

II. SCIENCES PHILOSOPHIQUES ET SOCIOLOGIQUES

Philosophie de la connaissance

M. Jules VUILLEMIN, professeur

Le cours du lundi a eu pour objet : « Qu'est-ce qu'une signification ? ». Comme dans le cours de l'an dernier (sur la notion de signe), on s'est gardé de supposer une théorie générale et, au lieu de traiter des difficultés logiques qui regardent les conditions propres à définir l'identité d'une signification, on s'est borné à analyser empiriquement la façon dont, en linguistique comparée, on rencontre les significations. Ce cours fera l'objet d'une publication ultérieure.

Le séminaire du mardi a porté sur l'équation de propagation de la chaleur de Fourier et le positivisme.

On n'a pas eu le temps d'étudier, cette année, les aspects proprement mathématiques de cette équation. On s'est limité à l'étude de sa signification physique.

On divisera ce résumé en cinq parties. La première rappellera comment on dérive l'équation de Fourier. La seconde analysera les analogies purement mathématiques avancées par Fourier et Comte. La troisième aura trait à l'équation de continuité, la quatrième aux interprétations « énergétiques » de cette équation, la cinquième à son interprétation en termes d'approximation mathématique.

(Les références renvoient à Joseph Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 1822, in *Œuvres de Fourier*, publ. par Gaston Darboux (2 vol.), t. I, Gauthier-Villars, Paris, 1888.)

I

L'équation de conduction de la chaleur dans un solide s'obtient à partir de trois équations élémentaires.

La première définit le flux de chaleur :

$$(1) \quad \vec{h} = -K \left(\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = K \vec{\text{grad}} T,$$

où K désigne la « perméabilité » ou capacité de conduction thermique.

La seconde est l'équation dite de continuité :

$$(2) \quad \frac{\partial q}{\partial t} + \left(\frac{\partial h_x}{\partial x} + \frac{\partial h_y}{\partial y} + \frac{\partial h_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial q}{\partial t} + \text{div} \vec{h} = 0$$

où q désigne la densité de chaleur.

La troisième introduit la densité de masse et la chaleur spécifique, c :

$$(3) \quad \Delta q = \rho c \Delta T.$$

Ces équations fixent, la première la relation entre flux de chaleur et répartition de la température, la seconde la relation entre quantité de chaleur et flux de chaleur, la troisième la relation entre quantité de chaleur et température. Elles donnent l'équation de conduction de Fourier :

$$(4) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \text{div} \vec{\text{grad}} T,$$

équation qui, pour l'état stationnaire, se réduit à l'équation de Laplace :

$$(5) \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0.$$

Pour établir la troisième relation, on se demande quelle est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une molécule d'une unité ; elle dépend de la capacité calorifique de la substance et de sa densité (Chap. II, Section VI, § 128, p. 105). Cette relation appartient aux définitions préliminaires de la théorie (Chap. I, Section II, § 26, p. 17). Les conventions posées par Fourier pour le choix des unités n'ont pas été retenues. Il suppose souvent que deux corps en contact ont respectivement la température 0 et 1, ce qui infirmerait la loi newtonienne de proportionnalité ⁽¹⁾ entre intensité de

(1) Tome I, p. 17 (note de Darboux).

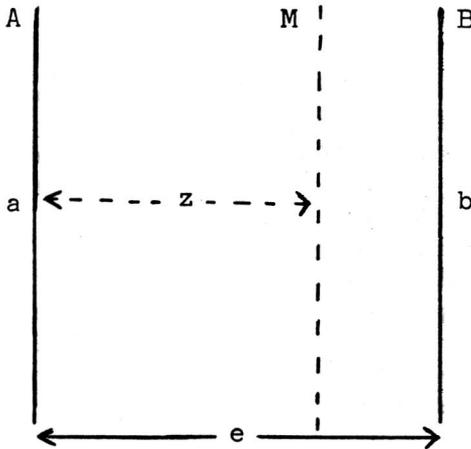
l'action thermologique et différence des températures. Comme Auguste Comte l'a remarqué, « les expériences de divers physiciens, et surtout celles de MM. Dulong et Petit, ont clairement constaté que cette loi, primitivement imaginée par Newton, ne pouvait plus être adoptée, quand la différence des températures devenait très considérable » (2).

Ce qui caractérise la relation (1), la distingue de la loi de proportionnalité de Newton, c'est son caractère différentiel, qui en assure la validité même si la proportionnalité n'est pas vérifiée dans toutes les circonstances. « Car, ajoute Comte, en parvenant à ces équations, on n'a jamais à considérer que l'action thermologique instantanée de molécules infiniment voisines, dont les températures diffèrent infiniment peu ».

Fourier établit (1) en deux temps.

Bien que Fourier insiste sur le caractère expérimental de la relation (Chapitre I, Section III, p. 34), il construit une « expérience » très idéalisée. Il suppose un solide homogène infini compris entre deux plans parallèles A et B, dont les températures sont maintenues aux degrés a et b (a > b). La température initiale étant supposée égale à a, il y aura un flux de chaleur de a vers b. La température de B ne pouvant dépasser b, le système des températures tendra vers un état stationnaire. Chaque plan du solide, parallèle à A, aura même température. Soit M un tel plan à une distance z de A, la distance AB étant égale à e. On aura :

$$T_M = a + \frac{b-a}{e} z, F = K \frac{a-b}{e} = -K \frac{\partial T}{\partial z}$$



(2) A. Comte, *Cours de philosophie positive*, t. II, 5^e éd., Paris, Au siège de la société positiviste, 1893, p. 433.

«La première de ces équations exprime la loi suivant laquelle les températures décroissent depuis la base inférieure jusqu'à la face opposée ; la seconde fait connaître la quantité de chaleur qui traverse pendant un temps donné une partie déterminée d'une section parallèle à la base » (Chapitre I, Section IV, § 68, p. 46).

Dans un second temps, pour assigner le facteur de proportionnalité K , Fourier redouble la comparaison d'abord établie dans un même solide homogène entre deux tranches de ce solide (§ 65 et 66) et l'étend à deux solides également homogènes, mais de substances différentes, où l'on considère des tranches égales et également disposées (§ 67). Pour obtenir l'équation (1), il ne reste plus qu'à décomposer un flux de direction quelconque en ses trois composantes orthogonales.

Enfin, Fourier obtient l'équation (2) à la Section V du Chapitre II (p. 103), en cherchant « quel est le changement de température qu'une portion infiniment petite du solide doit éprouver pendant l'instant dt en vertu de l'action des molécules qui en sont extrêmement voisines ». Il s'agit d'estimer le flux d'un champ de vecteurs qui traverse un cube infinitésimal par unité de temps. En additionnant et en soustrayant pour chaque face du cube le flux entrant et le flux sortant, on obtient (2), équivalent différentiel du « théorème de Gauss ».

De plus, Fourier traite du phénomène de dissipation de la chaleur à la surface du solide idéal qu'il considère. Il détermine le coefficient de pénétrabilité de la chaleur à travers une surface externe et l'oppose au coefficient de perméabilité ou de conductibilité interne.

II

Bachelard a bien fait voir en quoi consistait la difficulté que Fourier dut vaincre pour parvenir à ses équations. La réalité nous présente des sources de chaleur dispersées et les phénomènes de diffusion paraissent éminemment variables et confus quand on les considère loin de l'état final. D'autre part, au bout d'un temps assez grand, si l'on n'entretient pas les sources, on finit toujours par atteindre l'identité thermique. « Entre ces deux extrêmes qui représentent en quelque sorte l'un l'empirisme total et l'autre l'uniformité rationnelle, il y a place pour un aspect évolutif régulier. Entre l'instant initial et l'instant final on étudiera ce qu'on appelle l'état pénultième »⁽³⁾. Cet état en effet produit la régularité en éliminant « l'arbitraire et la confusion » des conditions initiales.

(3) G. Bachelard, *Etude sur l'évolution d'un problème de physique, La propagation thermique dans les solides*, Vrin, Paris, 1928, p. 39.

Tel est bien le procédé de Fourier pour parvenir à (1), quand il suppose les deux faces du « mur » à deux températures entretenues a et b , la condition initiale de température où tout le mur est supposé à la température a ne jouant que le rôle d'une borne inférieure dans un état précisément pénultième. Le nerf de la démonstration, c'est que si l'état thermique T est une fois établi, il persiste. Et en effet si

$$T_M = a + \frac{b - a}{e} z$$

représente bien l'état thermique du plan M , à travers toutes les sections parallèles aux parois du mur il s'écoule, pendant chaque division du temps, une certaine quantité de chaleur constante si les divisions du temps sont égales. « Ce flux uniforme est le même pour toutes les sections intermédiaires ; il est égal à celui qui sort du foyer et à celui que perd, dans le même temps, la surface supérieure du solide en vertu de la cause qui maintient la température » (Chapitre I, Introduction, § 66, p. 42).

La détermination d'un tel mouvement uniforme de chaleur est, pour Fourier, l'occasion de préciser certaines analogies entre géométrie, mécanique et thermologie. « Les fonctions obtenues par des différenciations successives, et qui servent au développement des séries infinies et à la résolution numérique des équations, correspondent aussi à des propriétés physiques. La première de ces fonctions, ou la fluxion proprement dite, exprime, dans la géométrie, l'inclinaison de la tangente des lignes courbes, et, dans la dynamique, la vitesse du mobile pendant le mouvement varié ; elle mesure, dans la théorie de la chaleur, la quantité qui s'écoule en chaque point d'un corps à travers une surface donnée » (4). Si, pour simplifier, on ne considère l'écoulement de la chaleur que dans une seule direction, l'analogie des fluxions est donc la suivante :

<i>Géométrie</i>	<i>Mécanique</i>	<i>Thermologie</i>
$\frac{dy}{dx}$	$\frac{ds}{dt}$	$h = -K \frac{\partial T}{\partial z}$
= pente d'une tangente	= vitesse instantanée	= flux de chaleur

Lorsqu'on passe de la considération d'une seule direction à celle de plusieurs directions et que les échanges de chaleur sont supposés se faire en tous sens, on décompose le phénomène en trois flux principaux parallèles aux ordonnées correspondantes. « Chacun de ces trois flux principaux se trouve avoir nécessairement la même valeur que si les deux autres

(4) I, p. 13-14 ; Comte, p. 438-439.

n'existaient pas ; comme, en mécanique, les divers mouvements élémentaires s'accomplissent simultanément, sans aucune altération mutuelle. En estimant ce flux suivant une nouvelle direction quelconque, on voit aussi qu'il se déduit des premiers d'après les mêmes lois mathématiques qui président, en mécanique, à la composition des forces, et, en géométrie, à la théorie des projections » (5).

L'analogie ainsi proposée est purement mathématique. Elle a trait à l'addition en Analyse vectorielle. Fourier analyse la distribution des températures dans l'espace comme un champ scalaire, celle des flux de chaleur comme un champ vectoriel. Au point de vue physique, le vecteur thermologique est, comme le vecteur géométrique, une dérivée par rapport à une coordonnée d'espace. Il en va autrement pour le vecteur mécanique ou plus exactement cinématique où la dérivée est prise par rapport au temps.

Cependant, poursuivons l'analogie en répétant l'opération de dérivation pour chacun des vecteurs considérés. En ce qui concerne le vecteur flux de chaleur, on le dérivera donc par rapport à z et il s'agira d'estimer ce que signifie cette dérivée seconde. Son expression vectorielle montre qu'elle a un contenu physique, c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas du choix arbitraire de tel système de coordonnées. Mais écoutons Auguste Comte, qui a admirablement résumé comment, à partir de la considération du mouvement uniforme de la chaleur, c'est-à-dire de la détermination du flux, on passe à l'équation générale. « De quelque manière, dit-il, que doivent varier les températures successives d'une même molécule, ou les températures simultanées des différents points, on peut toujours concevoir la masse décomposée en éléments prismatiques infiniment petits relativement à chacun des trois axes coordonnés, suivant les faces desquels les flux de chaleur soient uniformes et constants pendant toute la durée d'un même instant. Chaque flux sera donc nécessairement exprimé par la fonction dérivée de la température relativement à l'ordonnée correspondante. Cela posé, si le flux avait, dans les trois sens, la même valeur pour les deux faces égales et opposées perpendiculairement à la même ordonnée, la température de l'élément ne pourrait, évidemment, éprouver aucun changement, puisqu'il s'échaufferait autant par l'une de ces faces qu'il se refroidirait par l'autre. Ainsi, les variations de cette température ne sont dues qu'à l'inégalité de ces deux flux antagonistes. En évaluant cette différence qui dépendra naturellement de la seconde dérivée de la température rapportée à l'ordonnée considérée, et ajoutant entre elles les différences propres aux trois axes, on évaluera donc exactement la quantité de chaleur alors introduite, et, par suite, l'accroissement instantané que devra présenter effectivement la température de la molécule, pourvu qu'on ait convenablement égard à la chaleur spécifique et à la densité de cet élé-

(5) Comte, p. 438.

ment. De là résulte immédiatement l'équation différentielle fondamentale, qui consiste en ce que la somme de trois dérivées partielles de second ordre de la température, envisagée tour à tour comme une fonction de chaque ordonnée isolément, est nécessairement toujours égale à la première dérivée de cette température relativement au temps, multipliée toutefois par un coefficient constant : ce coefficient a pour valeur le produit de la densité par le rapport de la chaleur spécifique à la perméabilité de la molécule » (6).

Poursuivons donc l'analogie :

<i>Géométrie</i>	<i>Mécanique</i>	<i>Thermologie</i>
$\frac{d^2y}{dx^2}$	$\frac{d^2s}{dt^2}$	$\frac{\partial h}{\partial z} = -K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$
= taux de changement de la pente de la tangente = courbure	= γ = accélération mouvement mécanique varié	= $-\text{div } \vec{h} = \frac{\partial q}{\partial t}$ = $\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$ mouvement varié de la chaleur (7)

Annulons ces quantités. Les cas correspondants sont :

équation d'une droite	mouvement uniforme	mouvement stationnaire ou uniforme de la chaleur
-----------------------	--------------------	--

Ces analogies, toutefois, restent incomplètes, comme elles doivent le rester, si, comme le dit Fourier, la Thermologie ne se réduit pas à la Mécanique. En effet, il y a mouvement mécanique varié ($\gamma \neq 0$) quand des forces sont exercées et mouvement mécanique uniforme en l'absence de forces et de causes, ce qui détermine le principe mécanique d'inertie. En revanche, pour que le mouvement de la chaleur dans un solide soit stationnaire, il faut entretenir à ses deux faces opposées des sources de chaleur constantes et donc faire agir constamment des causes. Le mouvement varié suppose, simplement, d'autres causes en action. Par exemple : « un solide de

(6) Comte, p. 439-440 ; Fourier, § 130-131, p. 106-107.

(7) Fourier, § 126-128, p. 103-105.

forme cubique dont tous les points ont acquis une même température est placé dans un courant uniforme d'air atmosphérique, entretenu à la température 0. Il s'agit de déterminer les états successifs du corps pendant toute la durée du refroidissement » (8). On ne peut donc pas, en Thermologie, opposer une température stationnaire à des états de refroidissement ou d'échauffement comme on oppose, en Mécanique, inertie et présence des causes. Comte parle ainsi de « l'état permanent vers lequel tend finalement l'ensemble des températures (successives) sous l'influence d'une cause quelconque constante » (9).

III

Dans ses *Principia motus fluidorum* (10), Euler considérait le changement instantané d'un volume infinitésimal de fluide et le changement correspondant de sa densité. En admettant la conservation de la masse, elle-même égale au produit du volume par la densité, il parvenait à l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0,$$

où u , v et w sont les composantes du vecteur vitesse du centre du parallélépipède rectangle infinitésimal du fluide considéré. Si le fluide est incompressible, $\rho = \text{constante}$, l'équation se réduit à :

$$\text{div } \vec{V} = 0$$

La divergence représente le taux de variation par unité de temps du coefficient de dilatation cubique au cours de la déformation continue éprouvée par le milieu.

L'équation de continuité dans la théorie de la chaleur provient de ce que nous introduisons une densité \vec{h} du flux de chaleur. Mais « pour un fluide, la densité du flux \vec{h} peut s'exprimer par le produit de la densité d'une substance, ρ , et de la vitesse d'un courant \vec{v} , sous la forme :

$$\vec{h} = \rho \vec{v} ».$$

(8) Fourier, § 126, p. 103.

(9) Comte, p. 432.

(10) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, année 1753, p. 208.

En thermologie, en revanche, on renonce à une telle expression « et on laisse ouverte la question de savoir si peu de chaleur s'écoule vite ou beaucoup de chaleur lentement, et également la question de savoir s'il existe une vitesse unitaire » (11).

L'analogie, cette fois décidément physique, qu'il faudrait retenir pour fonder la thermologie, s'établirait entre cette dernière et la dynamique des fluides. On part du mouvement irrotationnel d'un fluide, dans lequel le vecteur-tourbillon est supposé toujours nul en tous les points du fluide ; la rotation instantanée d'un élément de volume est alors toujours nulle. Lorsqu'il en est ainsi, la répartition des vitesses dans un élément de volume se réduit à la superposition d'une translation et d'une déformation. Les vitesses \vec{V} sont dérivées d'un potentiel des vitesses. Les analogies qui s'imposent entre fluide matériel et fluide thermique peuvent se représenter alors de la façon suivante :

Mouvement irrotationnel du fluide

Potentiel des vitesses :

$$\psi(x, y, z, t)$$

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial x}, v = \frac{\partial \psi}{\partial y}, w = \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

ou $\vec{V} = \text{grad } \psi$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Incompressibilité du fluide :

$$(\rho = \text{Cte})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \vec{V} = 0$$

Mouvement de la chaleur

Potentiel des températures :

$$T(x, y, z, t)$$

$$u = \frac{\partial T}{\partial x}, v = \frac{\partial T}{\partial y}, w = \frac{\partial T}{\partial z}$$

ou $\vec{h} = K \text{ grad } T$

Equation de continuité :

$$\text{div } \vec{h} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0$$

Mouvement uniforme de la chaleur :

(T stationnaire)

$$\text{div } \vec{h} = 0$$

(11) F. Hund, *Theoretische Physik*, Teubner, Stuttgart, 3 te Aufl., 1966, III, p. 31.

Tandis que les analogies entre géométrie, dynamique et thermologie, signalées par Fourier et Comte, restaient formelles, l'analyse de l'équation de continuité paraît être matérielle. Elle fait de la chaleur un fluide. La théorie de Fourier semble donc fondée sur l'hypothèse de la conservation du calorique.

C'est ce qu'affirmera Louis de Broglie⁽¹²⁾. C'est ce qu'avait affirmé Duhem, lorsqu'il déclare que « les hypothèses qui fondent la propagation de la chaleur par conductibilité se sont présentées tout naturellement à l'esprit de Fourier parce qu'il admettait, au sein des corps échauffés, l'existence d'un certain fluide, le *calorique* ; le mouvement de ce fluide devrait alors obéir à des lois de même forme que celle de l'Hydrodynamique »⁽¹³⁾. C'est encore ce qu'affirme Bachelard. Tout en citant les protestations de Fourier, il représente ce dernier vivant à une époque où le « fluide » est la pensée commune. « En lui enlevant l'élasticité, écrit-il, Fourier confère à l'agent l'impénétrabilité qui entraînera, dans les cas théoriquement très importants où il s'agit d'un régime, l'équation fondamentale du problème. C'est le fond matérialiste, étonnamment solide, qui supportera tout l'édifice. Il n'y a que cette idée physique dans une si grande œuvre, elle est le principe qui détermine toutes les équations. Le signe égal n'en est que le résumé »⁽¹⁴⁾.

Si ces interprètes ont raison, il faut que Fourier ait conçu la chaleur comme un fluide, lequel se distinguerait des fluides tels que l'eau parce qu'on l'aurait privé de plusieurs caractères : poids, élasticité, rapport entre vitesse et quantité dans l'écoulement du flux, existence d'une vitesse unitaire. Le flux de chaleur serait ce qui reste quand, par abstraction, on retire ces différents caractères du flux d'un fluide réel.

Fourier a cependant explicitement déclaré que « les effets de la chaleur ne peuvent nullement être comparés à ceux d'un fluide élastique dont les molécules sont au repos »⁽¹⁵⁾. Les seules analogies qu'il signale dans son traité, par exemple dans le *Discours préliminaire*, sont empruntées à l'Optique et non à l'Hydraulique. Comme le remarque Comte, l'expression même *flux de chaleur* n'est qu'une métaphore héritée sans portée ontologique réelle⁽¹⁶⁾. Mais alors quelle est la justification physique de l'équation de continuité une fois que, la thermologie ayant été coupée de la dynamique, on l'a privée de son support hydrodynamique : la conservation de la masse ?

(12) *La physique nouvelle et les quanta*, Flammarion, Paris, 1937, p. 55.

(13) *Traité d'Énergétique ou de Thermodynamique générale*, 2 vol., Gauthier-Villars, Paris, 1911, II, p. 206-207.

(14) *Op. cit.*, p. 38.

(15) Chapitre I, Section II, § 52, p. 31.

(16) *Op. cit.*, p. 436-437.

A cette question deux réponses sont possibles.

La première consiste à tenter de préciser la nature physique de l'analogie et à en fixer la portée ultime quitte à ne lui trouver qu'une justification conventionnelle en invoquant sa compatibilité avec l'ensemble de la théorie physique. Tel sera le point de vue de l'énergétisme et, en particulier, de Mach et de Duhem. La seconde regardera la neutralité eu égard aux hypothèses concernant la nature de la chaleur comme la marque d'un état provisoire de la théorie ; l'équation de continuité et l'équation de Fourier auront alors valeur d'approximation mathématique.

IV

En apparence, Mach reprend les analogies mêmes que Fourier établissait entre dynamique et thermologie. Mais Fourier comparait significativement la thermologie plutôt avec la cinématique qu'avec la dynamique. Il se gardait de comparer la masse aux capacités de conduction et aux capacités calorifiques. En se fondant sur cette comparaison, Mach assimile la force mécanique à une tendance à l'égalisation comparable à la tendance à l'égalisation des températures dans le premier membre de l'équation de Fourier.

L'analogie élémentaire de l'hydrodynamique et de la thermologie se présente de la façon suivante :

	« Eau	chaleur
Niveau supérieur		Température élevée
Niveau inférieur		Température basse.

L'écoulement a lieu jusqu'à ce que les deux niveaux, c'est-à-dire les deux températures soient égales. Cette vue naïve peut être rendue utile par des considérations quantitatives. Si des masses déterminées d'eau et d'alcool, dont chacune est à une température définie, sont mélangées, la connaissance de leurs chaleurs spécifiques permet de prédire la température finale du mélange. Inversement, la détermination de la température finale et un peu d'algèbre nous permet de trouver le rapport entre les deux chaleurs spécifiques » (17). Il existe certes une différence fondamentale entre les deux phénomènes, puisque la substance calorifique est impondérable. Mais supposons que nous nous abstenions de toute hypothèse concernant la nature du calorique. Les lois de l'équilibre thermique et celles de l'équilibre hydrodynamique présentent le même comportement. Pour les deux sortes de phénomène, « la condition nécessaire de modification est l'existence d'une certaine différence.

(17) Einstein-Infeld, *L'évolution des idées en physique*, trad. Solovine, Flammarion, Paris, 1964, p. 34.

Cette différence sera, dans le premier cas, une différence de niveau, dans le second, une différence de température. L'équilibre a lieu quand la différence s'annule » (18). Pour corriger ce qu'a de boiteux l'analogie, il suffit donc de la poursuivre.

« Galilée, dit Mach, a ramené toute la mécanique des corps pesants au fait de l'accélération *constante* de leur chute, laquelle Newton reconnaît comme *dépendant* des éloignements réciproques des corps. De façon analogue, la théorie de Fourier repose sur le théorème newtonien de la proportionnalité entre la différence de température et la vitesse d'égalisation. Les capacités de conduction et les capacités calorifiques déterminent les facteurs de proportionnalité, comme les masses le font en mécanique. Dans le cas de corps gravitant l'un vers l'autre ce sont les distances, dans le cas des corps ayant des températures inégales ce sont les températures qui tendent à s'égaliser. La seule différence est que dans le premier cas les *accélérations* d'égalisation sont déterminées par les différences d'éloignement, dans le second les *vitesse*s d'égalisation le sont par les différences de température » (19). Telle est l'analogie sur laquelle repose la théorie physique qui, à la fin du XIX^e siècle, devint prépondérante et donna sa forme au positivisme d'alors : l'énergétisme. L'énergétisme postule une unité phénoménale de la nature obéissant au « principe du devenir ». « D'après ce principe, tout changement ayant lieu dans la nature pourrait se ramener à un échange d'énergie et, à ce point de vue, toutes les formes d'énergie seraient considérées comme autonomes et comme pleinement équivalentes. A toute forme d'énergie correspondrait un facteur d'intensité qui lui est propre : pour la gravitation, ce facteur serait la hauteur, pour la chaleur, la température. C'est la différence dans les facteurs d'intensité qui déterminerait la manière dont les phénomènes se déroulent dans le temps... » (20). L'une des conséquences d'une telle conception fut de contester l'existence du zéro absolu de l'échelle des températures : « car de même qu'on ne connaît que des différences de niveau et des différences de potentiel, on ne connaît aussi que des différences de température » (21).

En somme, l'énergétisme renverse, au moins au point de vue méthodique, au profit de la thermologie la prééminence qu'on avait d'abord reconnue à la mécanique sur la thermologie. La thermologie, d'emblée, se présente

(18) Planck, *Initiation à la Physique*, Flammarion, Paris, 1941, p. 55. Planck vise le texte de Mach, p. 57 : « *Le concept de température est un concept de niveau* comme la hauteur d'un corps lourd, la vitesse d'un corps mù, le potentiel électrique et magnétique, la différence chimique. L'influence thermique a lieu entre des corps de température différente semblablement à la façon dont a lieu l'influence électrique entre des corps de potentiel différent ».

(19) Mach, *Prinzipien der Wärmelehre*, 4te Aufl., Barth, Leipzig, 1923, p. 116.

(20) Planck, p. 56, p. 258.

(21) Planck, p. 258 ; Mach, p. 55-56, p. 341-342.

comme une physique phénoménologique, dans laquelle la notion de force ne joue aucun rôle (22). Or l'énergétisme se propose de reconstruire la mécanique en faisant précisément l'économie de ce terme de force, qui manque à la thermologie. Il élimine la notion de cause (23) comme relique du fétichisme et réduit l'explication à une simple description et classification des faits (24). L'analogie du fluide, une fois qu'on a remarqué son inadéquation du fait que le calorique n'est pas indestructible, cesse donc d'être une objection pour cette conception. « Toutes les espèces de courants stationnaires font connaître des traits communs, et même l'état *complet* d'équilibre dans un milieu étendu partage ces traits avec l'état *dynamique* d'équilibre, celui du courant stationnaire. Des choses aussi éloignées que les lignes de force magnétiques d'un courant électrique et les lignes de courant d'un tourbillon d'un fluide sans frottement entrent par là dans un rapport déterminé de ressemblance... Une telle relation entre systèmes de concepts, dans laquelle on prend clairement conscience aussi bien de la dissemblance de deux concepts homologues que de leur accord dans les rapports logiques de deux paires homologues de concepts a coutume de s'appeler *analogie*. Celle-ci est un moyen efficace pour maîtriser des domaines de faits hétérogènes par une conception unitaire. On aperçoit ici clairement le chemin sur lequel se développera une *phénoménologie physique générale*, comprenant tous les domaines, une représentation de la physique libre d'hypothèses. Le principe de *Carnot-Clausius* tiré primitivement d'une ressemblance dans le comportement de la chaleur et dans celui d'un fluide pesant, peut, si l'on observe de telles *analogies*, s'étendre à tous les domaines de la physique » (25).

Une analogie entre des phénomènes, pour Mach, est donc un système de relations fonctionnelles linéaires non causales entre les dérivées de ces phénomènes par rapport au temps et des dérivées de quelque ordre qu'on voudra de ces mêmes phénomènes par rapport à l'espace moyennant des constantes caractéristiques de ces phénomènes. Un tel positivisme entraîne une conception étroite et ponctuelle de la vérification individuelle des hypothèses. Lorsque Mach fait de la théorie de Fourier une théorie modèle de la physique, parce qu'elle repose non sur une hypothèse, mais sur un fait, il l'oppose

(22) Fourier, Chapitre I, Section I, § 17, p. 11, « On aperçoit par ce qui précède, qu'il existe une classe très étendue de phénomènes qui ne sont pas produits par des forces mécaniques, mais qui résultent seulement de la présence et de l'accumulation de la chaleur. Cette partie de la Philosophie naturelle ne peut se rapporter aux Théories dynamiques ; elle a des principes qui lui sont propres, et elle est fondée sur une méthode semblable à celle des autres sciences exactes ».

(23) Mach, p. 432-436.

(24) Mach, p. 436-439 ; voir p. 362 *sq.* la comparaison qu'il établit entre son point de vue phénoménologique sur la Dynamique et celui de Newton auxquels il oppose le point de vue mécanique de Hooke.

(25) Mach, p. 402-403.

précisément à la théorie cinétique, qui part de l'hypothèse du mouvement des molécules, hypothèse à chaque instant affrontée à la contradiction de nouveaux faits ⁽²⁶⁾.

Les analogies de Mach peuvent être regardées comme matérielles, en ce que l'assignation des différences, d'où résulte tout phénomène physique, détermine la nature de ce dernier. C'est pourquoi, une fois ces différences assignées, qui précisent la portée et les limites de l'analogie, la tâche du physicien peut être regardée comme accomplie. L'expérience confirmera ou infirmera telle hypothèse isolée, c'est-à-dire qu'elle assignera telle différence. Tout problème qui ne rentrerait pas dans ce schéma sera physiquement dépourvu de sens. Pour une proposition, être significative c'est être vérifiable isolément. Les connexions que les mathématiques établissent entre les faits n'empêchent pas que les lois ne sont que des faits généraux et que toute théorie physique qui ne se réduirait pas à de tels faits demeurerait contraire aux canons du positivisme.

L'énergétisme, cependant, au début de ce siècle, prit, avec Duhem, une forme très différente du positivisme de Mach, un peu comme aujourd'hui, Quine a donné à la philosophie analytique une expression très différente de celle qu'elle avait reçue dans le positivisme de Carnap. Les critiques que Mach adresse à Dalton pour ses anticipations atomistiques ⁽²⁷⁾ sont tout à fait semblables à celles de Duhem ⁽²⁸⁾. Mais cette critique commune introduit à deux conceptions quelque peu différentes.

La phénoménologie, telle que la conçoit Mach, exclut les hypothèses et n'admet que les faits et les rapports entre faits. Elle est donc fidèle aux maximes de Comte. Si une hypothèse par essence invérifiable, telle que l'hypothèse cinétique, peut intervenir dans la science, c'est uniquement à titre heuristique et à la condition de disparaître des résultats. Supposons, par exemple, que, malgré ses dénégations, Fourier se soit inspiré de la théorie des fluides pour établir l'équation (2). Cette inspiration n'a aucun effet réel sur l'équation de conductibilité, non plus que l'inspiration contraire qu'on pourrait emprunter à la théorie cinétique. Il ne reste donc, une loi étant proposée, qu'à comparer ses prédictions avec l'expérience. Ces prédictions sont-elles démenties ? On corrigera la loi. Mais cette correction, même si elle s'inspire d'une hypothèse invérifiable, n'appartient à la physique que parce qu'elle est elle-même vérifiable ou infirmable par l'expérience. L'hypothèse en tant que telle n'est donc pas un élément constitutif de la physique.

(26) *Id.*, *Ibid.*, p. 115.

(27) Par exemple p. 21.

(28) *Le Mixte et la combinaison chimique, Essai sur l'évolution d'une idée*, Naud, Paris, 1902, chap. VIII, p. 143-161.

Au contraire, Duhem admet la nécessité des hypothèses, dont seul le corps théorique est collectivement vérifiable ou infirmable. S'il rejette cependant la théorie cinétique, c'est que ses hypothèses introduisent des éléments qui empêchent même une vérification globale, parce qu'ils prétendent nous faire accéder aux secrets de la nature. Naturellement, comme chez Mach, de telles hypothèses peuvent jouer un rôle heuristique dans la découverte subjective des lois. Elles n'en peuvent jouer dans la constitution objective des théories. Il reste à comprendre pourquoi Duhem abandonne le « vérificationisme » de Mach au profit de la représentation « holistique » de la science que Quine a accréditée à partir d'arguments logiques.

En ce qui concerne les analogies hydrodynamiques qui servent de fondement à la théorie de Fourier, dit Duhem, « ces hypothèses nous apparaissent aujourd'hui comme ayant des antécédents historiques, mais point de justification logique ; au point de vue de la pure Logique, nous les posons d'une manière entièrement arbitraire ; la suite montrera que nous avons eu raison de les poser parce que la théorie qu'elles contribuent à édifier représentera avec une exactitude suffisante les lois du mouvement d'un grand nombre de systèmes » (29). Comme dans tout le *Traité d'Energétique et de Thermodynamique générale*, Duhem donne aux mots : *mouvement d'un grand nombre de systèmes* leur sens aristotélicien ; il s'agit d'un changement d'état en général — et dans notre cas d'un changement de température — et non d'un déplacement local.

Duhem énonce donc un certain nombre d'hypothèses ou de conventions arbitraires, justifiées par le seul accord général entre leur système et l'expérience. Parmi ces hypothèses, la première équivaut à l'équation (2) énoncée dans des conditions plus générales (30). Duhem n'avance aucune justification à son propos. Sa thèse conventionaliste ou plus proprement synthétique, en vertu de laquelle il est impossible d'estimer isolément une hypothèse physique, seul le corps de ces hypothèses pouvant affronter collectivement le verdict de l'expérience, est donc liée à une situation historique déterminée, où il s'agissait d'abandonner les fluides sans pour autant recevoir la théorie cinétique, où, par conséquent, la physique positive ou plutôt abstraite prétendait se débarrasser de toute théorie non phénoménologique. La thèse synthétique de Duhem ne fait donc que traduire la nécessité de recevoir des hypothèses injustifiables dès lors que l'analogie hydrodynamique qui les fondait a été abandonnée.

Duhem a souvent rapproché l'énergétisme et la physique d'Aristote, du moins dans la conception que cette dernière se fait du cycle des éléments.

(29) Duhem, II, p. 206-207.

(30) Relations (2) de la p. 208 (t. II).

Deux traits principaux justifient ce rapprochement. Premièrement la phénoménologie énergétique traite, autant qu'il est possible, de données sensibles directes et irréductibles dans leur matérialité : telles sont aussi les qualités ultimes qui fondent la physique d'Aristote. Deuxièmement, la conception de qualités ultimes introduit inévitablement dans la science un cloisonnement matériel, qui répond à l'axiome aristotélicien selon lequel il n'y a de science que d'objets appartenant à une catégorie unique et non d'entités relevant de plusieurs catégories distinctes. L'unité analogique entre les divers compartiments de la science sera donc purement formelle : ce sera, pour reprendre le terme de Mach, une unité d'analogie, mais, cette fois, le physicien devra se garder de rechercher une unité réelle ou matérielle qui expliquerait ces analogies entre domaines différents. La conception phénoménologique de Duhem a donc le mérite de refléter une situation de la science qui se renouvelle constamment, où de nouveaux champs de recherche naissent par simple juxtaposition analogique sans qu'aucune unité autre que formelle ne vienne les unir au corps déjà constitué des vérités physiques.

L'énergétisme formel renonce donc à déterminer la vérité expérimentale autrement que par une cohérence théorique très générale. Les analogies matérielles de Mach permettaient d'en finir avec la métaphysique, puisque chaque expérience isolée répondait d'elle-même. Les analogies formelles de Duhem, au contraire, si du moins la physique reste une image de la réalité, appellent, au niveau de la théorie, dont le physicien ne fait lui-même qu'éprouver la cohérence, une interprétation matérielle qui incombe au seul philosophe. Le positivisme n'abolit pas la métaphysique. Il se contente d'en séparer la science.

V

Planck a critiqué le caractère superficiel de l'analogie énergétique. La loi de chute des corps est une loi dynamique et nécessaire ; la loi de propagation thermique est une loi statistique fondée sur les probabilités. En effet, la première repose sur le principe de la conservation de l'énergie ; au contraire la chaleur pourrait passer du corps froid dans le corps chaud sans que pour autant le principe de conservation fût violé, puisque, tout ce que le principe demande, c'est que la chaleur fournie par le corps chaud soit égale à la chaleur cédée au corps froid ⁽³¹⁾. De plus, quand un liquide tend à égaliser

(31) Planck, p. 57 ; voir Duhem, II, p. 216.

son niveau dans deux vases communiquants, il le fait par une série d'oscillations : si l'on pouvait éviter toute perte d'énergie provenant de la résistance de l'air et du frottement du liquide contre les parois, le liquide oscillerait indéfiniment autour de sa position d'équilibre. Au contraire, il n'y a pas trace d'une telle oscillation dans la propagation de la chaleur qui a toujours lieu dans un même sens ⁽³²⁾. Le phénomène mécanique est réversible ; le phénomène thermique est irréversible et les phénomènes irréversibles dépendent du second principe de la thermodynamique ⁽³³⁾. La distinction de ces deux types de loi conduit à la théorie atomique, pour laquelle « le transfert thermique d'un corps chaud vers un corps froid ressemble, non à la chute d'un poids, mais à un phénomène de mixtion, c'est-à-dire à ce qui se passe quand on mélange deux poudres superposées dans un même récipient en agitant ce dernier. On ne voit pas alors la poudre passer par des états oscillants de la séparation complète au mélange parfait ; la transformation s'effectue, au contraire, en une seule fois et elle a lieu dans un sens déterminé, toujours le même, qui est de la séparation vers le mélange. Le mélange, une fois effectué, reste indéfiniment dans le même état ; ce qui est conforme à la notion de phénomène irréversible. En vertu de cette analogie, le second principe de la thermodynamique apparaît comme étant un postulat statistique, une question de probabilité » ⁽³⁴⁾.

Cette critique atteint l'énergétisme tout entier. Il en va de même pour le reproche que Poincaré faisait aux théories des fluides : en matérialisant ces derniers, « on accentuait pour ainsi dire leur individualité, on creusait entre eux une sorte d'abîme. Il a bien fallu le combler quand on a eu le sentiment plus vif de l'unité de la nature, et qu'on a aperçu les relations intimes qui en relient toutes les parties ». Ce n'est pas seulement de ces anciens physiciens qu'on peut dire « qu'ils rompaient des liens véritables » ⁽³⁵⁾. Assurément les énergéticiens avaient abandonné les fluides matériels. Ils en conservaient cependant la conséquence, en renonçant à l'unité de la nature.

Cependant, cette notion d'unité est ambiguë, selon qu'on prétend la ressaisir au niveau des phénomènes mêmes ou qu'on la cherche au contraire au niveau des causes.

(32) Planck, p. 57.

(33) Planck, p. 64-65.

(34) Planck, p. 259.

(35) Poincaré, *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1968, p. 180.

Pour nous débarrasser des associations qui pèsent sur l'analogie du fait du caractère matériel du fluide hydrodynamique, il conviendra de comparer au point de vue purement phénoménologique la chaleur à l'électricité plutôt qu'à l'eau.

Considérons l'analogie suivante entre une situation électrostatique et une situation de flux de chaleur stationnaire ⁽³⁶⁾. Pour plus de clarté, construisons-la par comparaison.

1) Soit un bloc de matière, éventuellement non homogène, où la température T varie de point en point. En conséquence de ce champ scalaire des températures il y a un champ vectoriel de vecteurs \vec{h} représentant le flux de chaleur.

2) \vec{h} représentant la quantité d'énergie calorifique qui s'écoule par unité de temps à travers une surface unitaire perpendiculaire au flux, la divergence de \vec{h} représente le taux par volume unitaire auquel la chaleur quitte une région.

3) Supposons qu'il existe une source de chaleur dans le bloc et soit s l'énergie calorifique ainsi produite par unité de volume par seconde. Soit u l'énergie interne par volume unitaire : $-\frac{du}{dt}$ sera également une « source » d'énergie calorifique. Donc :

$$\operatorname{div} \vec{h} = s - \frac{du}{dt}$$

1) Soit un système de diélectriques séparant des champs, tel que le potentiel électrique ϕ varie de point en point. En conséquence de ce champ scalaire du potentiel, il y a un champ vectoriel de vecteurs \vec{E} représentant le flux du champ électrique.

2) \vec{E} représentant la quantité d'énergie électrique qui s'écoule par unité de temps à travers une surface unitaire perpendiculaire au flux, la divergence de \vec{E} représente le taux par volume unitaire auquel l'énergie électrique quitte une région.

3) Supposons qu'il existe une charge électrique dans le système précédent et soit ρ/ϵ_0 cette charge intérieure.

L'hypothèse électro-statique rend impossible l'analogie de cette supposition.

(36) Feynman, Leighton, Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, 3 vol., Reading, 1964, II, 12-2 ; Einstein-Infeld, p. 60.

4) Supposons le mouvement de chaleur stationnaire où les sources constantes produisent un état de régime (c'est d'un tel état que part Fourier). Alors :

$$\operatorname{div} \vec{h} = s$$

Cette équation est l'équivalent (37) statique de (2).

5) Le courant vectoriel de chaleur est proportionnel au gradient de la température

$$\vec{h} = -K \operatorname{grad} T$$

(K = conductivité thermique)

6) En conséquence :

$$\operatorname{div} (K \operatorname{grad} T) = -s$$

4)

$$\operatorname{div} (\kappa \vec{E}) = \frac{\rho \text{ libre}}{\epsilon_0}$$

(κ , constante diélectrique).

5) Le courant électrique est proportionnel au gradient du scalaire φ .

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi$$

6) En conséquence :

$$\operatorname{div} (\kappa \operatorname{grad} \varphi) = -\frac{\rho \text{ libre}}{\epsilon_0}$$

D'autres analogies sont possibles, avec le déplacement d'une membrane (38) ou avec la diffusion des neutrons (39). Comment expliquer que les mêmes équations s'appliquent à des phénomènes différents ?

1) Il ne peut s'agir d'invoquer ici une unité sous-jacente de la nature. Car pouvons-nous réellement « imaginer que le potentiel électrostatique est *physiquement* identique à la température ou à la densité des particules ? » (40).

(37) Plus exactement, elle correspond à l'équation de Poisson. L'équation générale de propagation de la chaleur a la forme :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K}{\rho c} \nabla^2 T + \frac{A}{\rho c}$$

dans le cas où A(x, y, z) calories sont produites dans le milieu homogène par unité de volume entourant le point (x, y, z) par seconde (Margenau-Murphy, *The Mathematics of Physics and Chemistry*, Princeton, van Nostrand, 2nd ed. 1956, p. 237). Dans ces conditions, à l'état de régime (stationnaire) correspond l'équation :

$$\nabla^2 T = -s$$

où $s = \frac{A}{K}$. C'est là l'équation de Poisson. Les considérations de Fourier supposent qu'au-

cune source de chaleur n'est présente à l'intérieur du solide, ce qui annule le terme s.

(38) Feynman, *Ibid.*, 12-3.

(39) Feynman, *Ibid.*, 12-4.

(40) Feynman, *Ibid.*, 12-7.

2) L'imagination métaphysique d'une substance, d'un fluide, dont l'unique fonction est de légitimer une équation commune, doit également être rejetée, comme l'ont aperçu les premiers positivistes, Fourier et Comte. Les théories modernes de la chaleur et de l'électricité ont d'ailleurs entièrement éliminé une telle représentation.

3) Le conventionalisme est, à lui seul, impuissant à expliquer l'analogie de la nature.

4) Fourier et Comte ont eux-même expliqué la généralité et la simplicité du caractère mathématique de la loi de propagation par son caractère différentiel. Leur explication mérite d'être retenue. « Lorsque l'on regarde de plus près la physique des différents sujets, on voit, en réalité, que les équations ne sont pas identiques. L'équation trouvée pour la diffusion des neutrons est une simple approximation, valable lorsque la distance considérée est grande, comparée avec le chemin moyen libre. Si nous y regardions de plus près, nous verrions la course des neutrons individuels. Certainement le mouvement d'un neutron individuel est une chose complètement différente de la variation régulière que nous obtenons en résolvant l'équation différentielle. L'équation différentielle est une approximation, parce que nous supposons que les neutrons sont régulièrement distribués dans l'espace. Est-il possible que ce soit là la piste ? Que la chose qui est commune à tous les phénomènes est l'espace, le cadre dans lequel la physique est placée ? Aussi longtemps que les choses sont raisonnablement régulières dans l'espace, les choses importantes qui sont impliquées seront les taux de changement des quantités avec la position dans l'espace. C'est pourquoi nous obtenons toujours une équation avec un gradient. Les dérivées doivent apparaître sous la forme d'un gradient ou d'une divergence ; parce que les lois de la physique sont *indépendantes de la direction*, elles doivent être exprimées sous forme vectorielle. Les équations de l'électrostatique sont les équations vectorielles les plus simples qu'on obtient et qui impliquent seulement les dérivées spatiales des quantités. Tout autre problème *simple* — ou tout autre simplification d'un problème compliqué — doit ressembler à l'électrostatique. Ce qui est commun à tous nos problèmes c'est qu'ils impliquent l'espace et que nous avons imité ce qui est en réalité un phénomène compliqué par une équation différentielle simple » (41).

Or qu'on observe comment Auguste Comte introduit au problème de Fourier (42). Il distingue d'abord les transformations profondes que la chaleur produit sur les corps et les élimine pour ne retenir que le phénomène de son transfert. Ensuite il élimine la considération des fluides où le transport de chaleur s'accompagne des mouvements rapides du fluide (phénomènes de

(41) Feynman, *Ibid.*

(42) Comte, p. 427-430.

convection) et ceci malgré la facilité qu'offrent les fluides de mesurer leur température. C'est par suite de ces éliminations qu'on arrive au « phénomène fondamental de la diffusion de la chaleur dans l'intérieur d'une masse solide par la seule action graduelle et continue de ses molécules consécutives » (43). Mais on aperçoit du même coup quelles sont les conditions qui ont permis le développement de la physique mathématique. L'expérience fournit un phénomène complexe donné directement. Il faut le résoudre en un nombre très grand de phénomènes élémentaires 1) dans le temps : d'où le caractère différentiel des équations, 2) dans l'espace : d'où l'aspect contigu de la conductibilité thermique dans un solide, chaque point ne cédant immédiatement de chaleur qu'aux points voisins, en sorte que « c'est de proche en proche que le flux de chaleur pourra atteindre d'autres portions du solide » (44), 3) dans le caractère homogène de la fonction qui intègre les phénomènes élémentaires : « On peut se demander pourquoi, dans les sciences physiques, la généralisation prend volontiers la forme mathématique. La raison est maintenant facile à voir ; ce n'est pas seulement parce que l'on a à exprimer des lois numériques : c'est parce que le phénomène observable est dû à la superposition d'un grand nombre de phénomènes élémentaires *tous semblables entre eux* : ainsi s'introduisent tout naturellement les équations différentielles. Il ne suffit pas que chaque phénomène élémentaire obéisse à des lois simples, il faut que tous ceux que l'on a à combiner obéissent à la même loi. C'est alors seulement que l'intervention des mathématiques peut être utile ; les mathématiques nous apprennent, en effet, à combiner le semblable au semblable. Leur but est de deviner le résultat d'une combinaison, sans avoir besoin de refaire cette combinaison pièce à pièce... C'est donc grâce à l'homogénéité approchée de la matière étudiée par les physiciens que la physique mathématique a pu naître » (45).

Mach (46) n'est pas sans avoir rencontré cette pensée, à propos de l'équation de Laplace. Il lie trois caractères qui appartiennent à certaines lois physiques : 1) elles expriment directement les liaisons à petite échelle entre quantités, 2) elles expriment les modifications des quantités dans leur représentation spatiale par l'écart entre leurs valeurs en un point et leurs valeurs moyennes aux points voisins, 3) elles permettent des analogies en vertu de l'universalité et de la simplicité propre à leur établissement. Ainsi et par définition la phénoménologie physique s'assigne des lois moyennes, mais ana-

(43) Comte, p. 431.

(44) Poincaré, p. 168.

(45) Poincaré, p. 171-172. Il ajoute : « Dans les sciences naturelles, on ne retrouve plus ces conditions : homogénéité, indépendance relative des parties, simplicité des faits élémentaires, et c'est pour cela que les naturalistes sont obligés de recourir à d'autres modes de généralisation ».

(46) Mach, p. 117-119.

logiques. Si l'équation de Laplace est phénoménologique, c'est qu'elle possède un caractère approché. Si l'on représente $u(x, y, z, t)$ comme une caractéristique d'état d'un point matériel (température, potentiel, concentration d'une solution, vitesse de potentiel, etc.), chaque changement de l'état ainsi que la permanence de l'état stationnaire sont déterminés par les différences de valeur de u au point (x, y, z) et aux points voisins. Dans un continuum physique, le comportement de chaque point est déterminé par l'écart de la valeur de sa caractéristique physique par rapport à une certaine valeur moyenne de la caractéristique des points voisins. L'expression de la valeur moyenne est égale à :

$$u + \frac{m}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

où le coefficient m ne dépend que du comportement de la fonction de la distance déterminant le poids des points voisins dans la valeur moyenne.

Dans le cas de la conduction thermique ($u = T$), $m = \frac{2K}{c\rho}$. L'utilisation

de l'expression de la valeur moyenne repose sur une approximation qui constitue précisément la signification phénoménologique de l'équation de Laplace ⁽⁴⁷⁾. Des complications apparaissent dès que les valeurs du caractère physique d'état d'un point matériel influence le poids des points voisins dans la valeur moyenne, comme Forbes l'a montré expérimentalement. C'est ici que l'analogie achoppe et que la physique rencontre ce que le phénomène a de spécifique. Or, note Mach, « on voit de quelle façon en admettant le point de vue qu'on vient d'exposer s'introduiraient les recherches de *théorie moléculaire* sur la signification de m , sur sa liaison avec la *capacité d'absorption* et *d'émission* » ⁽⁴⁸⁾. Sur cette introduction, Mach ne laisse pas de doute : c'est alors également que la physique fait, selon lui, place à la spéculation.

Sous sa forme positiviste comme sous sa forme duhemienne, qu'il accepte ou refuse le recours à des hypothèses physiques irréductibles à des faits généraux, l'énergétisme tient donc les deux affirmations suivantes :

1) Si des équations formellement identiques s'appliquent à des domaines différents de la physique, l'unité de la nature que ces équations révèlent n'est que formelle et regarde nos procédés d'approximation et non les choses mêmes. En tant qu'irréductibles, les « grandes » hypothèses sont étrangères à des spéculations matérielles sur la « nature des fluides ».

2) Pour qu'une analogie puisse être interprétée objectivement, il faut que

(47) « Si la valeur de ϕ [qui est la fonction de la distance, supposée généralement diminuer très rapidement quand la distance s'accroît] diminue plus lentement quand s'accroît la distance, le développement jusqu'au deuxième quotient différentiel ne suffit pas ».

(48) Mach, *Ibid.*

tant les coefficients que les effets appartiennent à un domaine identique de la physique, c'est-à-dire, finalement, à un même domaine perceptif.

Bien qu'à l'époque de l'énergétisme ces deux affirmations aient reçu la forme particulière qui vient d'être analysée, ils constituent, en réalité, les principes d'une conception plus générale de la physique qu'on peut appeler « phénoménologique » et dont le système de Kant est l'une des expositions les plus précises.

Kant distingue deux sortes de principes. Il appelle les premiers « mathématiques » parce qu'ils autorisent à appliquer les mathématiques à la physique. Parmi les lois de la physique qui rentrent dans ce groupe, il range, significativement, les lois de ce qu'il appelle « dynamique » (anticipations de la perception) ou science des grandeurs intensives. Photométrie, et thermologie dans la mesure où par la loi de Mariotte-Boyle on étudie les relations entre pression, volume et température d'un gaz, sont des applications particulières de ces principes mathématiques. Nul doute que la loi de Fourier eût été rangée par Kant sous la même catégorie et que l'analogie plus générale qu'elle indique n'eût reçu de lui qu'une interprétation formelle, conformément à ce qu'exige la première affirmation de la phénoménologie.

La seconde affirmation touche au principe de l'induction. Newton avait écrit : « Puisqu'il est constant, par les expériences et les observations astronomiques, que tous les corps qui sont à la surface de la Terre pèsent sur la Terre selon leur quantité de matière, que la Lune pèse sur la Terre en raison de sa quantité de matière, que notre Terre pèse à son tour sur la Lune, que toutes les planètes pèsent mutuellement les unes sur les autres et que les comètes pèsent aussi sur le Soleil, on peut conclure que tous les corps gravitent mutuellement les uns vers les autres »⁽⁴⁹⁾. Dans ce texte, Newton ne se borne pas à énoncer une analogie mathématique ou formelle entre les phénomènes. Il attribue à tous les corps la gravitation parce que le facteur d'intensité est un coefficient matériellement identique, la masse, calculable en nombre d'unités choisies, et que les effets, à savoir les changements de distance et de vitesse des corps, relèvent eux aussi des mêmes unités matérielles. Kant nomme de telles analogies les analogies de l'expérience, qui permettent de conclure à l'existence physique et non plus à la forme mathématique du phénomène.

Or les analogies formelles sont d'emblée constitutives, puisque, ne regardant que la forme mathématique possible des phénomènes, elles n'entraînent aucun engagement ontologique qui dépasserait une assertion concernant le comportement moyen et approximatif d'un système. En revanche les ana-

(49) *Principia*, II, liv. III, Règle III ; sur ce point Vuillemin, *Physique et métaphysique kantienne*, P.U.F., Paris, 1955, p. 334.

logies de l'expérience ne sont que régulatrices. Tant que l'expérience ne les a pas vérifiées, elles doivent être tenues pour des règles d'enquête d'ailleurs objectives des phénomènes. Leverrier applique la loi de Newton aux perturbations d'Uranus. Si ces perturbations mêmes obéissent à la loi, il doit y avoir à tel instant en tel endroit du ciel un corps pesant, que l'astronome Galle découvrira en pointant à l'heure dite sa lunette dans la direction indiquée. Supposons en revanche une situation de même type que l'expérience ne viendrait pas confirmer. La loi de Newton s'en trouverait infirmée, comme il est en effet arrivé.

Comme Mach, comme Duhem, Kant n'assigne pas à la physique la tâche de déterminer par une hypothèse unique, c'est-à-dire par une analogie de l'expérience, la raison d'être des analogies formelles et de leurs limitations. Tous les physiciens n'ont pas partagé cette prudence. Dès 1738, Daniel Bernouilli avait imaginé le modèle cinétique d'un gaz parfait, fait de boules élastiques qui se choquent, sont dépourvues d'extension et, sauf pendant le choc, n'exercent aucune force l'une sur l'autre. Ce modèle conduit à poser :

$$\varepsilon_{\text{cin}} = \frac{3}{2} k T$$

où ε_{cin} est l'énergie moyenne des molécules et k est la constante du gaz rapportée à la molécule. Kant et, après lui, Fourier et Comte, refusent de faire usage de cette hypothèse, de même que Mach et Duhem refuseront d'interpréter la température comme un concept purement mécanique en utilisant l'équation :

$$\Theta = k T,$$

où Θ désigne le module d'une distribution canonique.

Or ce sont de telles « spéculations » qui peuvent expliquer pourquoi l'équation de Fourier (4) est irréversible (si on change le sens de dt le membre gauche change de valeur et non le membre droit) ainsi que l'équation de continuité. Et ce sont ces spéculations qui unifient matériellement la physique en réduisant des concepts phénoménologiques regardés par notre perception comme primitifs au statut de concepts dérivés. Mais du même coup, la première affirmation de l'énergétisme paraîtra contestable elle aussi dans certaines situations de la science. Si les variables thermodynamiques peuvent être définies au moyen des variables dynamiques, on pourra, derrière les unités formelles que les équations physiques révèlent au niveau de l'approximation, rechercher une unité matérielle de la nature même. Lorsqu'en particulier les quantités fondamentales auxquelles obéissent des corps entièrement différents se trouvent déterminées par les exposants de la valeur d'une certaine quantité et que ces exposants ont des valeurs remarquables et improbables, par exemple des valeurs non entières, le physicien sera porté à croire qu'il

ne s'agit pas d'un accident. C'est le cas, par exemple, pour les exposants dits critiques de la valeur absolue de la température réduite $\left(\frac{T - T_c}{T_c} \right)$, où T désigne la température réelle et T_c la température critique) qui déterminent les propriétés fondamentales de corps aussi différents qu'une substance ferromagnétique (aimantation spontanée, susceptibilité magnétique, longueur de corrélation) et qu'un fluide (différence de densité, compressibilité, longueur de corrélation). L'hypothèse dite de l'universalité fait alors dépendre ces quantités de deux paramètres seulement : paramètre d'ordre et dimensionalité d'espace. « Alors les détails de structures physiques qui distinguent un fluide d'un aimant sont moins importants que les propriétés géométriques »⁽⁵⁰⁾ qui découlent des deux paramètres.

Une unité naturelle de ce type paraît requérir pour les structures plus de réalité que ne requerrait la sujétion de phénomènes disparates aux équations électrostatiques. Dans ce dernier cas, le physicien ne prétendait rendre compte que de façon approchée des phénomènes et supposait donc une structure homogène de l'espace et une continuité des fonctions plus représentatives de la simplicité de nos opérations de calcul que de la nature même. Dans le cas de l'hypothèse d'universalité, c'est la nature même qui semble imposer le verdict. Une interprétation phénoménaliste était compatible avec le premier genre de structure. Le second paraît appeler une interprétation plus réaliste.

J. V.

PUBLICATIONS

Correction. Il faut lire, p. 366 de l'*Annuaire* de 1978-1979, ligne 9 : analogie *astronomique* au lieu d'analogie *mathématique*.

On Duhem's and Quine's theses (Grazer philosophische Studien, vol. 9, 1979, p. 69-96).

Is « Homo currit » identical with « Homo est currens » ? [in Language, Logic and Philosophy, Proceedings of the 4th International Wittgenstein Symposium, august-sept. 1979, Kirchberg (Austria), pp. 62-68].

MISSIONS

- Conférence au Congrès Wittgenstein de Kirchberg (août 1979).
- Conférence à l'Université de Montréal.

(50) K. Wilson, « Les phénomènes de physique et les échelles de longueur », *Pour la Science*, n° 24, oct. 1979 (p. 16-34), p. 12.

— Conférence à la Table ronde du C.N.R.S. à Aix (Philosophie de la connaissance et de ses moyens d'expression, mars 1980).

— Conférence à l'Université d'Helsinki.

— Conférence au Séminaire de philosophie des Universités suédoises (Cortona, avril 1980).

— Communication au 4^e Colloque de Bienne (Kant ; mai 1980 ; communication qui n'a pu être prononcée pour raison de maladie).

— Présidence de la Société française de Logique pour deux ans (1980-1982).