation en terme de système symbolique et de réseaux de contraintes étant indiqué, on peut, de manière similaire, isoler schématiquement, au sein de la physique autour de 1900, un second fragment de système symbolique, qui sera ici désigné par l'expression de 'démonstration combinatoire discrète' et noté SCD.

Procéder à une démonstration combinatoire discrète, signifie mettre en œuvre les trois opérations fondamentales suivantes :

1. Substitution, au continuum correspondant aux valeurs des variables d'état, d'un nombre fini de valeurs discrètes, de multiples entiers d'une unité élémentaire ε
2. Attribution de multiples entiers de ε (plus haut nommés 'agrégats') aux micro-systèmes physiques mis en jeu
3. Dénombrement des combinaisons possibles ainsi générées, sous l'hypothèse de l'équiprobabilité des complexions (compte tenu bien entendu de l'énergie totale et du nombre de micro-systèmes mis en jeu).

Décider, comme Planck, de prendre pour tuteur la démonstration combinatoire de Boltzmann, c'est ériger en contraintes les trois opérations qui viennent d'être spécifiées.

Les deux fragments de systèmes symboliques que sont SRNp et SCD ayant été artificiellement isolés du reste de la physique, l'apparition en physique de la nouvelle formule $\varepsilon = h\nu$ peut être présentée comme le résultat, en un certain sens nécessaire (sens qui sera précisé plus bas), de la rencontre entre deux systèmes préstructurés de contraintes symboliques respectivement associés à SRNp et à SCD¹².

Développons ce point. Dès lors que Planck décide de prendre pour modèle la démonstration combinatoire de Boltzmann, il est tenu d'effec-

12. Bien entendu, cette rencontre est tributaire d'un acte préalable d'extraction de la part du physicien : ici, de la décision de Planck d'extraire SRNp et SCD du système symbolique total de la physique. J'y reviendrai plus loin. Voir la section « contraintes

tuer la division de l'énergie totale en éléments, soit d'accepter (au moins le temps que dure la démonstration combinatoire) la formule $E = p\varepsilon$. De cette opération, émerge le ε . Par ailleurs, la loi de déplacement de Wien, l'équation fondamentale de Planck et un certain nombre d'énoncés déjà mentionnés de SRNp, définissent pour Planck un réseau de contraintes absolument inéliminables. Or ces énoncés de SNRp, combinés, conformément aux règles de la logique, entre eux et avec la nouvelle contrainte¹³ de la discrétisation de l'énergie (mathématiquement : $E = p\varepsilon$), impliquent une nouvelle formule qui est aussi une nouvelle contrainte, à savoir $\varepsilon = h\nu$. Et cette contrainte fait exister le ε beaucoup plus durablement qu'il n'était destiné à exister dans l'optique boltzmanienne, puisqu'ici, comme on l'a vu, le ε , se voyant doté d'une extension déterminée et fixée, ne peut plus être éliminé par passage à la limite.

Le pouvoir inducteur du système symbolique

La description précédente apparaîtra peut-être au lecteur comme une reformulation sur le fond équivalente, et quant à la forme plus lourde, des comptes rendus historiques classiques déjà disponibles de l'épisode scientifique considéré. Cette reformulation me paraît toutefois potentiellement intéressante, en tant que moyen d'attirer l'attention sur certains aspects tout à fait généraux et peu caractérisés du processus de l'élaboration scientifique. C'est ce que je vais à présent m'efforcer de montrer.

Il s'agit de dégager des conséquences *générales* de la description qui vient d'être proposée dans le cas *particulier* de la démonstration combinatoire de la loi du rayonnement de Planck.

La physique est, comme l'a d'ailleurs déjà depuis longtemps souligné Duhem [Duhem 1906] et, plus récemment, Quine [Quine 1951], un système de propositions étroitement interdépendantes, assimilable à une sorte d'organisme où la fonction des parties n'est pas intrinsèquement fixée mais dépend de l'organisation interne du tout. A un moment arrêté du temps, cette organisation d'ensemble est fixée : l'on a donc affaire à une structure en réseau préconstituée, entre les éléments de laquelle sont tissées *d'avance* des relations plus ou moins contraignantes. Dans le cas où ces relations s'identifient à des liens logiques absolument contraignants (ce qui est le cas dans l'exemple plus haut développé), un ensemble donné d'énoncés de départ contient *virtuellement* certaines

13. Nouvelle au sens de (jusqu'à) alors complètement étrangère au problème du corps

conséquences nécessaires, alors même que ces conséquences n'ont encore été effectivement déployées et explicitées par aucun homme de science.

C'est cet état de choses qui est responsable du fait que le système symbolique fonctionne parfois comme une *structure anticipatrice* : le physicien, une fois admises certaines prémisses, se trouve entraîné comme à son insu par cette structure : il progresse de conséquence en conséquence, sans savoir lui-même d'avance où le parcours le conduira, jusqu'à, parfois, se trouver face à des conclusions tout à fait inattendues.

C'est ce qui se produit pour Planck en 1900. Le geste inaugural de Planck à cette époque consiste à mettre en rapport deux structures symboliques auparavant complètement déconnectées l'une de l'autre, SRNP et SCD. Mais une fois ce geste accompli, le $\varepsilon = h\nu$ en résulte quasi-indépendamment de Planck. Planck se retrouve tout à coup, sans l'avoir voulu ni prévu le moins du monde, pourrait-on dire nez à nez avec la formule $\varepsilon = h\nu$, laquelle impose une extension déterminée à l'élément d'énergie pourtant normalement destiné à disparaître par passage à la limite en fin de démonstration combinatoire.

Il me semble que l'on peut généraliser l'exemple de l'analogie Planck-Boltzmann, et affirmer que ce sont essentiellement les contraintes systémiques inhérentes à la structure du langage de la physique qui sont à l'origine du mystérieux pouvoir heuristique traditionnellement reconnu à l'analogie. Vue de cette manière, l'analogie consiste à s'appuyer sur une structure symbolique préexistante, laquelle, du fait qu'elle est un réseau déjà fixé de contraintes *plus ou moins fortement contraignantes*, fonctionne comme un tuteur et 'porte' la pensée, la dirige comme 'de l'extérieur', l'entraîne comme 'malgré elle' et la devance en quelque sorte.

Pour désigner cet état de choses de manière générale, je parlerai du *pouvoir inducteur du tissu symbolique*.

Le pouvoir inducteur du système symbolique peut être entendu en un sens plus large que celui qui se dégage immédiatement de l'exemple de la démonstration combinatoire analogique de Planck.

Dans l'exemple considéré, les contraintes systémiques mises en jeu sont des contraintes logiques absolument contraignantes (au sens où le $\varepsilon = h\nu$ résulte *nécessairement* de la combinaison, conformément aux règles de la logique, d'un certain nombre de formules *préalablement admises*). Mais semblent également souvent intervenir dans l'histoire des sciences des contraintes systémiques plus lâches, des contraintes qui,

certaines conclusions (et non pas : *imposent nécessairement* ces conclusions).

Je prendrai, pour faire saisir dans son principe l'idée de contraintes systémiques non absolument déterminantes, un exemple en lui-même tout à fait trivial. Je précise d'emblée que cet exemple simplifié, quoiqu'il m'ait été *suggéré* par un épisode réel d'histoire des sciences (l'introduction de l'hypothèse des quanta de lumière par Einstein en 1905), ne prétend absolument pas au statut de compte rendu fidèle de l'épisode historique en question. Il n'est qu'un exemple à visée didactique qui présente l'avantage de pouvoir être exposé rapidement.

Considérons un état donné de la physique dans lequel la structure discrète de la matière est considérée comme bien établie par la grande majorité des physiciens, et dans lequel la lumière est corrélativement quasi-unanimement pensée comme une onde continue, détermination d'un milieu autosubsistant lui-même continu, l'éther. Supposons que pour des raisons déterminées mais ici passées sous silence, un physicien en vienne, sur fond de cette configuration symbolique préexistante, à émettre l'hypothèse que l'énergie lumineuse est distribuée de manière discrète dans l'espace.

Dans la configuration considérée, qui dit 'répartition spatiale discrète de l'énergie', pense presque automatiquement 'matière', et, de là, 'entité autosubsistante' et 'entité massique'. Ces connexions sont en effet caractéristiques du système symbolique de la physique d'alors. Du coup, émettre l'hypothèse d'une distribution spatiale discrète de l'énergie lumineuse *incite presque inévitablement* à mettre en rapport les termes 'autosubsistants' et 'massique' avec le terme 'lumière', quant à lui jusque-là intimement associé à une constellation d'attributs tout à fait différente et à divers égards incompatible. L'idée d'une lumière autosubsistante transportant de la masse peut ainsi être considérée comme étant *presque irrésistiblement suggérée* par la structure préexistante du système symbolique, dès lors, bien entendu, qu'a été au préalable établie une première et nouvelle connexion entre 'lumière' et 'discontinu'.

Ce sont des exemples de ce type qui incitent à introduire ce que j'ai appelé des contraintes systémiques *non absolument déterminantes*. (Bien entendu, la structure du système symbolique, si elle fonctionne comme un réservoir de combinaisons nouvelles et suggère de ce fait de nouveaux possibles conceptuels, ne garantit en rien la pertinence physique de ces possibles ; je reviendrai plus bas sur ce point).

J'espère être parvenue à faire saisir ce que j'entends par l'affirmation de l'existence de « contraintes symboliques systémiques ». De telles contraintes systémiques, qui fonctionnent pour la pensée en mouvement du physicien comme un tuteur dont la rigidité est proportionnelle à la force des contraintes en question, peuvent être invoquées (au moins à titre d'*ingrédients parmi d'autres*) pour rendre compte de deux faits touchant à l'histoire des sciences.

1. La *conviction réaliste spontanée* de la plupart des physiciens (et plus largement de tout homme de science, sciences formelles comprises).

L'explication serait du type : parce que la structure symbolique *préexistante* fonctionne comme un tuteur, le scientifique a le sentiment que sa pensée est 'portée' par autre chose qu'elle-même, qu'elle se meut dans un ordre déjà-là ; il n'a du coup pas du tout l'impression que les entités symboliques qui émergent au cours de l'investigation sont le produit d'un acte de construction volontaire ; il est plutôt enclin à croire que ces entités pré-existaient quelque part (dans la nature ou dans un ciel platonicien), qu'elles sont (pour certaines d'entre elles tout au moins) imposés à lui 'de l'extérieur' (en fait : 'du symbolique')¹⁴.

14. D'aucuns seront peut-être tentés d'objecter (et je remercie ici un rapporteur anonyme d'avoir attiré mon attention sur ce point) que le fait, sur lequel j'insiste plus loin, que l'induction symbolique n'est pas nécessairement génératrice de *vérités* mais engendre aussi souvent *du faux*, affaiblit, voire invalide, l'hypothèse ici avancée d'un lien entre réalisme spontané des physiciens et rôle tuteur des structures symboliques.

Pourtant, il me semble à la réflexion qu'il n'en est rien. En effet, le sentiment que peut avoir un physicien singulier à un moment donné, selon lequel sa pensée est comme portée et soumise à des contraintes extérieures, et qui l'incite à considérer certaines entités comme 'réelles', *est dans une large mesure indépendant du destin ultérieur des entités physiques considérées*, en particulier du statut ('à conserver'/'à rejeter' ; 'correspondant à des entités réellement existantes' / 'se réduisant à des fictions utiles ou modèles' ; etc.) qui sera conféré à ces entités après discussion et échanges critiques au sein de la communauté scientifique (ces discussions faisant en général appel à des arguments *d'une tout autre nature* que les considérations analogiques unanimement reconnues suggestives mais logiquement non valides et donc en principe non probantes). Le sentiment que *telle ou telle entité* ayant émergé par analogie au cours de la recherche n'est pas une libre création de l'esprit, issu selon mon hypothèse de la résistance de la structure du tissu symbolique, est un sentiment *individuel et temporellement situé* qui est *parfaitement réversible* et qui se trouve de fait souvent renversé. Il sera par exemple annulé ou très atténué, pour un homme de science donné, si celui-ci est finalement conduit, après échanges d'arguments, à juger faux les énoncés mentionnant l'entité considérée qui lui apparaissaient tout d'abord hautement probables. Mais le revirement portera alors sur l'existence de *cette entité particulière*, et non pas sur celle de *toute* entité susceptible d'être suggérée par

2. Les dites « *découvertes simultanées* » (ou tout au moins certaines d'entre elles). On dit souvent que l'idée était 'dans l'air'. Il serait plus juste d'affirmer qu'elle était jusqu'à un certain point 'dans le symbolique', au sens où la configuration du système symbolique de référence incitait fortement à la formuler.

Contraintes systémiques et contraintes esthétiques

Ceci étant dit, je m'empresse de préciser que je n'entends évidemment pas réduire la créativité du physicien et l'innovation scientifique en général au pouvoir inducteur du système symbolique¹⁵.

J'ai tenu à insister sur le caractère systémique et donc inducteur du symbolique, car les conséquences de cet état de choses me semblent importantes d'un point de vue épistémologique et me paraissent souvent minimisées dans l'analyse de la créativité scientifique. Mais il ne s'agit pas de tomber dans l'excès inverse, de faire comme si la structure symbolique prédéterminait complètement, à l'insu du physicien, toute l'élaboration.

l'existence de *telle entité*, non la conviction réaliste *en général* elle même.

L'on pourrait certes objecter qu'à force de répétition d'un tel scénario, à force de constater que telle ou telle idée suggérée par analogie, qui avait au moment de son émergence semblé 'imposée de l'extérieur', s'avère à l'examen devoir être rejetée, le physicien conséquent se devrait de conclure, en quelque sorte par induction, que ses convictions réalistes spontanées liées à l'analogie ou plus généralement aux contraintes symboliques, aussi fortement ancrées soient-elles d'un point de vue psychologique, ne sont en fait pas fiables.

Mais l'objection ne nous semble pas convaincante. Car d'une part, les idées suggérées du fait du pouvoir inducteur du tissu symbolique sont aussi *parfois retenues*, et ces réussites paraissent impressionner les esprits plus fortement que les cas d'échec. Et car, d'autre part et surtout, c'est comme si l'on arguait que les remises en causes successives des théories en vigueur devraient rendre les physiciens conséquents extrêmement méfiants vis-à-vis du réalisme, voire hostiles à tout engagement réaliste. Or les théories physiques ont, de fait, été continuellement et parfois radicalement remises en cause au fur et à mesure de leur histoire, sans que ceci entame pour autant la conviction réaliste spontanée de la plupart des physiciens.

15. J'entends ici « innovation scientifique » au sens large : au sens de l'apparition de nouveautés (nouvelles idées, nouvelles formules physiques...), indépendamment de la question de savoir si ces nouveautés seront ensuite retenues comme 'vraies' ou rejetées comme 'fausses' par la communauté des spécialistes. Le rapport entre innovation scientifique (en ce sens large) issue d'un raisonnement par analogie, et pertinence physique ('justesse' 'vérité' ...) des innovations formelles ou conceptuelles

Car le symbolique n'est évidemment pas un système clos sur lui-même qui croîtrait et se transformerait de manière autonome. S'il y a bien, étant données certaines prémisses, des séquences symboliques quasi-automatiques ou, à défaut, des associations très fortement suggérées à partir des possibilités combinatoires offertes, ces séquences sont encadrées, en amont et en aval, par des décisions du physicien : en amont, par la décision d'accepter ou de mettre en œuvre les prémisses¹⁶ ; en aval, par la décision d'accepter les conclusions obtenues comme significatives, dignes d'intérêt, etc. (j'ai dit plus haut que l'émergence de la formule $\varepsilon = h\nu$ était *en un certain sens* nécessaire : je précise maintenant que cela signifie la nécessité logique de conclusions *étant admises certaines prémisses*. Du point de vue de l'histoire des sciences effective, il n'y a évidemment aucune nécessité absolue, puisque rien n'oblige jamais absolument à conclure que telles prémisses doivent nécessairement être acceptées).

Ces décisions (d'accepter les prémisses, de ne pas rejeter les conclusions), même si elles ne sont pas complètement indépendantes d'un état donné du système symbolique, sont manifestement des actes d'un autre ordre que ceux qui sont induits par la structure systémique.

De quelle nature sont donc de tels actes ? Qu'est-ce qui les détermine ou au moins les motive ? En d'autres termes, qu'est-ce qui conduit un physicien singulier à investir le système symbolique commun de la physique d'une certaine manière plutôt que d'une autre, à adopter certaines prémisses plutôt que d'autres, à choisir de déployer et d'accepter certains possibles symboliques plutôt que d'autres ? Pour répondre à cette question de manière complète, il faut évidemment prendre en compte *d'autres* facteurs que les seules caractéristiques du fonctionnement interne de l'ordre symbolique.

On peut invoquer là, à la suite de nombreux historiens et philosophes des sciences, certaines exigences esthétiques caractéristiques d'un individu (esthétiques en un sens très large du terme : par exemple, pour Planck, la quête d'une physique absolue). Ces exigences incitent à certaines interprétations physiques (par exemple, pour Planck : la physique devant être absolue, le second principe de la thermodynamique ne peut pas être seulement statistiquement valide), et elles orientent la recherche dans certaines directions (Planck déploie beaucoup d'efforts pour montrer le caractère absolu du second principe).

16. Notamment par l'acte de se focaliser spécifiquement sur tel fragment réduit du système symbolique total de la physique, c'est-à-dire *d'extraire*, en vue de les faire se rencontrer, tels et tels sous-systèmes du contexte plus vaste au sein duquel chacun se

Du point de vue psychologique, de telles exigences fonctionnent certes elles aussi comme des contraintes. Mais ces contraintes esthétiques ne sont pas en elles-mêmes des contraintes *symboliques* (bien qu'elles aient presque toujours des conséquences symboliques), et sont sans aucun doute d'une autre nature que les contraintes *dues au caractère systémique* sur lesquelles j'ai insisté plus haut.

Les contraintes de type esthétique manifestent en fait, par rapport aux contraintes symboliques systémiques — lesquelles sont les mêmes pour tous étant admises les mêmes prémisses — la marge de liberté du physicien, puisque ce sont elles qui conduisent des physiciens différents à investir différemment un même système symbolique de référence (une même théorie physique).

Outre les contraintes systémiques et esthétiques au sens large du terme, bien d'autres facteurs interviennent dans l'élaboration et l'invention scientifique, dont un certain nombre reste d'ailleurs sans aucun doute à jamais inaccessible à l'historien des sciences. J'ai présenté ici un fragment très partiel du réseau des contraintes qui ont pesé sur Planck dans la conduite de l'analogie. Ailleurs je me suis efforcée de caractériser le réseau en question de manière beaucoup plus complète, en faisant notamment intervenir diverses contraintes esthétiques au sens large [Soler 1997]. Mais même cette reconstitution plus complète ne saurait à mes yeux épuiser les motifs et les déterminants de l'invention scientifique *dans l'épisode considéré*, encore moins épuiser la question de la nature des facteurs qui interviennent dans l'invention scientifique *en général*.

Réflexions sur les jugements de nouveauté

Je voudrais à présent préciser la nature du lien susceptible d'exister entre caractère systémique du symbolique et émergence de nouveauté.

J'ai ici insisté sur l'analogie comme vecteur d'innovation, et ai raisonné sur un exemple d'analogie qui me semble effectivement pouvoir être décrit de manière pertinente au moyen de telles formules. Mais ceci n'implique évidemment *pas* que *toute* analogie débouche *nécessairement* sur de nouvelles formules ou de nouvelles idées.

En effet, que le symbolique, du fait de son caractère systémique, ait un pouvoir inducteur, n'implique nullement a priori que ce qui est susceptible d'être induit par le tissu symbolique soit *nouveau*. Ou en d'autres termes : que l'analogie fonctionne en physique comme un tuteur, n'im-

L'analyse de ce point exige de clarifier la signification du terme de 'nouveauté', ou plus précisément d'examiner de plus près de quoi sont faits les verdicts de (plus ou moins radicale) nouveauté.

La question de savoir à quelles conditions une idée, une formule ou une théorie physique peuvent être dites 'nouvelles' est en fait assez complexe. Car compte tenu du fait qu'aucune chose n'est jamais rigoureusement identique à une autre en ce monde, il est toujours possible de répertorier des différences entre les idées, les formules ou les théories récemment émises et celles qui sont plus anciennes, et, sur la base de ces différences, de conclure que ce qui vient d'être émis est 'nouveau'. Mais à ce compte, tout devrait être décrété 'nouveau' : le concept de nouveauté deviendrait complètement inopérant, incapable d'introduire des discriminations tranchées au sein de la gamme des situations empiriques disponibles et, partant, serait d'assez peu d'utilité.

Il est clair que quand on se demande si une idée est nouvelle, la question n'est pas de savoir si cette idée diffère à quelques égards de celles qui furent antérieurement émises, mais, bien évidemment, de juger si certaines des différences répertoriées entre les théories physiques passées et présentes sont de *véritables* différences : des différences *vraiment significatives, profondes*, qui comptent, qui font *rupture*, bref des différences en un sens fort.

Or, la réponse à une telle question semble au moins partiellement déterminée par quelque chose qui s'apparente à une appréciation personnelle irréductible. Il arrive en effet, et il n'est pas rare, que, comparant deux théories physiques, tel historien ou philosophe des sciences estime que la théorie la plus récente prolonge continûment l'ancienne, tandis que tel autre conclut que cette même théorie introduit une rupture radicale (les exemples concrets de divergences de ce type ne manquent pas).

Pour que les jugements relatifs à la nouveauté d'une proposition p quelconque *ne se réduisent pas* à de pures appréciations personnelles pensées sur le modèle de 'questions de goût' ou d'opinions individuelles par nature soustraites à toute procédure d'évaluation rationnelle comparative, pour que ces jugements puissent être au moins jusqu'à un certain point discutés, étayés et confrontés, il faut qu'ils s'ancrent dans une analyse explicite approfondie :

- des principales conséquences de la proposition p considérée, et
- des principales différences qui existent entre l'ensemble de ces conséquences d'une part, et le réseau des anciennes propositions que ces

J'appellerai le résultat de cette analyse le *fondement objectif du jugement de nouveauté*, dans la mesure où il s'agit d'une sorte de répertoire descriptif de différences/similitudes à propos duquel tous les spécialistes s'accordent.

Sur la base d'un tel répertoire, peuvent toujours être émis des jugements divergents quant au caractère *plus ou moins radicalement nouveau* de la proposition discutée. Mais l'important, d'un point de vue méthodologique, est de parvenir à tracer une frontière, entre d'un côté un socle descriptif ('objectif' en ce qu'il est reconnu par tous constituer un compte rendu adéquat de la réalité étudiée), et de l'autre, des appréciations individuelles éventuellement divergentes ('subjectives' en ce qu'elles sont susceptibles de varier d'un spécialiste à l'autre).

Des rapports entre raisonnement par analogie et émergence de nouveauté en physique

Ceci étant précisé, revenons à la question des liens entre analogie et introduction de nouveauté en physique.

L'analogie, du moins si l'on admet, comme je l'ai proposé plus haut, qu'elle consiste bien en la mise en rapport de fragments de réseaux symboliques préstructurés auparavant déconnectés, est incontestablement vecteur de nouveauté *au sens faible du terme*, dans la mesure où elle conduit justement à suggérer presque automatiquement des combinaisons *non encore explorées* (pouvoir heuristique).

Seulement, rien ne garantit pour autant :

- ni que ces combinaisons non encore explorées sont *physiquement pertinentes* (i. e. seront retenues par les spécialistes, ou au moins considérées comme hautement plausibles par certains d'entre eux, en l'état de la recherche) ;
- ni que celles qui seront retenues, celles donc qui transformeront plus ou moins la physique, seront jugées *radicalement nouvelles* par la majorité des locuteurs (seront estimées introduire en physique des changements *importants*, voire *révolutionnaires*).

Examinons d'un peu plus près, et justifions jusqu'à un certain point, les deux précédentes affirmations.

La première est assez triviale. Rien ne garantit que certaines des combinaisons analogiquement générées seront finalement retenues, car ce

d'une analogie n'est évidemment pas (ou tout au moins *jamais seulement*) l'origine analogique de cette hypothèse. L'analogie, parce qu'elle s'appuie sur un système symbolique préstructuré, suggère certes dans un premier temps, quasi-indépendamment de tout sujet volontaire, des possibilités conceptuelles éventuellement inédites au sens de 'jamais encore énoncées', mais le sujet volontaire réintervient bien entendu dans un second temps, pour (à partir d'arguments qui n'ont plus grand chose à voir avec l'analogie primitive qui suggéra l'hypothèse) rejeter les rapprochements stériles, explorer plus avant ceux qui semblent prometteurs, et décréter finalement certains énoncés 'corroborés en l'état des connaissances'.

Rien ne garantit par ailleurs que les hypothèses générées par analogie (et parmi elles celles qui seront finalement retenues) seront nouvelles, voire révolutionnaires.

En fait, on peut même plutôt au premier abord présager que le fait de se laisser porter par un système symbolique préstructuré a toutes les chances de produire du semblable plutôt que du radicalement autre. D'ailleurs l'on insiste plutôt en général, dans la littérature, sur le caractère *conservateur* de l'analogie.

Mais par rapport à ce genre d'affirmation, il faut être très vigilant, étant donné ce qui a été dit plus haut concernant le fait que l'attribution de la modalité 'nouveau' est en partie sous-tendue par une appréciation subjective (un peu comme la bouteille à moitié vide et à moitié pleine). Il paraît alors utile d'examiner la manière dont de tels jugements de 'conservatisme' s'ancrent dans ce qui a été appelé plus haut le « fondement objectif du jugement de nouveauté », en vue de déterminer ce qu'ils doivent à ce socle objectif d'une part, et à une appréciation individuelle plus subjective d'autre part.

Quand on qualifie l'analogie de 'conservatrice', on entend en général par là, à s'en tenir au plan du fondement objectif du jugement de nouveauté, que des pans entiers d'un formalisme ou d'un système de concepts, qui jusque-là valaient dans un domaine restreint de la physique, se trouvent transférés dans un autre domaine. On parle de 'conservation', parce qu'on se focalise sur l'isomorphisme des structures mathématiques ou sur la similitude des concepts.

Toutefois, l'on pourrait aussi parler de nouveauté, si l'on mettait plutôt l'accent sur le fait, qui appartient lui aussi au niveau du fondement objectif du jugement de nouveauté, que le domaine physique dans lequel viennent d'être importés le formalisme ou les concepts primitivement

ou ordonné par ces concepts. Et l'on pourrait même conclure de là à une 'révolution', c'est-à-dire à une situation de rupture radicale, si l'on estimait *de plus* que les différences introduites, une fois minutieusement explicitées pour l'épisode historique considéré, s'apparentent à de profonds bouleversements.

Bref, ce n'est pas parce qu'un homme de science procède à bien des égards *comme d'autres ont déjà procédé avant lui*, ce n'est pas parce qu'il prend comme tuteur ou guide pour la pensée des types de raisonnements, des formes mathématiques, ou des concepts *déjà disponibles, connus, voire même très familiers*, que le résultat auquel il aboutit est nécessairement conservateur. La conclusion opposée (résultat nécessairement novateur) ne s'impose bien entendu pas davantage.

Aucun lien logique d'implication ne noue donc en définitive ensemble raisonnement par analogie d'une part, et émergence de nouveauté d'autre part. Le fait de se servir d'un réseau préstructuré comme béquille pour la pensée et structure anticipatrice, n'implique rien du tout quant au caractère plus ou moins radicalement novateur de la pensée ainsi engendrée. Même le fondement objectif du jugement de nouveauté d'une proposition ou d'un ensemble de propositions p , considéré isolément de l'évaluation qu'il faut y adjoindre pour déterminer le jugement, n'entretient aucun lien nécessaire avec l'origine analogique de p . Que les éléments d'énergie aient été primitivement conçus par analogie, ou bien qu'ils aient été inventés par d'autres voies, le fondement objectif du jugement de nouveauté reste inchangé.

Tout ce qui vient d'être dit sur l'indépendance entre l'origine analogique d'une hypothèse d'une part, et le caractère plus ou moins radicalement novateur de cette hypothèse d'autre part, vaut d'un point de vue *logique*. Il semble toutefois que, d'un point de vue *historique*, la situation se présente quelque peu différemment, et que doive être modérée la conclusion précédente. Il semble en effet possible de soutenir que, d'un point de vue historique, l'analogie a quand même *plus de chances* que d'autres méthodes d'investigation théorique de conduire à des hypothèses physiques nouvelles, voire radicalement nouvelles (même s'il n'y a là *aucune nécessité*). Ceci, du fait que la relative autonomie du symbolique — c'est-à-dire du fait qu'étant admises un ensemble de prémisses, certaines conclusions sont suggérées par associations quasi-automatiques — est susceptible de faire contrepoids aux habitudes intellectuelles qui incitent quant à elles plutôt la pensée à réemprunter toujours les mêmes

Bachelard a bien montré [Bachelard 1938] la tendance humaine (manifeste aussi en physique) à préférer et à répéter les idées ou les modes de raisonnements familiers, ceux-ci devenant alors faussement clairs d'eux-mêmes et indûment valorisés, et fonctionnant du coup comme des facteurs d'inertie ou « obstacles épistémologiques ». On conçoit dans ces conditions que si un événement inaugural (quelles qu'en soient les causes) aboutit à mettre en rapport des fragments auparavant déconnectés de réseaux symboliques, *pourront éventuellement* en résulter, par un jeu d'associations quasi-mécaniques, des combinaisons symboliques *qui, autrement, ne seraient pas venues à l'esprit des scientifiques*, tant les idées en question sont éloignées des modes de pensée de la physique en vigueur.

Du degré de nouveauté de la formule $\varepsilon = h\nu$

Pour finir, réexaminons brièvement l'analogie Planck/Boltzmann à la lumière des précédentes remarques.

Admettons que tout le monde s'accorde pour estimer 'révolutionnaire' l'interprétation de la formule $\varepsilon = h\nu$ en termes de quanta de lumière et de variation par sauts de l'énergie des systèmes physiques, ceci, sur la base d'une analyse *contemporaine* des conséquences de la formule $\varepsilon = h\nu$. Supposons en outre que tout le monde reconnaisse avec Thomas Kuhn [Kuhn 1978]¹⁷ que c'est Einstein à partir de 1905 [Einstein 1905], et non Planck en 1900, qui, le premier, élabore une telle interprétation. Peut-on dire (et si oui en quel sens) que, comme le suggère le titre du présent article, la formule $\varepsilon = h\nu$ issue de l'analogie est *nouvelle* ?

Le problème de ce type de formulation est qu'il pose la question de la nouveauté *dans l'absolu*, c'est-à-dire indépendamment de toute indication de sujet (nouveau au yeux de qui ?) et de temps (nouveau en 1900 ? Nouveau aujourd'hui ?).

Précisons tout d'abord quant à nous la question en lui adjoignant une spécification temporelle : plaçons-nous en 1900. Tout physicien qui, en 1900, aurait eu connaissance de la formule $\varepsilon = h\nu$, aurait sans aucun doute jugé cette formule nouvelle au sens faible, celle-ci n'existant auparavant pas en physique. Mais les choses se compliquent dès qu'il s'agit de déterminer si la formule est nouvelle au sens fort, et jusqu'à quel point elle est nouvelle au sens fort. Car pour les locuteurs de 1900,

17. Kuhn a avancé cette interprétation contre une longue tradition historiographique, laquelle voyait en Planck le père de la quantification de l'énergie des micro-

la formule n'a évidemment pas le même fondement objectif du jugement de nouveauté que de nos jours où nous la jugeons quasi unanimement révolutionnaire.

On peut commencer par examiner le point de vue de Planck sur la question en 1900. Quelle est pour Planck la signification physique du $h\nu$ en 1900 ? Apparemment, cette formule signifie pour Planck que l'on a affaire à des domaines d'équiprobabilité de grandeur arrêtée [Kuhn 1978, chapitre V], [Darrigol 1992, chapitre I]. Cette idée étant en 1900 étrangère à la physique, la démonstration combinatoire analogique et la formule $\varepsilon = h\nu$ qui en résulte apportent donc, du point de vue de Planck, du nouveau au sens fort. La nouveauté en question n'est toutefois pas pensée par Planck comme révolutionnaire : le $h\nu$ cohabite aux yeux de Planck harmonieusement avec le reste de sa théorie du rayonnement noir, elle-même conçue comme une extension sans rupture de la théorie électromagnétique continue de Maxwell ; Planck espère que la signification du $h\nu$ s'éclaircira quand on en saura plus sur les résonateurs et la nature des processus d'interaction entre résonateurs matériels et rayonnement.

Peut-on néanmoins conclure que le $h\nu$ introduit par Planck est, *déjà en 1900* et en dépit du point de vue de Planck, une hypothèse *révolutionnaire* ? Ce qui est sûr, c'est qu'en 1900, la formule $\varepsilon = h\nu$, n'étant pas encore associée à l'interprétation einsteinienne, n'est *effectivement* révolutionnaire *pour personne*. Ce n'est que des années plus tard qu'elle paraîtra telle au yeux des physiciens, après que (fruit d'un travail acharné de la part des membres de la communauté scientifique) nombre de ses implications aient été déployées et que sa signification physique ait ainsi été arrêtée. Soutenir malgré cela que la formule $\varepsilon = h\nu$ est déjà révolutionnaire en 1900, revient en quelque sorte à affirmer que cette formule contient déjà en 1900, d'avance et en puissance, l'interprétation physique qui lui sera plus tard associée. C'est donc adopter une conception nécessaire, et en un certain sens téléologique, de l'histoire des sciences et du progrès scientifique : c'est postuler que l'état de la recherche physique en 1900 ne pouvait *pas* être suivi d'états ultérieurs différents de ceux qui, historiquement, suivirent effectivement.

Je ne prendrai ici quant à moi pas position sur cette question. Mon objectif a seulement été d'analyser et de clarifier l'affirmation centrale selon laquelle du nouveau est susceptible d'émerger de l'analogie, ce qui exigeait d'interroger à un moment ou à un autre la notion de nouveauté et la nature des verdicts afférents.

D’où il ressort que toute question portant sur un jugement de nouveauté :

- Soit doit être précisée par des indications de temps et de sujet, et être discutée en référence à de telles coordonnées (le fondement objectif du jugement de nouveauté pouvant énormément varier selon les périodes, et son ‘objectivité’ ne pouvant pas toujours être rapportée au consensus effectif d’un groupe d’individus réels — ce qui est en particulier le cas quand une proposition vient tout juste d’être émise et que l’on ne dispose à son propos que du point de vue d’un très petit nombre de locuteurs, lesquels n’ont en outre pas forcément aperçu, ou pu apercevoir, toutes les implications de la proposition discutée et ses diverses autres liaisons possibles à d’autres propositions physiques).
- Soit est posée et analysée indépendamment de toute indication de temps et de sujet, mais alors, ceci revient à admettre que le destin qui a effectivement été celui de la formule après la date de sa première émission devait nécessairement être tel (pas forcément au niveau de tous les détails de la trajectoire historique considérée, mais au moins quant au point d’arrivée et aux liaisons à d’autres énoncés physiques qu’entretient la formule considérée en ce point d’arrivée).

Conclusion

La question de départ était : comment du nouveau émerge-t-il de l’analogie ? Par rapport à cette question, les développements précédents semblent autoriser à conclure :

- (a) que l’analogie, ou tout au moins un type extrêmement répandu d’analogie, consiste à s’appuyer sur un système symbolique pré-structuré qui, justement *parce qu’il est un système*, fonctionne comme une source de contraintes interdépendantes, ici qualifiées de ‘systémiques’ (contraintes logiques et génératrices d’associations diverses).
- (b) Que les contraintes de ce type soutiennent la pensée du physicien à la manière d’un tuteur et la conduisent de la sorte à certains résultats, *dans une large mesure indépendamment* de la volonté initiale, des croyances physiques préalables, des types raisonnements usuels dans la communauté, des exigences esthétiques propres, etc.,

- (c) Que le raisonnement analogique apparaît, de par sa nature même — du fait que la relative autonomie du pouvoir inducteur du tissu symbolique fait contrepoids à la tendance humaine à trouver plus clairs, à préférer et donc à répéter et perpétuer les formes de raisonnements et les principes théoriques fondamentaux prisés au sein de la communauté des spécialistes à une époque donnée — spécialement susceptible, *d'un point de vue historique*, de favoriser l'apparition de nouvelles formules ou de nouvelles idées.
- (d) Que d'un point de vue *logique* toutefois, le fait de procéder par analogie n'implique nullement que les résultats obtenus seront novateurs (à fortiori qu'ils constitueront les premiers germes d'une révolution en physique).

Bibliographie

BACHELARD, GASTON

1938 *La formation de l'esprit scientifique*, Paris : Vrin, 1980.

BOLTZMANN, LUDWIG

1872 « Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen », *Wiener Berichte*, 66, 1872, 275-370. Reproduit dans : Ludwig Boltzmann, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, éd. F. Hasenöhr, Leipzig, 1909, tome I, 316-402 (les pages indiquées dans le corps de l'article renvoient à cette dernière édition).

BUCHWALD, JED Z.

1995 *Scientific Practice : Theories and Stories of Doing Physics*, Chicago : University of Chicago Press, 1995.

DARRIGOL, OLIVIER

1990 « Einstein et la discontinuité quantique », *La Recherche*, 220, 1990, 446-452.

1992 *From c-Numbers to q-Numbers, The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press, 1992.

DUHEM, PIERRE

1906 *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris : Vrin, 1981.

EINSTEIN, ALBERT

1901 lettre à M. Maric du 10 avril 1901, *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, tome 1, 15.

- 1905 « Über einen die Erzeugung und die Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt », *Annalen der Physik*, 17, 1905, 132-148; traduction française : « Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière », *Albert Einstein, Œuvres choisies*, tome 1, 39-53.
- HOLTON, GERALD
1981 *L'imagination scientifique*, Paris : Gallimard, 1981.
- KLEIN, MARTIN J.
1962 « Max Planck and the Beginning of the Quantum Theory », *Archive for History of Exact Sciences*, 1, 1962, 459-479.
1963 « Planck, Entropy and Quanta 1901-1906 », *The Natural Philosopher*, volume 2, D. Gershenson and D. Greenberg éd., New York : Blaisdell, 1963, 83-108.
1966 « Thermodynamics and Quanta in Planck's Work », *Physics Today*, 19, n°11, 1966, 23-32.
- KLEIN, MARTIN J., SHIMONY, ABNER, ET PINCH, TREVOR J.
1979, « A Review Symposium », *Isis*, 70, 1979, 429-440.
- KUHN, THOMAS S.
1978 *Black body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*, Oxford : Clarendon Press / New York : Oxford University Press, 1978.
1983 « Commensurability, Comparability, Communicability », in PSA 1982, *Proceedings of the 1982 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, éd. P. D. Asquith and T. Nickles, East Lansing : Philosophy of Science Association, 1983, 669-688.
- PLANCK, MAX
1900 « Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum », *Verhandlungen der Deutschen Physikalischer Gesellschaft*, 2, 1900, 237-245.
1901 « Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum », *Annalen der Physik*, 4, janvier 1901, 553-563. Traduction française : J. Leite-Lopes, B. Escoubes, *Sources et évolution de la physique quantique (textes fondateurs)*, Paris/ Milan/ Barcelone : Masson, 1995, 20-27.
1958 *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*, Braunschweig, 3 volumes, 1958.
- QUINE, WILLARD VAN ORMAN
1951 « Les deux dogmes de l'empirisme », *De Vienne à Cambridge, l'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*, Pierre Jacob

RAYLEIGH, LORD (JOHN WILLIAM STRUTT)

1905a « The Dynamical Theory of Gases and of Radiation », *Nature*, 72, 1 Juin, 1905, 54-55.

1905b « The Constant of Radiation as Calculated from Molecular Data », *Nature*, 72, juillet 1905, 243-244.

ROSENFELD, LÉON

1936 « La première phase de l'évolution de la théorie des quanta », *Osiris*, 2, 1936, 149-196.

SAUSSURE, FERDINAND DE

1916 *Cours de linguistique générale*, Paris : Payot, 1972.

SOLER, LÉNA

1997 *L'émergence d'un nouvel objet symbolique : le photon*, thèse de doctorat réalisée sous la direction de Michel Bitbol, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, décembre 1997.

2000 « Le concept kuhnien d'incommensurabilité, reconsidéré a la lumière d'une théorie structurale de la signification », *Philosophia scientiæ*, éd. Kimé, volume 4, cahier 2, octobre 2000, 189-217.