

# COSMOPOLITIQUES

isabelle stengers

⊙ Tome 1. La guerre des sciences ⊙ Tome 2. L'invention de la mécanique: pouvoir et raison

⊙ **Tome 3. Thermodynamique: la réalité physique en crise**

⊙ Tome 4. Mécanique quantique: la fin du rêve

⊙ Tome 5. Au nom de la flèche du temps: le défi de Prigogine

⊙ Tome 6. La vie et l'artifice: visages de l'émergence

⊙ Tome 7. Pour en finir avec la tolérance



*Thermodynamique :  
la réalité physique en crise*

## DU MÊME AUTEUR

### Aux Éditions La Découverte

- Les Concepts scientifiques : invention et pouvoir* (avec J. SCHLANGER), 1989, rééd. coll. « Folio-Essais », Gallimard, 1991.
- Mémoires d'un hérétique* (avec L. CHERTOK et D. GILLE), 1990.
- Histoire de la chimie* (avec B. BENSAUDE-VINCENT), 1993.
- L'Invention des sciences modernes*, 1993.

### Chez d'autres éditeurs

- La Nouvelle Alliance. Métamorphoses de la science* (avec I. PRIGOGINE), Gallimard, Paris, 1979 (rééd. augmentée « Folio-Essais », 1986).
- D'une science à l'autre. Des concepts nomades* (direction scientifique), Le Seuil, Paris, 1987.
- Entre le temps et l'éternité* (avec I. PRIGOGINE), Fayard, Paris, 1988 (rééd. coll. « Champs », Flammarion, 1992).
- Le Cœur et la Raison. L'hypnose en question de Lavoisier à Lacan* (avec L. CHERTOK), Payot, Paris, 1989.
- L'Hypnose, blessure narcissique* (avec L. CHERTOK), Éd. des Laboratoires Delagrangé, coll. « Les Empêcheurs de penser en rond », Paris, 1990.
- Drogues. Le défi hollandais* (avec O. RALET), Éd. des Laboratoires Delagrangé, coll. « Les Empêcheurs de penser en rond », Paris, 1991.
- La Volonté de faire science. A propos de la psychanalyse*, Éd. des Laboratoires Delagrangé/Synthélabo, coll. « Les Empêcheurs de penser en rond », Paris, 1992.
- Médecins et sorciers* (avec T. NATHAN), Éd. des Laboratoires Synthélabo, coll. « Les Empêcheurs de penser en rond », Paris, 1995.
- L'Effet Whitehead* (direction scientifique), Vrin, Paris, 1994.

Isabelle Stengers

Thermodynamique :  
la réalité physique  
en crise

*Cosmopolitiques III*

LA DÉCOUVERTE/LES EMPÊCHEURS  
DE PENSER EN ROND

1997

## Catalogage Electre-Bibliographie

Stengers Isabelle

Cosmopolitiques III – Thermodynamique : la réalité physique en  
crise/Isabelle Stengers

Paris : La Découverte ; Le Plessis-Robinson (Essonne) : Synthélabo,  
1997.

ISBN 2-7071-2659-4

Rameau : thermodynamique : histoire : xx<sup>e</sup> siècle.

physique : histoire : xx<sup>e</sup> siècle.

philosophie et sciences : histoire : xix<sup>e</sup> siècle.

Dewey : 501 : Sciences exactes. Philosophie et théorie.

530 : Physique. Généralités.

Public concerné : Universitaire. Professionnel, spécialiste.

Si vous désirez être tenu régulièrement au courant de nos parutions, il vous suffit d'envoyer vos nom et adresse aux Éditions La Découverte, 9 bis, rue Abel-Hovelacque, 75013 Paris. Vous recevrez gratuitement notre bulletin trimestriel **À La Découverte**.

© La Découverte/Les Empêcheurs de penser en rond, Paris et Le Plessis-Robinson, 1996.

## Préambule

Comment parcourir le paysage discordant des savoirs issus des sciences modernes ? Quelle cohérence déceler entre des visions, des ambitions, des démarches qui se contredisent ou se disqualifient les unes les autres ? L'espoir affirmé, il y a près de vingt ans, d'une « nouvelle alliance » est-il voué à rester un songe creux ?

A ces questions, je voudrais répondre par le pari d'une « écologie des pratiques », que j'ai choisi de construire en sept étapes, en sept livres<sup>1</sup> – celui-ci est le troisième. Chacun d'eux est singulier, et peut se lire isolément, mais j'aimerais qu'il soit une invite à lire les six autres, car l'ensemble forme un tout. Pas à pas, j'ai tenté de faire exister sept paysages problématiques, sept tentatives pour créer la possibilité d'une cohérence là où règne aujourd'hui l'affrontement. Qu'il s'agisse des enjeux de la physique et de ses lois, des débats sur l'auto-organisation et l'émergence, ou

---

1. On en trouvera la liste à la fin de ce livre, p. 141.

du défi lancé aujourd'hui par l'ethnopsychiatrie au « grand partage » entre savoirs modernes et archaïques, j'ai voulu dans chaque cas m'adresser aux pratiques dont ces savoirs sont issus, à partir des exigences portées par leurs questions et des obligations qui leur correspondent. Aucun savoir unificateur ne démontrera jamais que le neutrino des physiciens puisse coexister avec les mondes multiples mobilisés par l'ethnopsychiatrie. Cette coexistence a pourtant un sens, et il ne relève ni de la tolérance ni d'un scepticisme désenchanté : l'espace « cosmopolitique » où ces êtres peuvent être affirmés ensemble est celui de la rencontre entre les espoirs et les doutes, les effrois et les rêves qu'ils suscitent et qui les font exister. C'est pourquoi, à travers l'exploration de nos savoirs, c'est aussi à une forme d'expérimentation éthique que je voudrais convier le lecteur.



# 1

## Le triple pouvoir de la Reine des Cieux

En 1873, le physicien anglais James Maxwell écrit à son collègue Peter Tait : « C'est un plaisir rare que de voir ces physiciens allemands se disputer pour la priorité de la découverte que la seconde loi de la thermodynamique est le principe d'Hamilton [...]. Pendant ce temps, le principe d'Hamilton plane dans une région où ne peuvent l'atteindre les tracasseries statistiques, alors que les Icare allemands battent leurs ailes de cire [...] parmi ces formes nuageuses auxquelles l'ignorance et la finitude de l'humaine science ont conféré les attributs incommunicables de l'invisible Reine des Cieux<sup>1</sup>. »

Les physiciens allemands, en l'occurrence Rudolf Clausius, Hermann von Helmholtz et

---

1. Cité dans E. DAUB, « Maxwell's Demon », *in Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 1, 1970, p. 213-226, cit. p. 220.

Ludwig Boltzmann, se disputent donc l'honneur de savoir qui, le premier, a démontré que la loi de croissance de l'entropie thermodynamique dérivait de la mécanique hamiltonienne. Et Maxwell rit, ou ricane. Il sait que les attributs de la dynamique, Reine des Cieux, science des trajectoires célestes, sont *incommunicables*. La dynamique hamiltonienne est indifférente aux tracasseries statistiques au moyen desquelles les Allemands tentent de l'associer aux formes nuageuses de la thermodynamique. Un phénomène défini en termes thermodynamiques ne peut satisfaire les exigences de la mécanique.

Le ricanement de Maxwell ne nous étonne pas. Ce qu'il sait, et que les Allemands semblent encore ignorer, nous le savons aussi, ou croyons le savoir. Et la question, pour nous, est bien plutôt de comprendre comment certains ont cru, ne serait-ce que pendant quelques années, pouvoir conférer à une loi thermodynamique le statut d'énoncé dynamique.

Et pourtant, ce ricanement de Maxwell traduit également une situation nouvelle, une véritable mutation écologique. Dans *L'Invention de la mécanique*, j'ai suivi le chemin divergent de deux héritages de ce que j'ai appelé l'événement lagrangien : la construction d'équations dont la syntaxe affirme le pouvoir de l'égalité entre « cause » et « effet », pouvoir devenu créateur de fiction, constructeur d'un « objet » définissant sous ses propres conditions espace, force et mouvement. Hamilton marque l'un de ces chemins, et Carnot, l'autre, chacun prolongeant par des moyens

mutuellement incompatibles le pouvoir de la fiction lagrangienne. Or, les deux protagonistes mis en scène par Maxwell, la Reine des Cieux et la seconde loi de la thermodynamique, semblent, quant à eux, avoir surmonté cette incompatibilité, et cela non pas seulement pour les « Icare allemands », mais aussi pour Maxwell lui-même.

En effet, à l'époque où il écrit à Tait, Maxwell a déjà inventé « un petit être très observateur, et aux doigts habiles » capable de trier des molécules que nous ne pouvons, quant à nous, être ignorants et aux capacités finies, décrire qu'en masse. En 1874, le « démon de Maxwell » naîtra définitivement sous la plume de son collègue William Thomson, et ce démon aura pour fonction de montrer que la « dissipation de l'énergie », dont la seconde loi de la thermodynamique affirme le caractère inévitable, a en fait pour auteurs notre finitude et notre ignorance. « C'est seulement pour un être de niveau intermédiaire, qui peut mettre la main sur certaines formes d'énergie alors que d'autres lui échappent, que l'énergie semble se transformer de manière inévitable d'un état où elle est disponible en un état où elle est dissipée », écrira Maxwell en 1878<sup>2</sup>.

Le démon de Maxwell est toujours avec nous : sa présence est explicite lorsqu'un physicien s'adresse au grand public, mais il est implicitement requis chaque fois qu'il est nécessaire d'introduire une procédure d'approximation pour

---

2. Article « Diffusion » de l'*Encyclopedia Britannica*, 9<sup>e</sup> édition. Cité in DAUB, *op. cit.*

passer du « niveau fondamental de description » à une « propriété observable<sup>3</sup> ». Et chaque fois la Reine des Cieux de Maxwell semble affirmer son triomphe, le triomphe de la physique des lois sur celle des phénomènes. Nous sommes bel et bien entrés dans une nouvelle histoire, celle qui affirme ce que j'ai appelé dans *La Guerre des sciences* le « type psycho-social » du physicien identifié par une *vocation* : accéder, au-delà des phénomènes disparates et des savoirs opératoires qui s'y rapportent, à une vision du monde unique et objective, indépendante des préjugés et des intérêts humains.

Cette vocation trouve sa première expression dans la lettre que Maxwell écrit à Tait. Car la Reine des Cieux « plane », elle est indifférente aux tracasseries statistiques (les procédures d'approximation qui confèrent leurs significations aux propriétés expérimentales). Elle permet de disqualifier, en tant que créant une *fausse ressemblance*, la manière dont les thermodynamiciens héritiers de Carnot ont soumis, science humaine trop humaine, les transformations de la chaleur et du mouvement à la syntaxe des équations lagrangiennes<sup>4</sup>. La Reine des Cieux est donc vecteur

---

3. C'est-à-dire dans le cas où si cette procédure a pour résultat bienvenu de transformer la syntaxe de la description, en permettant de passer de « lois » qui affirment la conservation à des grandeurs expérimentales « dissipatives ». Voir, à ce sujet, N. CARTWRIGHT, *How the Laws of Physics Lie*, Clarendon Press, Oxford, 1983. Je reviendrai sur ce livre dans *Mécanique quantique : la fin du rêve ?*

4. Voir *L'Invention de la mécanique : pouvoir et raison*.

d'obligation : ne pas confondre une science entachée par l'ignorance et la finitude avec la pureté de son règne. Et le jugement de valeur qu'elle autorise opère une mise en hiérarchie radicale entre les deux héritages de l'événement lagrangien.

Mais, pourrait-on objecter, cette situation est-elle bien nouvelle ? L'ancien démon de Laplace n'opérait-il pas la même mise en hiérarchie ? Le démon de Maxwell ne serait-il pas sa simple reprise sur un nouveau terrain ? Et certes les deux démons ont, de fait, conféré pareillement aux probabilités la charge d'articuler notre monde incertain et la réalité « objective » où règne la loi. Mais, du point de vue écologique, pourtant, lorsque l'identité d'un être intègre la manière dont il entre en relation avec d'autres êtres<sup>5</sup>, la similarité entre les deux démons s'atténue beaucoup.

Le démon de Laplace, qui figurait dans l'introduction de son *Essai sur les probabilités* de 1814, avait en effet pour première, et même pour seule fonction d'assurer une coexistence pacifique entre le monde déterministe des lois du mouvement auquel il avait accès et l'ensemble des situations où les probabilités nous imposent leur pertinence. Le démon de Laplace affirmait donc bien une hiérarchie, mais c'était une hiérarchie dont ne découlait pour les physiciens aucune conséquence particulière<sup>6</sup>, et qui n'obligeait à

---

5. Voir *La Guerre des sciences*.

6. Le caractère « bon enfant » du pouvoir attribué, à travers le démon de Laplace, aux lois du mouvement se retrouve dans la facilité avec laquelle, à cette époque, sont

rien les utilisateurs des probabilités. Il ne pouvait en fait gêner que les philosophes, et il n'a pas dès lors suscité de controverse. Il prend sa place dans une assez ancienne histoire, que marque notamment le conflit philosophique à propos de la nature du mouvement entre atomistes et aristotéliens et la question théologique des rapports éventuellement privilégiés entre le mouvement des corps célestes et l'intelligibilité du monde en tant que création divine.

Le démon de Maxwell, en revanche, annonce la création d'une hiérarchie à *l'intérieur* de la physique, d'une discrimination entre différentes pratiques de connaissance qui s'adressent *aux mêmes phénomènes* mais correspondent à des exigences et à des obligations distinctes, entre lesquelles un jugement de valeur peut opérer. La création d'une hiérarchie de ce type constitue un moment crucial du point de vue écologique, et l'événement se joue à un moment précis. Il n'aurait pas été possible pendant la première moitié du

---

acceptés des rapports de ressemblance rétrospectivement indéfendables. Ainsi, la notion d'équilibre fut longtemps considérée comme « bien commun » entre la dynamique et les autres sciences qui, elles aussi, décrivent l'évolution « vers l'équilibre » de ce qui les occupe, phénomènes chimiques, électriques ou thermiques notamment. C'était oublier ce que nul ne pourrait plus ignorer lorsque la Reine des Cieux de Maxwell affirmera son pouvoir : un système dynamique « pur » n'évolue jamais « vers » l'équilibre. Seuls les frottements, qui amortissent le mouvement, sont responsables de ce qu'un pendule, par exemple, s'immobilise finalement dans son état d'équilibre immobile.

XIX<sup>e</sup> siècle, et, d'une manière ou d'une autre, ses conséquences seront stabilisées dans les premières années du XX<sup>e</sup> siècle, alors que se déclinera le grand thème de la vocation du physicien. Avec Maxwell, la Reine des Cieux, dont s'autorisait déjà le démon de Laplace, affirme son pouvoir, et ce pouvoir doit se dire trois fois.

Une première fois, la Reine des Cieux triomphe en ce que ces « physiciens allemands » que critique Maxwell ont, semble-t-il, déjà cédé à sa séduction. Si Maxwell peut se contenter d'une constatation technique – les « attributs de la Reine des Cieux » sont incommunicables –, n'est-ce pas que les Allemands ont cru possible d'étendre « en vrai » ces attributs au monde des phénomènes thermodynamiques ? Elle triomphe une deuxième fois à travers le jugement de valeur selon lequel la thermodynamique se fonde sur un rapport de ressemblance créé artificiellement avec la dynamique : la Reine des Cieux a donc le pouvoir de disqualifier ce qui, pour certains physiciens de l'époque tel Pierre Duhem, était, on le verra, une conquête de la rationalité, l'abandon de toute prétention « métaphysique » au profit d'une relation sobre et lucide entre description rationnelle et expérimentation. Et, avec le démon de Maxwell, elle prétend enfin au pouvoir d'une vision du monde : les « incommunicables attributs » de la Reine des Cieux semblent devoir être communiqués à la population des molécules que manipule ce démon pour qui toutes les formes d'énergie sont également disponibles. La juridiction de la dynamique semble devoir être étendue à l'ensemble des phénomènes que décrit la thermodynamique.

Le triple pouvoir qui singularise la Reine des Cieux est nouveau. Contrairement à celui du démon de Laplace, il n'a rien à voir avec une rhétorique tout-terrain mais traduit une vocation qui vise aussi bien le monde physique que le physicien lui-même. Nous sommes donc là face à un moment crucial du point de vue de l'écologie des pratiques. Lorsqu'une pratique scientifique moderne se borne à juger ou à disqualifier ce qui l'a précédée ou ce qui l'entourne, comme Laplace le fait avec son démon, l'entreprise traduit la préexistence de rapports hiérarchiques, et ne pose pas d'autres problèmes. La seule question intéressante est celle de l'avenir où pourront être mis en question ces rapports, où l'ignorance et l'arrogance qu'ils autorisaient ne seront plus confondues avec le pouvoir qu'aurait la raison, ou la science, de disqualifier les apparences (et surtout l'opinion qui s'y réfère). Quant au passé, il s'agit simplement de cesser de le prendre au sérieux et d'apprendre à rire de ceux qui l'honorent. En revanche, le triomphe de la Reine des Cieux pose un problème très différent, qui noue tout autrement le passé et l'avenir. Le triple pouvoir auquel elle prétendait était bel et bien porteur d'un programme pour la physique, un programme qui a, pour le meilleur et pour le pire, généré des pratiques nouvelles indissociables de la physique du  $xx^e$  siècle.

Comment « dire » l'existence d'un neutrino ? C'était la « question symbole » posée dans *La Guerre des sciences*, premier volume de ces *Cosmopolitiques*. Car le neutrino a un mode



d'existence double, expérimental et théorique. Son mode d'existence expérimental ne crée pas, en fait, de problème spécial du point de vue de l'écologie des pratiques, pas plus en tout cas que le micro-organisme qu'a fait exister Pasteur ou que tout autre « faitiche expérimental ». Il affirme « simplement » l'autonomie singulière de ces êtres que font exister nos pratiques expérimentales, les exigences singulières que doivent satisfaire pour être dit « exister » ce que nous fabriquons en laboratoire. En revanche, le mode d'existence théorique du neutrino est, contrairement à celui du micro-organisme pastorien, solidaire d'un faitiche d'un tout autre type, beaucoup plus redoutable, véritable machine de guerre à juger et à hiérarchiser. C'est son pouvoir que nous venons de voir à l'œuvre avec la disqualification de la thermodynamique. Et c'est la fabrication de ce faitiche très particulier qu'il va s'agir de suivre pas à pas. Car le principal défi, ici, est de ne pas précipiter la narration vers l'issue que l'histoire lui a réservée, vers l'interprétation qu'annonce le démon de Maxwell : la Reine des Cieux devenue capable de définir dans leur vérité tous les phénomènes naturels, devenue capable de transcender cette singularité des systèmes dynamiques que mettent en scène ses « incommunicables attributs ». D'où tient-elle ce pouvoir, c'est ce qu'il s'agit de comprendre.

Et il va s'agir de poser ce problème selon les obligations qui correspondent à une écologie des pratiques, c'est-à-dire sans en ratifier l'issue, mais aussi sans la dénoncer au nom de normes

consensuelles. Et il faudra éviter de le vider de son intérêt, par exemple en invoquant des « macro-causes » tout-terrain telles que l'irrésistible attrait d'une compréhension déterministe ou l'impérative séduction des explications qui vont « au-delà des phénomènes ». Car les possibles « écologiques » qu'il s'agit de faire exister n'ont de sens que s'ils sont vecteurs d'intérêts susceptibles d'agencer sur des modes différents les rapports entre les différents protagonistes contemporains du triomphe de la Reine des Cieux, qu'il s'agisse des physiciens qui lui adressent leur foi, des autres praticiens qui sont jugés par elle, ou du « grand public » à la fascination duquel elle est proposée. Mon choix, ici, sera de chercher à rendre intéressants, à travers la *question* de son triomphe, l'ensemble des possibles différents qu'a fait taire l'histoire de ce triomphe. Dans la mesure où, on le verra par la suite, ces possibles ne sont pas étrangers aux problèmes posés aujourd'hui par la physique, ils pourraient créer le terrain non certes, d'une conversion du physicien, mais d'une hésitation. C'est l'hésitation que j'entends chercher à faire surgir car la nouveauté, elle, ne m'appartient pas. Elle appartient à ceux qui la créeront.

## Anamnèse

Toute narration, si l'on n'y prend garde, suit la pente qui mène jusqu'à nous. Elle ignore l'hésitation parce qu'elle sait la réponse. En l'occurrence, dans le cas qui nous occupe, parce qu'elle tient pour acquise l'identité nouvelle que revêtira la physique du XX<sup>e</sup> siècle. Je dois au contraire « ralentir » le mouvement, rendre intéressant le moment où vont se jouer à la fois les différents ingrédients d'une écologie des pratiques : exigence, valeur et obligation. Et surtout « ralentir » le passage du problème des valeurs qui met en crise la physique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, à la solution apparemment « purement physique » qui lui sera apportée.

Rappelons-nous les questions grâce auxquelles Kant assignait ses limites au champ des connaissances positives. Resterait à tout jamais extérieure à ce champ les définitions de ce que l'homme peut savoir, de ce qu'il doit faire et de ce qu'il lui est permis d'espérer. Or, le problème de valeur posé au physicien à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pourrait

s'énoncer sur un mode similaire. Que doit faire le physicien alors qu'il constate que toutes ses représentations physico-mathématiques ne se valent pas ? Peut-il espérer annuler l'ignorance et la finitude dont témoigne la représentation thermodynamique ? Qui est-il selon qu'il invoque une pratique qui n'est pas la sienne, celle du démon manipulateur, ou qu'il accepte les obligations de sa finitude ignorante ? Les questions grâce auxquelles Kant entendait mettre un point d'arrêt aux envahissantes ambitions du savoir positif se trouvent donc reprises et répétées sur un mode décalé à l'intérieur de la physique – que peut savoir le physicien ? que doit-il faire ? que peut-il espérer ? Il faut ralentir l'histoire qui inspirerait l'idée outreucidante que, à l'intérieur de la physique, de telles questions ont pu recevoir leur solution.

Évitons d'abord de conférer à cette reprise décalée des questions kantienne une interprétation grandiose, qui confirmerait par exemple que la physique touche bel et bien les bornes du savoir puisqu'elle y découvre la nécessité de s'incliner devant l'incontournable interrogation philosophique. De fait, on peut tout aussi bien dire que cette reprise témoigne en elle-même de ce que l'interrogation en question n'a rien de proprement philosophique, en ce qu'elle peut se poser à toute pratique. En d'autres termes, les questions kantienne s'adresseraient non à l'« homme », nu et universel, mais aux pratiques qui le constituent en relation aux autres et aux choses. Somme toute, l'« homme nu et universel » ne se rencontre nulle part ailleurs que dans la pratique du philosophe

qui a activement purifié les humains de tous les attributs jugés secondaires, simples obstacles aux exigences d'universalité qui, paraît-il, identifient la philosophie, indignes donc de lui imposer des obligations. Des questions à vocation transhistorique telles que – que puis-je connaître ? que dois-je faire ? que m'est-il permis d'espérer ? bref, qui suis-je ? – sont solidaires de cette définition de la philosophie : elles sont tout ce qui reste lorsque l'on a tout purifié. J'oserai dire que leur caractère apparemment incontournable provient de ce qu'elles sont des versions tout-terrain de questions pratiques, c'est-à-dire de questions toujours relatives à des pratiques, à leur territoire et aux mouvements de déterritorialisation qui les affectent.

Revenir au moment d'hésitation où se joue l'identité pratique de la physique n'est pas, d'autre part, une entreprise archéologique au sens de Michel Foucault. Il ne s'agit pas de faire resurgir des strates oubliées ou de résister à la tentation de les juger sur le mode du « pas encore » qui est celui de l'histoire comme progrès. Ce n'est pas non plus un retour vers un passé de type freudien ou généalogique, qui permettrait de revivre le présent comme refus, refoulement ou recouvrement de ce qui ne cesserait en fait de se répéter partout de manière déguisée. La démarche est plutôt celle d'une anamnèse, définie comme évocation *volontaire* du passé. En effet, s'il y a eu oubli du passé, il n'y a pas eu déguisement, mais bien plutôt volonté – puis habitude – d'oubli. En témoigne le fait que les textes auxquels il s'agit de remonter restent parfaitement lisibles, et on devrait même

dire que leur lisibilité est inquiétante. Le principe de symétrie entre « vainqueurs » et « vaincus » que prêche l'histoire contemporaine des sciences ne nécessite ici aucune ascèse héroïque. Les questions posées dans ces textes n'ont pas été refoulées, de telle sorte qu'elles se répéteraient sur un mode involontaire, et elles n'ont pas non plus été annulées par un savoir vainqueur qui les viderait de leur sens. Tout se passe comme s'il y avait eu « décision » de leur tourner le dos, décision de se soustraire aux obligations qu'elles explicitaient.

L'anamnèse, en tant qu'évocation volontaire, traduit donc une démarche qui n'a rien de neutre. Il s'agit de remettre au présent des obligations dont le refus *délibéré* devient alors, selon cette lecture, constitutif de l'identité de la physique du xx<sup>e</sup> siècle. Cette démarche est empreinte d'une certaine violence. Elle s'interdit le partage respectueux des valeurs affirmées et des émotions éprouvées par ceux qu'elle décrit. La « foi » du physicien dans l'intelligibilité du monde proclamée par Planck, ou l'énigme, dont s'émerveillait Einstein, de cette intelligibilité, ne seront pourtant pas dénoncées comme viles dissimulations ou sordides manipulations. Le caractère délibéré du refus ne signifie pas que les physiciens aient eu conscience de la signification que, quant à moi, je prêterai à ce refus. Planck, Einstein et leurs successeurs ne cherchaient pas de manière délibérée à échapper au problème de leurs obligations. Selon ma lecture, ils refusaient une perspective qui leur semblait mettre en danger la physique à laquelle ils étaient attachés, la physique qui les

faisait penser et espérer. Leur refus n'est donc pas séparable d'une situation historique qui a mis la question de l'obligation sous le signe du conflit.

La démarche d'anamnèse n'est pas une dénonciation. Certes, elle implique de constater les effets redoutables du thème construit par Planck, puis Einstein, qui couple la foi du physicien et l'énigme du caractère fécond de cette foi. Car tant la foi que l'énigme situent les obligations du physicien comme se référant à un ailleurs, à un monde dont *il faut* faire exister l'intelligibilité au-delà des phénomènes, et auquel nul ne peut avoir accès s'il ne partage pas d'ores et déjà le mode d'engagement qui définit le physicien. Ernst Mach, contre qui l'arme ainsi forgée fut pour la première fois employée, avait fort bien perçu le caractère polémique de cette définition de la physique : « Après avoir exhorté son lecteur, avec une charité toute chrétienne, à respecter son opposant, Planck me stigmatise, selon les termes bibliques bien connus, comme un "faux prophète". Il semble que les physiciens sont en train de fonder une Église ; ils en sont déjà à utiliser les armes traditionnelles de l'Église. A ceci je réponds : "[...] je renonce avec gratitude à la communauté de la foi. Je préfère la liberté de pensée" <sup>1</sup>. » Mais la démarche d'anamnèse n'implique pas de suivre

---

1. E. MACH, « Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen », *Physikalische Zeitschrift*, vol. 11, 1910, p. 599-606, trad. américaine in *Physical Reality*, éd. S. Toulmin, Harper and Row, New York, 1970.

Mach dans le contraste qu'il campe, et où lui-même serait, face à Planck, le défenseur héroïque de la liberté de pensée. Il faut prendre acte de ce que l'affrontement entre physiciens a été jusqu'à inclure explicitement la question des rapports entre la raison et la foi. Mais il ne s'agit pas pour autant de profiter de cette extension de la polémique pour prendre parti, ou pour ramener la question sur le terrain plus familier des querelles dites idéologiques. L'extension même de la polémique appartient à l'événement dont il s'agit de construire le souvenir, et ne peut servir à l'expliquer ou à le réduire.

L'anamnèse n'est pas une dénonciation parce qu'elle n'appartient pas au registre de la solution ou de l'explication. Elle prolonge le problème imposé par l'événement dont tous ceux qui pensent que le « neutrino existe » (moi y compris) sont les héritiers. A quoi nous oblige cette existence ? Est-il possible de discuter, de négocier ce qui se présente en bloc, le neutrino expérimental et celui qui a lié ses prétentions à celles des grandes lois de la physique ? La démarche d'anamnèse doit recréer le problème à travers les méandres de l'histoire qui a produit sa solution, l'histoire des vainqueurs comme celle des vaincus. Mais d'où provient sa capacité à le faire ?

Dans les disciplines thérapeutiques, l'anamnèse traduit une certaine confiance du thérapeute en son propre savoir : il devrait être capable de lire, dans des manifestations diverses et apparemment disparates, l'unité d'un trouble dont le diagnostic guidera la suite des opérations thérapeutiques.



Relevons immédiatement le caractère ambigu de cette proposition. Sur quoi se fonde cette confiance ? Sur le pouvoir intrinsèque que donne au thérapeute le savoir dont il se prévaut et qui le rend capable de discerner la « vérité une » dissimulée par les apparences multiples ? Ou bien sur son savoir en tant que capable de produire, au sens performatif, une unité susceptible de le guider ? Usuellement, la seconde de ces interprétations appartient au commentaire critique, ou relativiste, mettant en question les preuves invoquées par la première, et mettant en lumière la circularité entre la conviction qui guide l'action et l'action qui confirme la conviction. Mais le caractère polémique de cette interprétation n'a rien de nécessaire, et le praticien qui revendiquerait pour lui-même cette seconde interprétation ne deviendrait pas de ce fait un « postmoderne » désenchanté, ramenant toute prétention de vérité à un « ça marche » désabusé. Ou plutôt, ce serait le cas si et seulement si il y avait accord sur un autre point qui est, jusqu'ici, resté implicite. Car la production performative d'une unité n'est pas, bien évidemment, l'affaire du seul praticien : celui ou celle avec qui l'opération d'anamnèse est menée ne peut y rester indifférent. La question est alors de savoir si l'on peut identifier la manière dont l'action confirme ses propres présupposés à la fermeture d'un cercle, ce qui implique que celui ou celle avec qui travaille le praticien est indéfiniment disponible pour toute opération de ce genre, comme est disponible pour toute empreinte la plage de sable où nous retrouverions les traces

de nos propres pas. Ou bien si ce à quoi s'adresse l'opération est capable de faire une différence, d'imposer que tout ne se vaut pas pour lui. Ce qui ouvre alors à de nouvelles questions, et notamment la question de ce à quoi sa pratique oblige le thérapeute.

Nous retrouverons ces questions par la suite. Le problème posé ici était celui de la démarche que je vais tenter dans le champ de l'histoire de la physique. Dans la mesure où les différentes positions aujourd'hui affrontées ne sont pas du tout en demande de thérapie, et où, même si c'était le cas, ceux qui les tiennent ne me reconnaîtraient certainement pas comme susceptible de remplir le rôle de thérapeute, le risque impliqué par la métaphore de la plage de sable n'est pas très pertinent. Les physiciens sont tout sauf prêts à confirmer n'importe quelle interprétation de leur science. L'analogie s'imposerait plutôt avec un parcours du combattant dans un champ de mines, dont certaines ont d'ailleurs probablement déjà explosé : que le lecteur qui m'aurait suivie jusqu'ici le sache, d'autres ont certainement déjà refermé ce livre avec un haussement d'épaules dégoûté, l'une ou l'autre proposition leur ayant été aussi inacceptables que le furent celles d'Ernst Mach pour Max Planck et Albert Einstein. Et pourtant, ici aussi, l'anamnèse présuppose une certaine confiance, confiance dans ma capacité à entendre les prises de position qui se sont succédé autrement que contradictoires les unes avec les autres, à les entendre comme facettes contrastées d'un problème. Cette confiance est, bien évidemment,

solidaire d'un savoir, et ce savoir s'inscrit en l'occurrence dans l'histoire de la physique comme une nouvelle position du problème posé par les « incommunicables attributs de la Reine des Cieux ». A suivre Ilya Prigogine, ce ne sont plus seulement les phénomènes définis en termes thermodynamiques, mais la très grande majorité des phénomènes définis en termes dynamiques qui ne peuvent satisfaire aux exigences correspondant à ces attributs. Qui est-elle alors, cette Reine, comment redéfinir ses exigences, comment celles-ci composent-elles désormais avec l'ignorance et la finitude humaines ? A ces questions de nouvelles réponses se formulent, dont j'esquisserai ailleurs<sup>2</sup> la description mais qui sont incontestablement d'ores et déjà ingrédients de ma démarche.

Apparemment, je prête donc à la position du problème créée par Prigogine le pouvoir de discerner la « vérité une » dissimulée par les apparences multiples. Et dans ce cas, il semble aussi que, pour moi, l'ensemble des problèmes qui ont mis la physique en crise dans les dernières décennies du XIX<sup>e</sup> siècle se ramènent à un seul, que résoudrait comme par miracle Prigogine. A problème « résolu » crise annulée, close, et, comme telle, lisible. Or, tel n'est pas du tout mon propos. Je soutiens au contraire que, même si la solution proposée par Prigogine venait à être généralement admise, elle ne constituerait pas une solution à la

---

2. Voir *Cosmopolitiques V*.

« crise » comme telle mais un *rebondissement*, la création d'une proposition qui tout à la fois accepte l'issue historique qu'a reçue cette crise et en relance la portée et les conséquences. De plus, la signification *écologique* d'un tel rebondissement éventuel reste pour moi un enjeu ouvert. En d'autres termes, ma lecture est certes solidaire d'une proposition qui s'inscrit dans l'histoire de la crise de la physique parce que c'est mon intérêt pour cette proposition qui a suscité mon intérêt pour cette crise. Mais cette lecture n'implique en rien la validation de cette proposition. C'est le fait qu'elle ait pu être formulée qui m'importe. Et, en tout état de cause, même son éventuelle validation ne résoudrait pas le problème que je poursuis. Car mon but n'est pas de chercher les conditions d'une cohérence entre dynamique et thermodynamique, entre physique des lois et physique des phénomènes, mais d'explorer ce qu'exigerait et ce à quoi obligerait l'éventuelle cohérence à construire au sein de pratiques parmi lesquelles la physique occupe une place singulière, certes, mais *qu'il s'agit de ne pas dire* privilégiée.

La situation est en fait encore plus complexe. En effet les questions « critiques », pour reprendre ma paraphrase de Kant – que peut savoir le physicien, que doit-il faire, que lui est-il permis d'espérer –, ont bel et bien été à l'œuvre dans le travail de Prigogine et de ses collaborateurs. C'est même en suivant le chemin parfois labyrinthique de ce travail que j'ai appris à en comprendre le sens et la portée pratiques, créateurs de valeurs et d'obligations pour le physicien. Mais lorsqu'un

problème scientifique aboutit à une solution jugée satisfaisante, lorsqu'il a finalement défini et identifié le terrain où ses exigences peuvent être satisfaites, il crée également, en fonction de ce terrain, la manière la plus simple, la plus univoque, la plus adéquate de se formuler lui-même. Au labyrinthe succède la ligne droite, aux questions succède la possibilité d'énoncer ce que Maxwell et ses contemporains « ne savaient pas encore », et qui explique la difficulté qu'ils ont dû affronter. Ainsi se construit le temps « proprement sériel, ramifié » de la science, « où l'avant (le précédent) désigne toujours des bifurcations à venir et l'après, des réenchaînements rétroactifs<sup>3</sup> ».

Le moment où s'entre-actualisent la fonction et l'état de choses à laquelle elle se réfère est un moment d'intensité et de risque, un moment où la vie du scientifique est en suspens, où la nuit, toujours trop longue, est entrecoupée de doutes et de tourments. La référence tiendra-t-elle, résistera-t-elle aux épreuves qui correspondent à ses prétentions ? L'état de choses répond-il bien à toutes les exigences de la fonction ? Celles-ci n'entraînent-elles aucune conséquence absurde ? Mais ce moment est également celui où il va peut-être devenir inutile de garder le souvenir des composantes multiples du problème enfin résolu : « Le nom propre du savant a pour fonction de nous éviter de le faire, et de nous persuader qu'il n'y a

---

3. G. DELEUZE et F. GUATTARI, *Qu'est-ce que la philosophie ?*, Minuit, Paris, 1991, p. 118.

pas lieu de réarpenter un trajet déjà parcouru : on ne passe pas par une équation nominée, on s'en sert<sup>4</sup>. » En d'autres termes, c'est le moment où va pouvoir se dénouer le mixte. Un nouvel état de choses immaculé se dégage de son histoire, devenant, comme tout faitiche, capable d'expliquer l'errance d'un passé dépassé où on ne l'avait « pas encore » pris en compte. Ou du moins capable de nous persuader qu'il en est capable. Il n'y a pas lieu de critiquer la création de cette capacité à nous persuader, qui célèbre la venue à l'existence d'un être nouveau. Mais cela ne signifie pas qu'il soit nécessaire de se laisser persuader. Il n'est pas impossible de célébrer et de garder la mémoire. Tel est aussi le sens de l'anamnèse, évocation volontaire, que je veux tenter.

---

4. *Ibid.*

## L'énergie se conserve !

Il n'y a pas de récit neutre. Une mise en scène narrative commence bien avant d'avoir, si tant est qu'elle en ait le projet, les moyens de s'expliciter. Je viens d'expliciter ce qui m'engage, mais bien sûr la manière dont j'ai construit *L'Invention de la mécanique : pouvoir et raison* engageait déjà le lecteur dans la perspective qui est la mienne. J'y ai mis en contraste deux héritiers de Lagrange : Hamilton, d'une part, pour qui l'énergie mécanique ne se conserve pas seulement lors de l'évolution d'un système mécanique, ou dynamique, mais devient, sous le nom d'hamiltonien, le pivot de tous les changements de représentation possibles de ce système, y compris ce changement particulier qu'on appelle mouvement ; Carnot, de l'autre, inventeur d'un usage tout différent de la notion de conservation, qui ne qualifie plus une évolution autonome mais correspond à l'idéal d'une mise sous contrôle intégrale de la production

thermique de travail mécanique. Je n'ai pas eu, en ce qui concerne les suites de l'événement lagrangien, à ralentir le mouvement de l'histoire. La singularité de la dynamique que j'ai mise en scène, tous ceux qui l'utilisent la connaissent. La seule différence tient peut-être à l'insistance avec laquelle je l'ai soulignée. Tout physicien « sait » que la dynamique hamiltonienne ne met en scène que des forces « conservatives », qui conservent l'énergie mécanique. Mais certains ne perçoivent pas cette restriction comme remarquable. Tout descendant de Carnot « sait » que le déplacement d'état en état qui constitue le cycle idéal inventé par Carnot, cycle où l'équivalence entre « cause » et « effet » est assurée *contre* la tendance « naturelle » de la chaleur à passer spontanément et sans effet mécanique d'un corps chaud vers un corps froid, n'est qu'un « mime » laborieux de l'évolution dynamique conservative. Mais la plupart acceptent que ce mime signe sa subordination au modèle original. Il faut ralentir au moment où l'on a affaire non plus au rappel de ce qui usuellement « va sans dire », mais à la question posée aujourd'hui par la hiérarchie de la physique. Pourquoi les exigences de la dynamique, telles que je les ai mises en scène, ne semblent-elles plus imposer aucune limite à sa pertinence ? Pourquoi le fait qu'une « force » ou qu'un phénomène soient « dissipatifs » signale-t-il aujourd'hui tout simplement que leur définition est « approximative », marquée par la finitude et l'ignorance humaines, relevant, en d'autres termes, de la « physique phénoménologique » ? Que s'est-il passé ?



Le lecteur sait que le pas suivant va être la mise en contact de ces deux héritages. Il attend déjà le coup de théâtre qui a transformé les perspectives de la physique au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle : de la respiration humaine à la machine à vapeur, de la bougie qui brûle à la pile électrochimique, tous les phénomènes, qu'ils appartiennent à la nature ou à la technique, *conservent l'énergie*. J'ai donc mené le lecteur à « attendre » la conservation de l'énergie à propos d'un problème très particulier, c'est-à-dire aussi à établir un lien spécifique entre la question de l'héritage de Lagrange et un événement qui a affecté l'identité même de la physique, qui a transformé l'évaluation de ce que la pratique du physicien permet à celui-ci d'espérer : *la découverte de la conservation de l'énergie*.

La conservation de l'énergie constitue l'exemple par excellence de ce type de savoir qui, pour Max Planck, fondait la vocation du physicien : sa pré-tention et sa foi en sa capacité à atteindre un monde intelligible, indépendant de nos intérêts et de nos pratiques. *Atteindre un monde et non pas construire une définition objective*, c'est là toute la différence entre la vision du monde de Planck et l'objet de la mécanique tel qu'il est issu du laboratoire de Galilée et qu'il a été consacré par les équations de Lagrange. L'objet mécanique avait le pouvoir de dicter la manière dont il devait être défini, et c'est en cela d'abord qu'il était intéressant. Il permettait de rassembler autour de lui ceux qui inventeront la mise en représentation mathématique qu'il autorise, mais il ne permettait

pas de rassembler des phénomènes disparates, de mettre le monde en représentation. Il doit au contraire être sélectionné au sein de ce monde, puis isolé et purifié. En d'autres termes, il est, en ce qui concerne son existence même d'objet expérimental, radicalement dépendant de nos intérêts et de nos pratiques : la bille doit être ronde, le plan incliné lisse, et il vaudrait mieux que l'air s'absente pour que soient satisfaites les exigences dont dépend le pouvoir de la représentation mécanique. Il en va tout autrement de l'énergie que conserve, à partir de 1850, *n'importe lequel* des processus naturels, qu'il soit mis en scène par l'homme ou repéré dans la nature (y inclus bientôt les étoiles).

La découverte de la conservation de l'énergie fait, on le sait, partie de ces cas de « découverte simultanée » qui attirent l'attention des historiens des sciences. Comme si la chose était « dans l'air ». Cependant, Thomas Kuhn a également montré que les énoncés produits à partir de 1840 ne peuvent être assimilés que de manière rétrospective<sup>1</sup>, chaque auteur conférant une signification distincte à ce qui deviendra l'« énergie » (et que, à l'époque, on appelle usuellement « force<sup>2</sup> »). Contrairement à l'accélération galiléenne, par exemple, dont le plan incliné galiléen a produit à

---

1. T. KUHN, « Un exemple de découverte simultanée : la conservation de l'énergie », in *La Tension essentielle*, Gallimard, Paris, 1990.

2. Voir Y. ELKANA, *The Discovery of the Conservation of Energy*, Hutchinson, Londres, 1974.

la fois la mesure et l'interprétation, les dispositifs exhibant la conservation de l'énergie étaient donc susceptibles de laisser indéterminée la question de son interprétation. Celui qui avait affaire à l'un d'entre eux n'était pas forcé de voir ce que l'auteur du dispositif voulait lui faire voir. Il pouvait discuter. Et nombreuses en effet furent les discussions.

Pour comprendre le terrain de ces discussions, il faut d'abord distinguer conversion et conservation. L'idée de conversion généralisée entre « forces » fut d'abord une idée esthétique, qui communiquait avec la mise en scène d'une « force indestructible » donnant son unité permanente à la nature. En tant que telle, cette idée n'a pas, à proprement parler, d'auteur : on peut la faire remonter aussi bien à la « force vive » leibnizienne qu'à la philosophie de la nature post-kantienne. La nouveauté qui marque les premières décennies du XIX<sup>e</sup> siècle est la possibilité de voir l'ensemble des faits anciens, telles la combustion de la bougie ou la réaction chimique dégageant de la chaleur, nouveaux, telles l'électrolyse, la pile électrique, la machine à vapeur, comme affirmant de manière unanime la convertibilité universelle. Un ensemble de « faits » dispersés dans des pratiques distinctes, ayant reçu des interprétations distinctes, peut se trouver unifié s'il est vu comme un « réseau » assurant la conversion de toute forme de force (ou d'énergie) en toute autre. Il ne s'agit pas là d'une « thèse » qui aurait été négociée parmi les différents protagonistes, mais d'une « manière de voir », d'une esthétique, qui *rassemble* précurseurs ou auteurs d'énoncés que nous jugeons

« enfin scientifiques », et qui situe sur le même plan médecins, ingénieurs, météorologues, physiciens spécialistes du mouvement, de la chaleur, de l'électricité, du magnétisme : n'ont-ils pas tous affaire à des processus de conversion ?

La notion de conservation implique, quant à elle, celle de mesure. Il ne s'agit pas seulement d'indestructibilité car ce qui est en jeu est la création d'un dispositif qui permette de *quantifier* la conversion. En 1843, Joule établit une mesure de l'équivalence quantitative entre chaleur et travail en rapportant l'élévation de température de l'eau dans laquelle tourne un système de pales au travail correspondant au mouvement des pales. La conversion du travail mécanique en chaleur autorise ainsi la définition d'un équivalent « mécanique » de la chaleur : ce sera la quantité de travail nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau.

Le dispositif permettant de déterminer la quantité de ce qui disparaît et la quantité de ce qui apparaît ne nie certes pas, mais distord le réseau égalitaire des processus de conversion. En effet, la mesure privilégie le travail mécanique, qui va constituer l'étalon commun de référence. Corrélativement, elle privilégie les praticiens de laboratoire car les médecins ou les naturalistes sont bien incapables de soumettre « leurs » énergies à ce type de mesure. Mais c'est ici qu'il faut prendre garde : la mesure de Joule a beau être une mesure de laboratoire, elle n'est pas, comme celle du corps galiléen, objective au sens fort, créant en même temps les conditions d'intelligibilité du phénomène. C'est une mesure d'ingénieur, fon-

dée sur cette notion de travail dont, on l'a vu dans *L'Invention de la mécanique*, la généralité se paie par la mutité quant à ce qui est mesuré. La mesure suppose une mise en équivalence entre deux phénomènes, certes, mais cette mise en équivalence est contingente, relative au dispositif, contrairement à celle qu'illustre le pendule où le mouvement se convertit « spontanément » en énergie potentielle et *vice versa*.

La mesure dit l'équivalence, mais la mise en équivalence ouvre-t-elle un accès pertinent vers l'intelligibilité des processus naturels ? Pour la première fois peut-être depuis que, au XVIII<sup>e</sup> siècle, les adversaires de Newton mirent en question la décomposition de la lumière par le prisme<sup>3</sup>, la question de ce que fait le laboratoire, de la pertinence des opérations qu'il rend possibles, devient critique. Comme le soulignera Friedrich Engels, grand connaisseur en matière de conservation de l'énergie, « lorsque nous transformons de la chaleur en mouvement mécanique ou inversement, la qualité est pourtant modifiée et la quantité reste la même ? Tout à fait exact. Mais il en est du changement de forme du mouvement comme du vice de Heine : chacun pour soi peut être vertueux, mais pour le vice, il faut être deux. Le changement de forme du mouvement est toujours un processus qui s'effectue entre deux corps au moins, dont l'un perd une quantité déterminée de mouvement de la première qualité (par exemple de la

---

3. Voir à ce sujet L. VERLET, *La Malle de Newton*, Gallimard, Paris, 1993.

chaleur) tandis que l'autre reçoit une quantité correspondante de mouvement de l'autre qualité (mouvement mécanique, électricité, décomposition chimique)<sup>4</sup>». En d'autres termes, la conservation quantitative ne permet pas de nier la transformation qualitative, de la ramener à une identité sous-jacente, puisqu'elle a une condition – *il faut être deux*, il faut une interaction – sur laquelle elle reste muette. Le dispositif qui permet de montrer que ce que l'un gagne, l'autre le perd soumet une transformation à l'impératif de mesure, mais cette mesure est incapable en elle-même d'identifier ce qu'elle égalise. Qu'est-ce que la chaleur ? En quoi est-elle différente du travail mécanique ? En quoi sont différentes de ce travail l'énergie chimique ou l'énergie électrique ? L'égalité ne le dit pas. Le conflit des interprétations est ouvert.

L'axe du conflit est, bien évidemment, le rapport entre la conservation « mécanique » et la nouvelle conservation « énergétique ». Il passe par la notion de travail, lieu commun des deux types de pratique de mise en équivalence. Le travail est la « monnaie mécanique », et comme tel il a été pris comme unité commune de mesure, mais, toujours comme tel, il est bien incapable de donner la « raison » de la transformation énergétique, il en est seulement l'étalon. La conservation de l'énergie

---

4. F. ENGELS, *Dialectique de la nature*, Éditions Sociales, Paris, 1975, p. 70.

traduit-elle néanmoins la toute-puissance secrète des « raisons mécaniques », la réductibilité générale des formes qualitativement différenciées d'énergie à la seule énergie mécanique ? C'est la thèse de von Helmholtz. Ou bien, allant à l'extrême opposé, permet-elle de mettre en question cette raison mécanique elle-même au nom d'une logique de la multiplicité qualitative ? C'est la thèse de Engels pour qui, *même en mécanique*, il faut, à bien y regarder, « être deux » : il faut une interaction pour que l'énergie liée au mouvement se convertisse en énergie potentielle, et *vice versa*. Pour von Helmholtz, force et travail caractérisent intégralement un monde caché à l'observation directe. Le pendule idéal triomphe sur le pendule imparfait, dont le mouvement s'amortit progressivement, car cet amortissement spontané du mouvement mécanique a pour équivalent un dégagement de chaleur et celle-ci n'est, elle-même, qu'une forme de mouvement mécanique caché, analogue peut-être à une vibration des atomes constituant la matière. Pour Engels, le travail est, *dans tous les cas*, une mesure pratique dépendant de la création de dispositifs artificiels. Le pendule idéal devient alors un faux témoin, en ce qu'il semble autoriser à faire de l'équivalence mesurée par le travail la raison de son mouvement, et donc à conférer une identité purement mécanique à la cause et à l'effet. En revanche, le dispositif de Joule devient un témoin respectable. Il illustre bien le caractère instrumental de la mesure et permet d'interpréter le travail, c'est-à-dire aussi la force mécanique qui lui correspond

et semble l'expliquer, comme des grandeurs purement opératoires, neutres quant à l'identité de ce dont elles permettent seulement de quantifier l'entre-mesure.

Déjà, la pratique du physicien est donc en jeu à travers la question de ce à quoi ses énoncés l'autorisent ou l'obligent. Ils l'obligent, pour Engels, à une lucidité qui met en question le sens même de la mécanique : l'objet galiléen semblait conférer un caractère objectif, dicté par l'objet, aux catégories de la mesure, mais ce pouvoir apparaît rétroactivement comme contingent, cas particulier non représentatif de ce que nous pouvons exiger de la nature<sup>5</sup>. En revanche, pour von Helmholtz, la conservation de l'énergie autorise une universalisation des exigences de la méca-

---

5. Engels reprend ainsi, avec d'autres moyens, le combat de Hegel contre la mécanique. Celle-ci, parce qu'elle est science d'un objet dictant ses propres catégories, définissant dans ses propres termes ce qui est cause et ce qui est effet, était pour Hegel une menace contre la philosophie. Elle semblait en effet capable de penser pour elle-même et par elle-même la vérité du mouvement. Dans *La Théorie de la mesure*, Hegel a joué la différence entre mesure mécanique, seulement spécifiante, et mesure chimique par les affinités, qui relève de la mesure « réelle ». Avec la conservation de l'énergie, Engels a trouvé la possibilité d'une autre stratégie : le triomphe même de la mesure mécanique, de la mesure par le travail, justement parce qu'elle met en équivalence des formes qualitativement différentes de « mouvement », signe son impuissance à donner la théorie de ce qu'elle mesure. C'est cette théorie qui devait être présentée dans la seconde partie, jamais rédigée, de la *Dialectique de la nature*. Voir à ce sujet Éric ALLIEZ et Isabelle STENGERS, « Énergie et valeur : le pro-



nique, qui ne définissent plus seulement l'objet idéal de la mécanique mais les conditions d'intelligibilité de tout phénomène naturel. Tous les autres savoirs ont donc pour obligation de mettre en scène l'égalité quantitative de la cause et de l'effet<sup>6</sup>.

Faire de von Helmholtz et d'Engels les tenants symétriques des deux interprétations les plus

blème de la conservation chez Engels et Marx», *in Contre-temps. Les pouvoirs de l'argent*, Éditions Michel de Maule, Paris, 1988.

6. Ce faisant, von Helmholtz reprend, dans ce nouveau contexte où la chaleur est devenue une quantité, l'interprétation que donne Leibniz, dans sa cinquième lettre à Clarke, à la perte du mouvement lors du choc entre deux corps «mous» ou non élastiques. Des forces actives se sont-elles perdues? «Je réponds que non. Il est vrai que les touts la perdent par rapport à leur mouvement total; mais les parties la reçoivent étant agitées intérieurement par la force du concours ou du choc. Ainsi ce déchet n'arrive qu'en apparence: les forces ne sont pas détruites mais dissipées parmi les parties menues. Ce n'est pas les perdre, mais c'est faire comme font ceux qui changent la grosse monnaie en petite» (*Correspondance Leibniz-Clarke*, éd. A. Robinet, PUF, Paris, 1957, p. 168). On n'oubliera pas, cependant, que, pour Leibniz, la vérité philosophique de la «force active» ou «vive» n'est pas mécanique. De fait, en ce qui concerne von Helmholtz, la question est également complexe car l'influence de Kant est très présente: c'est à une obligation «kantienne», universalisant à tous les phénomènes les catégories explicitées par la mécanique, qu'il souscrit. Seuls les Anglais, comme Joule et Thomson, peuvent être dits «vraiment» réalistes: lorsqu'ils parlent de force ou d'énergie, c'est du monde tel qu'il a été créé par Dieu, et non des phénomènes tels que nous les connaissons rationnellement, qu'il s'agit.

antagonistes de la conservation de l'énergie, c'est signaler que nous sommes ici en dehors de l'histoire de la physique proprement dite, qui ne connaît pas cette symétrie. Dans le contexte de cette histoire, l'un est un protagoniste respectable alors que l'autre est le plus souvent défini comme un intrus idéologue. Mais ce jugement est rapide au sens où il doit être ralenti pour devenir intéressant. Il se met alors à poser problème : il indique que l'invention des enjeux « proprement physiques » de la conservation ne se sont pas définis dans l'arène que circonscrit la mise en tension du pendule de Galilée et du système de pales de Joule. De fait, un autre protagoniste est intervenu, et ce protagoniste descend en ligne directe non de la physique des forces mais de la mécanique rationnelle des changements d'état. Il s'agit, on s'en était douté, du cycle de transformations idéalement réversibles qu'a mis en scène Sadi Carnot.

Le cycle de Carnot va en effet devenir, après une histoire complexe, l'« arène » où se décidera le rapport entre l'énergie mécanique et ce qu'on appellera dès lors l'énergie « thermodynamique », régie par deux principes. Cette histoire et ces deux principes vont m'occuper tout au long des prochaines pages, mais je veux d'abord marquer le contraste entre les problèmes qu'ils vont créer et ceux qu'avait suscités (et que continuera à susciter « dans la culture ») la conservation de l'énergie.

La conservation de l'énergie mettait en jeu de « grands problèmes », elle était susceptible d'intéresser tout le monde, du philosophe au physicien en passant par le biologiste, le médecin, voire

aussi le sociologue, l'économiste ou le psychologue. On peut penser à Freud, mais aussi au physicien Wilhelm Ostwald, qui retrace l'histoire de l'humanité en termes des ressources énergétiques rendues disponibles par la technique humaine et tente une lecture énergétiste des épisodes psychopathologiques qui marque la vie des « grands hommes ». Il s'agit donc d'un « événement culturel » aux limites indéterminées, et il est vraisemblable que l'« événement scientifique » qui va avoir le cycle de Carnot pour arène n'est pas plus dissociable historiquement de cet événement culturel que les lois de Galilée ne le sont de l'affrontement de Galilée avec l'Église. Mais, comme le laboratoire de Galilée, l'arène que constituera le cycle de Carnot a pour singularité le fait que les enjeux qui s'y formulent ne peuvent être compris et traités que par des spécialistes. Il ne s'agit pas tant d'une question de compétence, même si la formulation des enjeux rend, par exemple, nécessaire de saisir la différence entre celles des transformations énergétiques qui peuvent être ramenées à une succession de changements d'état et les transformations énergétiques usuelles, celle par exemple qu'opère le système de pales de Joule<sup>7</sup>. Au-delà de la compétence, la véritable sélection opère en fait sur l'intérêt. Ni le biologiste ni le médecin, ni d'ailleurs le philosophe dialecticien, n'ont de raison de s'intéresser

---

7. Cette différence est un des thèmes centraux de *L'Invention de la mécanique : pouvoir et raison*.

à l'enjeu désormais crucial que constitue la notion de changement d'état. Rien de ce à quoi ils ont affaire ne donne une quelconque pertinence à cette notion.

Par ailleurs, il ne s'agit pas seulement de comprendre comment le cycle de Carnot a pu devenir l'arène par rapport à laquelle vont se différencier les enjeux que nous appelons respectivement « culturels » et « proprement scientifiques » de la conservation de l'énergie. Il faut également comprendre son statut quelque peu étrange dans la physique du XX<sup>e</sup> siècle. L'étudiant en première année de physique ou de chimie apprend encore le cycle de Carnot tel que l'a relu Clausius, mais ce « chapitre obligé » de ses cours lui inspire le plus souvent ennui et perplexité. Il ne saisit pas vraiment pourquoi il lui faut passer par là. L'arène n'a donc pas eu le pouvoir de définir ses enjeux, mais seulement celui d'être le lieu de formulation de questions qui ont trouvé ailleurs les moyens de leur réponse.

En tout état de cause, on peut comprendre l'étudiant : le cycle de Carnot réinterprété par Clausius est devenu une bien étrange créature. Son invention par Carnot était solidaire, rappelons-le<sup>8</sup>, d'une science dont la conservation de

---

8. Voir *L'Invention de la mécanique* : je ne reprendrai pas ici la description du cycle lui-même, et me borne à rappeler qu'il a pour fonction d'utiliser la chaleur, prélevée à une source chaude et restituée à une source froide pour produire un travail mécanique. Le principe de son fonctionnement répond à un impératif et à un seul : pour

l'énergie a sonné le glas : la science de la chaleur identifiée à un fluide qui se conserve et dont le comportement permettait en particulier d'expliquer les relations expérimentales entre pression, volume et température qui caractérisent les gaz. La science du calorique fut une science de pointe dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, et c'est elle que Carnot a non seulement pleinement mise en œuvre mais connectée avec la grande tradition mécanique de la conservation de la cause dans les effets. Cette connexion inventée par Carnot et réalisée par son cycle a perdu sa raison d'être avec la destruction de la chaleur calorique. Or, la grande ironie du cycle de Carnot, celle qui provoque souvent le dégoût des étudiants mais aussi celle qui en fait l'arène où se sont mesurés l'« avant » et l'« après » de la conservation de l'énergie, est que le cycle lui-même et le rendement optimal qu'il définit ont survécu, connexion qui ne connecte plus, pont qui relie deux rives dont les réseaux routiers ont été modifiés de fond en comble de telle sorte que l'on peut se demander qui a bien pu avoir l'idée de le construire là. Comme si le cycle de Carnot venait s'abattre sur les transformations énergétiques, abstraction venue de nulle part et vers laquelle ne mène aucune intuition.

Et c'est bien en effet la théorie du calorique, c'est-à-dire de la conservation d'une « chaleur-

---

que le rendement du cycle soit optimal, il faut assurer le caractère réversible de toutes les transformations, c'est-à-dire éviter, par un contrôle parfait, tout flux direct de chaleur entre deux corps de températures différentes.

substance», qui menait vers le cycle et rendait son invention intuitivement intelligible. La quantité de calorique contenue dans un corps n'est certes pas directement mesurable dans les termes de cette théorie. Mais une chose est assurée : si une quantité donnée de gaz, qui a changé de volume et de pression, reçu ou donné de la chaleur, retrouve les valeurs initiales de ses variables de pression, volume et température, c'est que le gaz doit avoir rendu autant de chaleur qu'il en a reçue au cours du cycle de ses transformations. C'est pourquoi Carnot pouvait définir les états parcourus par son cycle en termes de pression, volume et température, sans se donner les moyens de déterminer combien de chaleur est absorbée à la source chaude et combien est restituée à la source froide. Quel que soit le chemin suivi pour passer d'un état à un autre, qu'on le comprime à température constante pour ensuite le refroidir, ou que, au contraire, on le refroidisse à volume constant pour ensuite le comprimer, par exemple, la conservation du calorique garantissait que, du moment que le cycle se boucle, toute la chaleur absorbée a été restituée. Qui plus est, tout passage d'un état à un autre, tous deux caractérisés en termes de pression, température et volume, devait impliquer que, quel qu'en soit le chemin entre ces deux états, la même quantité de calorique ait été absorbée ou donnée, la seule différence entre les chemins étant le travail mécanique éventuellement produit ou consommé à cette occasion. En d'autres termes, la conservation de la chaleur-calorique constituait un point fixe et un garant. Lorsque la

théorie du calorique cédera devant celle de la conservation de l'énergie, lorsque le dispositif de Carnot cessera de transmettre de la chaleur d'une source chaude vers une source froide mais convertira de la chaleur en travail, le cycle n'offrira plus la moindre garantie évidente à propos de quoi que ce soit. Bien au contraire, il pose problème : pourquoi toute la chaleur reçue de la source chaude ne peut-elle se convertir en travail ?

Il en est de même sur l'autre « rive », celle où règne la conservation de la cause dans l'effet. Carnot avait montré que son cycle idéal devait, parce qu'il est réversible, correspondre à un rendement idéal : pour une quantité donnée de calorique passant d'une source chaude vers une source froide, il produit la quantité maximale de travail mécanique possible. Or, la démonstration de Carnot était fondée sur un argument par l'absurde traditionnel en mécanique. Si un cycle hypothétique devait avoir un rendement supérieur, son couplage avec un cycle idéal de Carnot fonctionnant à l'envers, comme pompe à chaleur, produirait *gratuitement* du travail mécanique. Mais si la chaleur se convertit en travail, il n'y a plus d'absurdité puisque, en tout état de cause, le travail n'est pas produit gratuitement. Pourquoi, encore une fois, la chaleur ne pourrait-elle pas alors se convertir intégralement en travail ? Le rendement optimal défini par le cycle idéal de Carnot est devenu énigmatique.

Si le cycle de Carnot, solidaire d'une physique qui meurt lorsque s'impose la conservation de l'énergie, a survécu, c'est parce qu'il avait identifié

et mis en œuvre un *fonctionnement idéal*, dont la réversibilité garantissait en elle-même que toute perte avait été éliminée. Mais perte de quoi ? C'est la question désormais posée. Pas d'énergie, c'est à la fois une certitude et la difficulté principale. Que la chaleur flue directement entre deux corps de températures différentes, ou qu'elle se « convertisse » en travail, que mesure le changement de volume, *de toute façon l'énergie se conserve*. Le cycle est réversible, il met donc en scène une cause qui se conserve dans l'effet qu'elle produit, mais cette « cause » doit être tout à fait distincte de l'énergie, car le bilan énergétique est parfaitement indifférent au caractère idéal, conservatif, du cycle. Le cycle parle d'une impossibilité de convertir, pour la même différence de température, plus de chaleur que celle définie par le rendement optimal de Carnot, mais l'énergie qui se conserve est muette quant à la question des conversions possibles et impossibles entre formes distinctes d'énergie. En d'autres termes, la conservation de l'énergie n'a pas le pouvoir de caractériser l'idéal inventé par Carnot puisqu'elle est indifférente à la réversibilité du cycle comme elle est indifférente à la distinction entre le pendule idéal et celui dont le mouvement s'amortit par friction. Par rapport à quelle conservation se définit donc la perte éliminée par le cycle ?

Il s'agit donc de comprendre le cas privilégié des transformations réversibles. Et nous savons ce qu'a signifié, dans l'histoire de la mécanique, ce même privilège de réversibilité. Les mouvements mécaniques qui conservent l'énergie, qui ne



s'amortissent pas progressivement en raison des frottements, peuvent être décrits par une fonction d'état, c'est-à-dire être ramenés à des changements d'état, et c'est cette possibilité qui a, tout à la fois, donné à la mécanique son pouvoir inventif formidable et limité ce pouvoir à la seule classe des mouvements idéaux, dépourvus de frottement. La conservation générale de l'énergie semblait avoir aplani cette différence, puisqu'un mouvement qui s'amortit par frottement « conserve » l'énergie, une partie de l'énergie mécanique étant « simplement » convertie en chaleur. Mais l'énergie qui se conserve, justement parce qu'elle se conserve toujours, a perdu son statut de fonction d'état. Elle ne peut faire la différence entre l'idéal, où la « cause » se conserve dans son « effet », et le dissipatif, où la cause s'épuise en produisant un effet inférieur, voire nul (comme c'est le cas lorsque de la chaleur passe spontanément d'un corps chaud vers un corps froid). Tel est donc le nouveau message du cycle de Carnot : même si elles conservent toutes l'énergie, toutes les transformations énergétiques ne se valent pas, et c'est la définition de cette non-équivalence qu'il va s'agir d'expliciter. En d'autres termes, le rendement idéal défini par Carnot, le caractère déterminé des rapports entre énergie thermique consommée et énergie mécanique produite au terme d'un cycle idéal, trace la figure énigmatique d'une nouvelle *fonction d'état*.



## Le peu profond mystère de l'entropie

L'analyse à laquelle je viens de procéder est évidemment rétrospective au sens où, pour que le problème décrit se pose, il fallait que le rendement défini par Carnot trouve un défenseur capable de le sauver de son association avec la théorie du calorique, un physicien qui prenne le risque de créer le problème de ce que signifie le cycle réversible dans un monde où l'énergie se conserve. Ce rôle est revenu à l'Anglais William Thomson, futur lord Kelvin. Il se fait que Thomson avait, à partir de 1847, entrepris d'apprendre à ses compatriotes à comprendre le fonctionnement de leurs machines à vapeur à partir de l'idéal défini par Carnot. En janvier 1850, il va même vérifier une conséquence expérimentale inédite de la théorie de Carnot (la température de congélation de l'eau s'abaisse quand augmente la pression à laquelle elle est soumise). Or, c'est également en 1847, alors que le cycle de Carnot définit l'horizon de ses recherches et de ses espoirs, que Thomson

entend pour la première fois Joule exposer ses expériences : la chaleur, loin de se conserver, pourrait être produite par le mouvement mécanique. C'est pour l'adepte de Carnot un véritable cauchemar qui commence. Dans un article de 1849, Thomson oppose Carnot à Joule : Joule prétend que dans la nature rien ne se perd, qu'aucune énergie n'est jamais détruite, et pourtant le rendement idéal de Carnot implique que, lorsque la chaleur diffuse directement d'un corps chaud à un corps froid, l'effet mécanique *qu'elle aurait pu produire* est perdu. Quel autre effet est donc, dans un tel cas, produit à *la place* de cet effet perdu ? Il n'y aura pas de théorie de la chaleur, conclut Thomson, tant qu'il n'y aura pas de réponse à cette question.

C'est un physicien peu connu, Rudolf Clausius, qui va apporter, en février 1850, une réponse d'une simplicité vertigineuse. Clausius n'avait pas lu Carnot (dont l'opuscule était introuvable) mais il avait lu Clapeyron, le seul disciple français de Carnot, et Thomson, et il avait, d'un seul coup, tranché le nœud gordien : « Je ne regarde pas, écrit-il, les difficultés comme étant aussi importantes que le croit Thomson<sup>1</sup>. » De fait, va montrer Clausius, il suffit d'abandonner l'un des axiomes de Carnot, celui qui affirme que, au bout du cycle, toute la chaleur prélevée sur la source

---

1. L'ensemble des articles de Clausius touchant la thermodynamique a été rassemblé en français sous le titre *Théorie mécanique de la chaleur*, réédité récemment par Jacques Gabay (Sceaux, 1991).

chaude a été restituée à la source froide. Il faut « voir » le cycle comme effectuant deux opérations simultanées : une *conversion* d'une partie de la chaleur prélevée à la source chaude en mouvement mécanique et une *transmission* du reste de cette chaleur à la source froide<sup>2</sup>. Le rendement idéal de Carnot fixe alors le rapport maximal entre conversion et transmission. Pour la même quantité de mouvement mécanique produite, tout cycle non idéal transmet à la source froide une *plus grande* quantité de chaleur qu'il n'était idéalement possible.

---

2. Ce faisant, Clausius annihile d'un seul coup ce qui, pour Thomson, avait été le principal intérêt du cycle de Carnot : le rôle central qu'y jouait la « chaleur latente d'expansion », la chaleur absorbée lorsqu'un gaz se dilate. L'existence de cette chaleur latente d'expansion s'imposait comme conséquence directe de la théorie calorique : lorsqu'un gaz repousse un piston, sans échange de chaleur (détente adiabatique), sa température diminue ; or, selon la théorie calorique, la température est fonction de la partie de calorique qui n'est pas « absorbée » par le corps, comme l'eau est absorbée par une éponge, sa partie « libre » et non « latente » ; une diminution de température qui n'est pas liée à un échange de chaleur avec le milieu mesure donc le passage sous forme latente d'une partie du calorique présent dans le corps, c'est-à-dire une augmentation de la chaleur spécifique du corps, de sa « capacité » à absorber de la chaleur. Et c'est parce qu'il pensait que la chaleur spécifique d'un gaz augmente avec son volume que Carnot a pu conclure que la chute du calorique devait produire d'autant plus de puissance motrice qu'elle se faisait à températures plus basses. La chaleur latente d'expansion est d'ailleurs, dans la lecture que Clapeyron fait du cycle de

Il est inutile de préciser que Thomson n'éprouva aucun plaisir à se voir ainsi pris de vitesse. Dès 1851, il publiait sa propre lecture du cycle de Carnot. Une querelle de priorité commence ici, que je ne suivrai pas car je dois résister à la tentation de « faire de l'histoire ». Si j'ai introduit les deux lecteurs rivaux de Carnot, Clausius et Thomson, c'est parce que la différence entre leurs lectures éclaire un problème dont nous avons hérité. Pour beaucoup, qui dit « cycle de Carnot » dit « irréversibilité ». C'est à Thomson que nous devons cette association quelque peu trompeuse, le cycle ayant au contraire inventé les moyens de créer des transformations énergétiques réversibles. En effet, c'est Thomson qui, présupposant que la conservation de l'énergie doit se doubler d'une transformation entre « cause » et « effet », se demande ce que peut bien « causer » la chaleur lorsque se produit ce que le cycle idéal de Carnot est conçu pour éliminer, un flux direct de chaleur

---

Carnot, la grandeur clé du rendement des machines thermiques, ce qui attirera immédiatement l'attention de William Thomson car la mesure de cette quantité était devenue dans les années 1840 l'un des Graal de la physique expérimentale (voir D. CARDWELL, *From Watt to Clausius*, Heinemann, Londres, 1971). Or, lorsque Clausius réinterprétera le cycle dans le cadre de la conservation de l'énergie, cette grandeur clé est la première victime de la « nouvelle manière de voir » qu'il propose. Cette chaleur latente, qui était censée être « cachée à notre perception », elle « n'existe pas le moins du monde », affirmera Clausius, « elle a été consommée en travail dans les changements d'état ».

entre deux corps de températures différentes. Le cycle désigne donc, pour Thomson, la question de la perte dont l'élimination définit son fonctionnement idéal : perte de quoi dans un monde où rien ne se perd ? Clausius, quant à lui, va reprendre de manière stricte la position qui fut celle de Carnot, héritier de la mécanique rationnelle, créateur d'un dispositif à *produire* des égalités.

La distinction entre les deux lectures apparaît déjà lorsqu'il s'agit de répondre à la question cruciale : que devient la preuve par l'absurde construite par Carnot à propos du caractère idéal de son cycle ? Quelle absurdité traduirait désormais une machine ayant un rendement plus élevé que le rendement idéal de Carnot ? En d'autres termes, que pourrait réaliser une telle machine, couplée avec une machine idéale de Carnot fonctionnant à l'envers ? Les deux lecteurs de Carnot sont apparemment d'accord : cette machine pourrait faire remonter gratuitement *plus de chaleur* de la source chaude vers la source froide qu'il n'en a flué. Mais ils donnent à l'« absurdité » que constituerait cette éventualité pourtant compatible avec la conservation de l'énergie des formulations significativement différentes. Pour Clausius, une telle « pompe » à chaleur creusant gratuitement une différence thermique est impossible car elle contredirait l'« essence de la chaleur qui tend toujours à équilibrer les différences de température qui existent ». Thomson, lui, cherchera à donner à cette impossibilité une forme aussi proche que possible de celle qu'emprunte désormais pour lui la conservation de l'énergie. Celle-ci proclame l'impossibilité du « mouvement perpétuel de

première espèce » : aucun dispositif ne peut créer gratuitement du travail ou du mouvement, c'est-à-dire de l'énergie. Le cycle idéal de Carnot traduit, quant à lui, l'impossibilité du « mouvement perpétuel de deuxième espèce » : aucun dispositif ne peut extraire du travail à partir de la chaleur du milieu ambiant sans, simultanément, transférer une partie de cette chaleur à un corps plus froid. Thomson entend donc construire une « thermodynamique », une science dynamique de la chaleur, à partir de *deux principes aussi symétriques que possible*. Et ce projet s'explicitera pleinement en 1852 lorsqu'il réussit à donner au « principe de Carnot » une formulation qui permet d'oublier dispositifs, moteurs et mouvements perpétuels. De même que la conservation de l'énergie peut se dire dans toute situation, on peut étendre la leçon du cycle à tous les processus, naturels et artificiels. Mais c'est la « perte », alors, qui doit devenir le sujet principal de cette leçon car c'est en termes de perte que le cycle idéal définit les processus « naturels » qu'il réussit à éviter. Tout cycle non idéal, *et, en général, toute transformation énergétique*, aboutit à *une dissipation sans retour de l'énergie*. Une partie de l'énergie qui, avant cette transformation, *aurait pu* être convertie en énergie mécanique ne pourra plus l'être. Un effet possible a donc été irréversiblement perdu. La dégradation de l'énergie est donc, pour Thomson, un principe aussi universel que le principe de conservation. Il affirme la disparition progressive au cours du temps de toute énergie « utilisable », c'est-à-dire susceptible de produire un travail, et donc, à terme, la « mort thermique de l'univers »,



l'état final auquel est voué l'univers lorsque la totalité de l'énergie sera devenue « indisponible ».

Qui dit « dégradation de l'énergie » dit « entropie », pensera-t-on. Et certes, du point de vue de la rhétorique imaginative, de la fascination qu'a exercée l'entropie, nous sommes les héritiers de Thomson. Mais si l'entropie est si mystérieuse, si difficile à expliquer, c'est justement parce que, grandeur définie par Clausius en 1865 seulement, elle n'avait pas du tout pour vocation de définir une « dégradation de l'énergie », ni de caractériser l'ensemble des processus naturels. Et si elle n'est pas incapable de parler de « perte » et d'« irréversibilité », elle le fait, on va le voir, sur un mode très particulier, sans jamais abandonner la référence à l'idéal défini par Carnot.

La grande différence entre Thomson et Clausius est que Clausius, lui, n'a jamais visé une symétrie entre le principe de conservation de l'énergie et le « principe de Carnot ». Et lorsque, à son tour, il donnera une formulation « réaliste » et symétrique aux deux principes, c'est en les faisant passer tous deux à la limite cosmologique : « L'énergie de l'univers reste constante. L'entropie de l'univers croît vers un maximum », écrit Clausius en 1865, et ces deux énoncés ne sont pas seulement d'une grande sobriété mais d'une rare ironie. Car l'univers n'est pas, dans ce cas, le symbole du caractère « absolu » de la loi de croissance d'entropie. C'est, pour Clausius, le seul « système » dépourvu par définition d'échanges avec un environnement quelconque, et c'est pourquoi son cas est le seul qui permette à l'énergie et à l'entropie d'être sujets d'énoncés de portées semblables.

Remarquons au passage que si la relativité générale d'Einstein a pris l'univers pour objet privilégié, ce n'était pas parce que tous les problèmes étaient résolus ailleurs, mais plutôt parce que l'univers homogène et isotrope est l'un des rares objets assez simples pour pouvoir être traité explicitement grâce aux équations d'Einstein. De même, ici, la formulation cosmologique de Clausius ne signifie pas que tous les processus naturels entraînant une croissance de l'entropie ou une dégradation de l'énergie, la conclusion peut être étendue à l'univers entier. Bien au contraire, l'univers est le seul cas où ne surgit pas la difficulté que masquait l'apparente généralité de la « dégradation de l'énergie » de Thomson : si l'énergie se conserve bien partout et toujours, la mesure dans laquelle l'énergie est dégradée ou non, utilisable ou non, *dépend en revanche des circonstances*. Ainsi, le rayonnement émis par le Soleil est « dissipé » irréversiblement du point de vue du Soleil, mais n'en est pas moins « utilisé » sur Terre par tous les vivants qui savent l'« exploiter ». La diversité qualitative d'Engels resurgit à travers la diversité des dispositifs de conversion. Et c'est ce que sait Clausius. Comme nous allons le voir, il montrera (contre Thomson) que seul le cycle idéal de Carnot peut donner un caractère « mesurable » à la perte ou à la « dégradation ». Celle-ci ne peut donc être évaluée que relativement à la transformation idéale réversible, c'est-à-dire relativement à un dispositif humain <sup>3</sup>.

---

3. L'histoire, assez peu connue, de la manière dont Thomson et Tait, qui affirme la priorité de Thomson

Il ne s'agit pas, je le rappelle, de répartir les mérites entre Clausius et Thomson, mais d'éclairer les raisons pour lesquelles l'entropie laisse si souvent perplexe : pourquoi une grandeur d'allure quasi prophétique nous renvoie-t-elle donc à un dispositif alambiqué, qui semble solidaire du désormais humble problème du rendement des machines à vapeur ? Et la première chose à comprendre est que, entre les mains de Clausius, le cycle de Carnot n'a plus grand-chose à voir avec un modèle idéal de machine à vapeur. Clausius, à travers Carnot, est l'héritier de Lagrange, et de la grande tradition mécanique où l'égalité est le pivot assurant la liberté de transformer les définitions, de construire des fictions qui traduisent la singularité de l'objet. Ce n'est donc ni la perte ni le rendement qui intéressent d'abord Clausius, mais la réversibilité du cycle. Cette réversibilité est le pivot à partir duquel il devrait être possible de construire la définition de ce qui le singularise.

C'est donc le cycle dans son ensemble, et non une quelconque transformation énergétique particulière, idéale ou non, qui va être mis en fiction. Clausius demandera que l'on cesse de poser des questions « locales », par exemple à quelle étape s'est produite une conversion, à quelle étape s'est produit un flux de chaleur. Il utilisera le cycle

---

contre Clausius, vont être pris par ce dernier en flagrant délit d'absurdité, en 1879, justement parce qu'ils croient pouvoir donner une définition générale de la perte, est racontée par E. DAUB, « Entropy and Dissipation », in *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 2, 1970, p. 321-354. Voir aussi CARDWELL, *op. cit.*

idéal comme dispositif permettant d'inscrire un signe « = » entre *un* flux et *une* conversion. Lorsque le cycle est idéal, *il est siège de deux transformations qui se compensent exactement*. Si un tel cycle a absorbé une quantité  $Q_1$  de chaleur à la température  $T_1$  de la source chaude, et en a cédé une quantité  $Q_2$  à la source froide à la température  $T_2$ , on peut et on doit dire que le flux de la quantité de chaleur  $Q_2$  de la température  $T_1$  à la température  $T_2$  compense exactement la conversion en travail de la quantité de chaleur  $Q_1 - Q_2$ . Le cycle idéal permet donc de mettre en scène une *valeur d'équivalence* définissant le « juste prix » d'une conversion en termes de flux.

Sur deux points, le traitement de Clausius s'inscrit en ligne directe dans l'héritage de Lagrange. Tout d'abord, l'idéal se sépare de manière dramatique du cas réel : la valeur d'équivalence ne correspond pas, contrairement à l'équivalent chaleur-travail mesuré par Joule, à l'évaluation d'un processus particulier, elle est autorisée par le caractère idéal, réversible, du cycle. Corrélativement, et c'est le second point, la valeur d'équivalence semble fixer un *prix*, mais c'est bien plutôt la possibilité de fixer un prix, une compensation, par l'intermédiaire du cycle idéal, qui assigne leur définition aux termes mis en rapport. Bref, c'est l'équivalence qui est aux commandes et qui distribue leur identité aux termes qu'elle articule. L'idéal est devenu le véritable et unique sujet de la description, en ce que c'est lui qui autorise la mise en fiction du cycle, sa transformation en opérateur de mise en équivalence.

On ne s'étonnera pas que le pas suivant ait été, pour Clausius, la définition d'une *fonction d'état*. L'enjeu est de passer du « juste prix » de la conversion à la définition que permettait l'énergie mécanique chez Lagrange, celle du « prix » du passage entre *deux états quelconques du cycle*, indépendamment du chemin emprunté du moment qu'il est idéal, c'est-à-dire réversible<sup>4</sup>. Pour construire cette fonction d'état, Clausius va transformer le cycle de Carnot en dispositif purement fictif. Il s'agit d'utiliser pleinement l'équivalence, le signe « = » entre flux et conversion que permet d'écrire le cycle bouclé. Clausius imaginera par exemple un cycle à trois sources. Ce dispositif n'a

---

4. Que cette ressemblance ne trompe pas. On peut également dire que Clausius a contribué à rendre intelligible la *fiction* lagrangienne en définissant la première fonction d'état physico-mathématique « pour elle-même » (l'énergie était déjà la quantité centrale de la mécanique avant Lagrange). Son travail est à cet égard de haute pédagogie. De même, il a dû reconnaître, et doit expliquer tout au long, une différence entre chemins lagrangien et carnotien. Toutes les variables d'un système mécanique sont libres, alors que, dans le cas des « chemins thermodynamiques », la variation doit être restreinte à un couple de variables, les autres (quantité de chaleur pour les adiabatiques, température pour les isothermes) sont maintenues constantes. Pierre Duhem, continuateur de Clausius, est également celui qui a le mieux mis en scène la « fiction lagrangienne » que d'autres auteurs négligent comme simple moyen au service de la description mécanique des systèmes. M'inspirant de Duhem pour décrire l'« événement lagrangien » dans *L'Invention de la mécanique*, j'ai donc décrit la mécanique d'un point de vue « thermodynamique ».

aucun sens réaliste, mais il permet une mise en équation de type algébrique, où une quantité, en l'occurrence la valeur d'équivalence de la conversion d'une quantité de chaleur en énergie mécanique, est définie en termes d'autres quantités, les valeurs d'équivalence respectives de deux échanges de chaleur à température déterminée<sup>5</sup>. Ce qui permet de construire une égalité assurant la mesure de toutes les transformations selon une « monnaie » unique : un échange de chaleur à température déterminée. La fonction d'état définie par Clausius est le triomphe de la fiction rationnelle, du « comme si » autorisé par la compensation.

Au terme de ses travaux, en 1854, Clausius a donc défini la fonction d'état qui caractérise le cycle idéal : c'est la fonction  $Q/T$ . A toute transformation réversible entre deux états, quel qu'en soit le chemin, on peut faire correspondre une « distance » : une quantité de chaleur échangée

---

5. Clausius postule que, en plus de la chaleur qu'il absorbe à la source chaude, le cycle absorbe, à une troisième source de température intermédiaire quelconque, une quantité de chaleur qui est la même que celle qu'il cédera à la source froide. Tout se passe donc « comme si » toute la chaleur absorbée à la source chaude était convertie en travail, alors que toute la chaleur absorbée à la source intermédiaire fluait vers la source froide. Une telle opération n'a bien sûr de sens qu'en termes de compensation : l'idée que c'est la chaleur absorbée par la source chaude qui se convertit en travail ne correspond à aucune hypothèse physique.

divisée par la température de l'échange. Prenons par exemple deux états séparés par une distance infinitésimale  $dQ/T$ , « coût » de la transformation qui mène de l'un à l'autre. Que signifie une telle évaluation ? Elle signifie que, quel que soit le chemin infinitésimal (réversible) entre les deux états, il est équivalent à un chemin particulier, où  $dQ/T$  a une signification bien déterminée. Ce chemin est constitué par un fragment infinitésimal d'isotherme (où le système reçoit une quantité de chaleur  $dQ$  à une température  $T$ ), et par un fragment infinitésimal d'adiabatique, où le système est donc thermiquement isolé ( $dQ = 0$ ), alors que la température varie. L'essentiel est donc de généraliser ce que Carnot avait inventé pour assurer la réversibilité opératoire de son cycle : décomposer un chemin quelconque en fragments de chemins particuliers car caractérisés chacun par une variation imposée d'une variable contrôlée ( $Q$  ou  $T$ ), la seconde ( $T$  ou  $Q$ ) étant maintenue constante. Il faut donc imaginer l'espace des états de Clausius comme strié par l'ensemble dense de toutes les courbes isothermes et adiabatiques caractérisant le système concerné : ce double ensemble forme un système de mailles aussi fin que l'on veut, en termes duquel tous les chemins réversibles imaginables entre deux états de cet espace pourront être redéfinis. Tout chemin peut donc être représenté comme une succession infinitésimale d'isothermes ( $dQ/T$  bien déterminé) et d'adiabatiques ( $dQ/T = 0$ ) semblables à celles qui constituaient les quatre étapes du cycle de Carnot. La valeur d'équivalence du passage entre deux

états quelconques sera donc l'intégrale des «  $dQ/T$  » correspondant à la succession des isothermes parcourus<sup>6</sup>.

Par définition, l'intégrale de  $dQ/T$  sur un cycle idéal est identiquement nulle. C'est donc bien la fonction d'état recherchée, exhibant ce que « conserve » le cycle idéal de Carnot<sup>7</sup>. La première définition de ce qui va devenir l'entropie, fonction d'état correspondant aux transformations énergétiques, est donc que, dans le cas du cycle idéal de Carnot, elle a pour valeur  $Q/T$ .

Je me suis attardée à la fonction d'état définie par Clausius pour deux raisons.

La première est d'ordre quasi culturel. Il est de bon ton, aujourd'hui, d'assimiler manipulation et

---

6. Les adiabatiques n'ont pas de contribution explicite mais elles sont parfaitement bien définies puisque le changement de température qui correspond au passage d'une courbe isotherme à l'autre suffit à identifier la courbe adiabatique qui a dû être suivie pour effectuer ce passage.

7. La définition de  $Q/T$  en tant que fonction d'état recrée l'éminente simplicité originelle du cycle. Du point de vue de la théorie de la chaleur-calorique, le cycle peut, si l'on prend pour variables  $Q$  et  $T$ , être représenté comme un rectangle : il perd autant de chaleur à la source froide qu'il en gagne à la source chaude. Et c'est également comme un rectangle que l'on peut représenter le cycle idéal de Clausius si l'on adopte pour variables  $Q/T$  et  $T$ . Mais la ressemblance s'arrête là : la conservation de  $Q$  était une conséquence de la nature de la chaleur, alors que le rôle clé de la fonction  $Q/T$  est intégralement solidaire de la notion de transformation réversible inventée par Carnot et Clausius.



mesure à une préoccupation de type utilitaire, qui s'opposerait en tant que telle à l'activité « noble » de création de signification. Or, l'histoire de Carnot, achevée par Clausius, est tout entière axée sur la manipulation, le contrôle et la production de mesure, mais elle démontre aussi l'invention, la production libre, parfaitement contre-intuitive, de signification qu'implique la création de certaines mesures. Bien sûr, on peut mesurer n'importe quoi, décider de manière unilatérale de soumettre à la même mesure l'activité des ouvriers et le mouvement de la bille galiléenne. Mais on n'a alors aucun moyen d'établir le rapport entre la mesure et « ce qui » est mesuré. Dans le cas de la bille galiléenne, et des autres objets de la mécanique, ce rapport semble au contraire parfaitement déterminé : l'objet mécanique est défini comme mesurable, défini par l'équivalence à laquelle s'adresse la mesure. Dans le cas des transformations énergétiques, en revanche, la mesurabilité n'est pas du tout « donnée », elle doit être créée, fabriquée de toutes pièces, mais la définition d'une possibilité de mesurer n'est pas, dans ce cas, arbitraire. Elle est créatrice.

Corrélativement, la mesure définie par Clausius exige et oblige. Et c'est bien là que se situe la différence entre Clausius et Thomson que j'ai déjà commentée. Pour tous deux, toutes les transformations énergétiques ne se valent pas, et le « second principe de thermodynamique » doit expliciter cette non-équivalence. Mais Thomson a entrepris de faire porter cette non-équivalence sur les processus eux-mêmes, comme c'était le

cas en mécanique. De même que sa conservation, la dégradation de l'énergie devait caractériser les processus « en eux-mêmes ». La non-équivalence devait être « objective » au sens où elle n'obligerait le physicien à rien de particulier, étant « dictée » par les phénomènes. Clausius, lui, a réinventé l'héritage lagrangien transmis par l'intermédiaire de Carnot en explicitant ce qu'exige et ce à quoi oblige une mesure *rationnelle*, autorisée par une fonction d'état et donc par le pouvoir du signe « = ». Si toutes les transformations énergétiques ne se valent pas, c'est parce que seules les transformations réversibles satisfont aux exigences qui permettent la définition d'une telle fonction d'état. La mesure rationnelle exige donc l'idéal réversible. Et, fait nouveau qui différencie mécanique et thermodynamique, elle oblige le physicien à se reconnaître manipulateur, partie prenante de la définition de l'équivalence. Le « changement d'état » mesuré par Clausius n'a rien à voir avec les transformations spontanées qui se produisent dans la nature. Il implique au contraire que toutes les évolutions « naturelles » spontanées ont pu être annulées. Alors même que l'idéal se définit par l'absurdité d'un agencement qui se solderait par un accroissement gratuit des différences de température, et affirme donc un monde où les différences de températures se nivellent spontanément, ce nivellement, comme toute autre évolution spontanée, échappe à la description. Celle-ci a pour seul objet des déplacements pilotés de l'extérieur, de pseudo-évolutions où le système est en fait contraint par le manipulateur de

passer d'un état d'équilibre à un autre infiniment voisin<sup>8</sup>.

Si, selon Kant, la révolution copernicienne marque le point où c'est le scientifique qui pose ses questions, qui soumet le phénomène à ses catégories, la soumission, ici, n'est pas un miracle : le juge copernicien doit avoir des mains, il doit fabriquer, en l'occurrence piloter, l'« objet » soumis. La transformation réversible est un artefact humain et son caractère artificiel n'est pas de l'ordre de la purification (lisser le plan incliné, polir les billes, aller sur la Lune où l'air est absent), mais de la création.

La seconde raison tient à l'affrontement dont le « cycle de Carnot » va être l'arène, et l'entropie l'enjeu. Nous n'en sommes pas encore là, ou, plus précisément, et c'est le point intéressant, *nous n'en sommes pas du tout là*. En effet, si les transformations réversibles de Carnot-Clausius « miment » les évolutions dynamiques et ne peuvent désigner de « référence naturelle », telle la chute de la bille supposée idéalement lisse, comment ce cycle a-t-il pu permettre l'affrontement

---

8. La mesure « rationnelle » d'un processus dissipatif implique donc l'élimination de la dissipation qui le caractérise. Ce qu'a accompli Carnot pour les transformations chaleur/travail, et ce que réalisera la thermodynamique chimique pour celles qui impliquent une réaction chimique : l'ensemble des grandeurs thermodynamiques caractérisant une réaction chimique ont en fait pour objet un « déplacement » d'état d'équilibre en état d'équilibre qui mime rationnellement la réaction spontanée.

entre les descendants de Carnot et ceux d'Hamilton ? Maxwell, soulignons-le, ne riait pas du cycle de Carnot, qui l'a passionné, il riait de la prétention des physiciens allemands à faire exister un quelconque rapport entre la dynamique hamiltonienne et le mime laborieux qui en a reproduit certains des incommunicables attributs. Et donc la question se pose maintenant : comment l'entropie, fonction d'état qui ignore le temps des évolutions spontanées puisque sa définition semble jusqu'ici exiger des transformations intégralement contrôlées par des opérations humaines, a-t-elle pu supporter une telle prétention ?

Dans la définition généralisée que lui donnera Clausius en 1865, l'entropie (de τροπή, « transformation ») va devenir la fonction d'état qui vaut *pour tout cycle, idéal ou non*. Ce qui signifie que dans tout cycle de transformation, idéal ou non, du moment qu'il se boucle, c'est-à-dire que l'on récupère le « corps » dans son état initial, l'intégrale des variations infinitésimales de l'entropie, écrites  $dS$ , est *par définition* identiquement nulle. Bien sûr, dans tous les cas non idéaux, la variation de l'entropie  $dS$  cesse d'être égale à  $dQ/T$ , fonction d'état des transformations réversibles. Ce qui n'a pas l'air bien grave mais a des conséquences drastiques. Lorsque le cycle n'est pas idéal mais inclut des transformations spontanées, synonymes de pertes,  $dQ/T$  cesse d'être une fonction d'état, alors que l'entropie, elle, conserve ce titre. *Mais il ne s'agit plus, précisément, que d'un titre*, car l'entropie n'a, dans le cas non idéal, aucun rapport déterminé avec les variables qui caractérisent le système.

On peut certes écrire en toute généralité que  $dS = dQ/T + dQ'/T$ . Mais la quantité de chaleur  $Q$  se borne désormais à décrire les échanges « compensés » par le travail effectivement produit, alors que  $Q'$ , la chaleur « non compensée », désigne la chaleur qui a flué inutilement, *sans compensation*. Et c'est tout ce que l'on sait d'elle car la mesure de la « perte », de la chaleur qui a flué inutilement ne caractérise pas le cycle réel en tant que tel, mais seulement par contraste avec le cycle idéal. Pour la mesurer, il « suffit » de coupler le cycle non idéal à un cycle idéal fonctionnant à l'envers, c'est-à-dire utilisant le travail produit par le premier : la quantité de chaleur passée à la source froide que ce second cycle sera *incapable* de faire remonter vers la source chaude est la chaleur non compensée.

En d'autres termes, la fonction d'état « entropie » ne permet pas de sortir de l'idéal inventé par Carnot. Elle ne permet de définir les processus irréversibles que comme « pertes » par rapport à l'idéal de référence que constitue toujours la transformation réversible. Aucune relation physique ne permet de dépasser la constatation à laquelle se réduit la mesure de la perte : on n'a pas réussi à faire repasser toute la chaleur de la source froide vers la source chaude. Puisque les deux cycles couplés laissent un reliquat de chaleur à la source froide, ils ne restaurent pas l'état initial, et l'entropie finale n'est donc pas égale à l'entropie initiale. Le signe « = », dont la fonction d'état traduit toujours le pouvoir, est ici impuissant à identifier ce qu'il articule.

L'entropie a donc beau être une fonction d'état généralisée, conservée par tout cycle, idéal ou non, *sa définition ne confère aucun pouvoir au physicien* dès lors que le cycle n'est pas idéal. Ou, plus précisément, le seul pouvoir auquel le physicien puisse prétendre est celui de définir le signe de la chaleur non compensée,  $dQ' > 0$ , et ce pouvoir traduit ce que chacun sait : cette chaleur non compensée correspond à une perte<sup>9</sup>. Le cas inverse, où la chaleur compensée serait négative, correspondrait à l'« absurdité » du mouvement perpétuel de seconde espèce, à l'augmentation gratuite des différences de température. Mais la perte peut seulement être constatée, évaluée par contraste avec le cycle idéal, et non reliée à une quelconque description, réaliste ou fictive, des processus qui en sont responsables. Que les transformations énergétiques irréversibles fassent toujours croître l'entropie n'est donc qu'une autre manière de dire qu'elles se définissent toujours comme défaut par rapport à l'idéal réversible.

Étrange « fonction d'état », donc, que l'entropie, puisqu'elle semble soumettre toutes les transformations énergétiques à la logique « rationnelle » des fonctions d'état, mais ne correspond à aucune définition, à aucune mise en relation systématique des variables mesurables, cette mise en relation étant restreinte aux seuls cas où la transformation

---

9. Que cette production soit par définition positive tient à la définition de l'entropie. Elle aurait aussi bien pu, selon une autre définition, être négative. L'important est qu'elle aurait de toute façon un signe déterminé.

est réversible. Étrange fonction d'état grâce à laquelle le temps des processus « naturels » semble prendre pied dans la thermodynamique – que toute transformation irréversible augmente l'entropie désigne apparemment une augmentation au cours du temps – mais qui n'est elle-même bien définie que dans les situations idéales où le temps de la manipulation se substitue intégralement au temps des processus. Et telle est bien, sans doute, la finalité que Clausius attribuait à son entropie : faire taire son rival Thomson ; démontrer que la dégradation de l'énergie au cours du temps n'a pas, en général, de signification physique bien définie.

Et pourtant, l'entropie a fasciné par le message de fatalité dont elle semble porteuse, par son association à des termes chargés : dégradation, mort thermique, et bientôt flèche du temps. Mais il ne s'agit pas simplement d'un « malentendu culturel », synonyme de confusion où se complairait l'opinion, alors que les physiciens, eux, auraient entendu la leçon de Clausius et se seraient soumis aux contraintes austères correspondant aux exigences et aux obligations de leur pratique. Car la physique est une histoire inventive, et l'invention de nouvelles questions est toujours un risque, jamais une opération logique ou déontologique. En l'occurrence, les physiciens ont également subi le « mystère » de l'entropie. Alors même qu'elle est muette quant à la nature de cette irréversibilité dont elle se borne à comptabiliser le résultat en termes de perte, l'entropie n'en a pas moins « représenté » pour eux le problème des

« processus irréversibles », ou plus précisément leur défi. N'est-il pas possible de « sortir » du cycle de Carnot, c'est-à-dire d'un idéal qui ne peut être attribué aux processus et répond donc aux « intérêts humains » axés sur l'évaluation du rendement et de la perte ? N'est-il pas possible de conférer à l'irréversibilité, ou à la croissance de l'entropie, une signification positive ? C'est ici que, pour certains protagonistes de la question, les exigences et les obligations de l'héritage lagrangien vont changer de sens et devenir synonymes d'asservissement de la physique (thermodynamique) à des intérêts seulement utilitaires, à des préoccupations de rendement. Nouvelle mise en scène qui oppose l'« homme » désireux de ne pas « perdre » et celui entend répondre aux questions posées par une nature qui ignore, quant à elle, le souci de ne pas gaspiller.

Cependant, pour que cette mise en scène soit possible, il faut encore, et une dernière fois, faire parler le cycle de Carnot. Si la question de savoir dans quelle mesure et à quel prix il était possible de « sortir » du cycle a pu être posée, il a fallu en effet d'abord que le témoignage du cycle soit formulé indépendamment des questions de « conversion », ou plus précisément que celles-ci passent au second plan, deviennent de simples conséquences d'un autre mode de définition. Il a donc fallu qu'ait été explicité autrement ce qui le singularise. En l'occurrence, la question de la possibilité de conférer une signification positive à la croissance de l'entropie correspond à un nouvel acteur, qui va maintenant occuper le centre de la scène : *l'état d'équilibre thermodynamique*.



De quoi en effet est constitué un cycle de Carnot ? D'une succession d'états qui sont autant d'états d'équilibre. En effet, chacun des états traversés par le cycle se maintiendrait s'il était laissé à lui-même. C'est la manipulation qui « force » le système à changer d'état. Et que signifie une « perte » dans le cycle de Carnot ? Une manipulation trop brutale a éloigné le système d'une distance finie de l'équilibre, et le système a connu une évolution spontanée le ramenant à l'équilibre. L'entropie augmente donc chaque fois qu'un système rejoint, *par une évolution spontanée et irréversible*, son état d'équilibre. L'intérêt se concentre donc maintenant sur ces « états d'équilibre » que parcourt le cycle de Carnot : chacun peut être défini comme le *terme* d'une évolution irréversible, à entropie croissante.

Jusque dans les dernières décennies du XIX<sup>e</sup> siècle, la différence entre l'état d'équilibre qu'atteint par exemple un milieu réactionnel chimique, ou un gaz dont la température devient uniforme, d'une part, et un pendule, d'autre part, n'avait pas été mise en problème. Chacun, bien sûr, savait que si le mouvement d'un pendule s'amortit jusqu'à l'état d'équilibre immobile, c'est à la suite de frottements : lorsque le mouvement pendulaire est idéal, son état d'équilibre est un état dynamique semblable à tous les autres, correspondant simplement à une énergie potentielle minimale. Le pendule idéal traverse périodiquement cet état comme tous les autres, sans s'y arrêter. La seule particularité de cet état par rapport aux autres états de sa trajectoire est que

c'est le seul état où le pendule restera s'il y est mis. Chacun savait que, au contraire, un nivellement de température ou une réaction chimique sont des processus qui mènent à l'équilibre de manière monotone, l'équilibre étant le terme d'une évolution sans retour. Mais cette différence constatable n'entraînait aucune obligation. Lorsque Carnot a parlé du « rétablissement de l'équilibre du calorique », il n'a pas jugé utile de préciser la différence d'avec un état d'équilibre mécanique. Et il faudra un certain temps avant que cette obligation, qui fait obstacle aux transpositions directes de la mécanique à la thermodynamique, s'impose à tous. Au début des années 1870, le jeune physicien Max Planck en fera une arme de guerre contre son aîné Wilhelm Ostwald, dont la doctrine « énergétiste » occulte la différence entre l'équilibre du pendule et celui de la chaleur. Mais en 1885 encore, le jeune Pierre Duhem se verra refuser sa thèse parce qu'il met en cause son aîné Marcellin Berthelot, dont la « thermochimie » se fondait sur une assimilation entre les deux types d'équilibre <sup>10</sup>.

La possibilité d'utiliser le « second principe », la croissance de l'entropie définie par Clausius,

---

10. Pour Berthelot, de même que l'état d'équilibre mécanique est défini par la valeur minimale de l'énergie potentielle, l'équilibre chimique serait défini par un état d'énergie « chimique » minimale du milieu réactionnel. L'équilibre chimique serait atteint lorsque le « travail chimique » maximal aura été accompli, ce travail étant mesuré par la chaleur de réaction dégagée par le système.

pour dire la singularité de l'état d'équilibre thermodynamique n'est pas une découverte individuelle. En l'espace de quelques années, Massieu (1869), Planck (1869), Gibbs (1876), Helmholtz (1882) définissent, pour différents types de système thermodynamique, différentes fonctions qui, chacune, explicite le rôle du second principe de thermodynamique dans la définition de l'équilibre du système correspondant<sup>11</sup>. Pierre Duhem baptisera en 1886 l'ensemble de ces fonctions « potentiels thermodynamiques ». L'état d'équilibre thermodynamique correspond à la valeur extrémale du potentiel représentant le système (l'entropie dans le cas d'un système thermiquement isolé). L'équilibre est défini par le fait que le second principe de thermodynamique interdit toutes les évolutions spontanées, c'est-à-dire non

---

11. Le maximum d'entropie permet de définir les états d'équilibre atteints par un système isolé thermiquement puisque, si aucun échange de chaleur n'a lieu, toute variation  $dQ$  sera liée aux processus non compensés irréversibles. Mais, dans d'autres systèmes thermodynamiques, on a affaire à des évolutions définies par d'autres « conditions aux limites ». Ainsi, une évolution irréversible vers l'équilibre peut se faire à température constante, ce qui implique des échanges thermiques avec son milieu, et à pression constante (pensons à une réaction chimique se faisant « au bain-marie », c'est-à-dire à la température d'ébullition de l'eau et à la pression atmosphérique). Dans ce cas, ce n'est pas l'entropie  $S$ , mais le potentiel thermodynamique  $G$ , souvent appelé « énergie libre de Gibbs », qui atteint sa valeur extrémale (minimale et non plus maximale) à l'équilibre.

imposées par une manipulation du système, qui mèneraient le système à quitter l'état caractérisé par cette valeur extrême. Ainsi, toute évolution spontanée qui éloignerait un système thermiquement isolé de l'état défini par le maximum d'entropie conférerait une valeur négative à  $dQ'$ , et est donc interdite. Le caractère intégralement manipulé du cycle de Carnot a donc changé de sens. Il ne répond plus au souci d'éviter tout processus spontané, synonyme de perte. Il résulte directement du fait que chacun des états qui le composent ne peut se modifier de lui-même, mais seulement en raison d'une manipulation.

A nouveau, il n'y a pas de miracle. La définition de l'état d'équilibre est profondément différente selon qu'il s'agit de mécanique ou de thermodynamique. L'état d'équilibre mécanique est défini par un minimum de l'énergie potentielle, mais chaque état dynamique peut être pareillement caractérisé par une valeur déterminée de cette énergie potentielle et tous les états dynamiques se valent. En revanche, on ne peut caractériser une situation thermodynamique quelconque par une valeur du potentiel thermodynamique qui lui correspond. Seul l'*extremum du potentiel*, désignant l'état d'équilibre, est défini. Seul l'état d'équilibre correspond donc à un état au sens propre du terme, c'est-à-dire est caractérisé, par l'intermédiaire du potentiel correspondant, en termes des variables (pression, température, etc.) qui définissent le système. La croissance de l'entropie lors d'une évolution irréversible vers l'équilibre (et plus généralement la variation d'un

potentiel thermodynamique entre un état initial de non-équilibre et l'état final d'équilibre) n'est donc pas plus mesurable que l'entropie de Clausius. Seul le signe de la variation est défini.

Il n'empêche. Un glissement quasi esthétique a eu lieu. Le cycle de Carnot n'est plus désormais le mime des trajectoires lagrangiennes. Il est devenu le dispositif à partir duquel les états d'équilibre thermodynamique ont acquis le moyen d'affirmer *leur différence* d'avec les états d'équilibre mécanique. C'est en tant que tel qu'il peut désormais constituer l'arène où va se jouer la signification de cette différence. Le second principe ne définit plus la conversion optimale de chaleur en travail, il donne aux processus naturels de transformation énergétique une unité qui est à la fois au plus proche de la mécanique et en contraste radical avec elle. La croissance irréversible de l'entropie ne représente plus le fait que les processus naturels ne peuvent être soumis sans manipulation à la mise en équivalence dynamique, elle s'impose *comme si* elle décrivait « positivement » le contraste entre ces processus naturels et les évolutions dynamiques.

Comment comprendre l'évolution « irréversible » ? Comment interpréter la croissance de l'entropie ? Ces questions sont, j'espère l'avoir montré, relatives à une véritable histoire, non au développement logique d'un problème qui aurait « résulté » de la première unification des processus naturels sous le signe de la conservation de l'énergie. Et, plus précisément, ces questions signalent ce que l'on peut appeler une « opération

de capture ». Engels espérait, comme nous l'avons vu, que la conservation de l'énergie mettrait en crise une physique qui ne pense pas l'opération de mesure dont elle dépend cependant, et la contraindrait à affronter la question de la différence qualitative des « mouvements ». Je viens de raconter sinon pourquoi du moins comment cette question *n'a pas été*, en tant que telle, mise en histoire par la physique. Car la diversité a été « capturée », « unifiée » par un trait commun qui ne la désigne pas en tant que telle, mais met en scène le contraste entre l'ensemble divers des processus où l'énergie se transforme, d'une part, et la mécanique, de l'autre. C'est en ce sens que le cycle de Carnot est une arène, un lieu où des acteurs qui auraient pu se rencontrer tout autrement sont voués à combattre, c'est-à-dire à se définir par une et une seule différence. Qu'est-ce que l'énergie ? Que signifie la diversité de ses formes ? Capturées, ces questions se réduisent à celle du contraste entre états d'équilibre mécanique et thermodynamique.

Qui dit « capture » dit toujours possibilité d'« entre-capture », co-invention corrélative des deux identités en référence mutuelle. Quel physicien va-t-il naître du second principe ? Comment va-t-il définir ce qu'il peut exiger des « processus irréversibles » auxquels s'adresse désormais sa pratique, de ces processus qui le mettent face à un dilemme : ou bien il les soumet à une mise en mesure, mais il élimine alors l'irréversibilité qui les singularise, ou bien il les tient pour irréversibles, mais il ne peut alors les décrire que du

point de vue de l'état d'équilibre où ils mènent dans certaines conditions ? Peut-il espérer une interprétation physique de la croissance de l'entropie, une description physique de la distinction entre situation de non-équilibre et état d'équilibre ? Peut-il exiger d'une situation de non-équilibre qu'elle se définisse comme un état ? Ou bien doit-il faire son deuil de cette exigence, et célébrer la rationalité austère d'une pratique qui aurait renoncé à l'ambition réaliste que pouvait nourrir la mécanique, et accepterait de manière lucide les limites auxquelles elle est astreinte ? Laquelle des valeurs désormais divergentes ferait-il triompher, celle du réalisme ou celle d'une construction qui célèbre la singularité des cas qui font coïncider description et raison ?





## Les obligations du physicien

Qu'ai-je fait ? J'ai mis en scène une « arène » par rapport à laquelle ont été définis, c'est-à-dire inventés, les enjeux de l'extension de la notion de conservation à l'ensemble des processus naturels. J'ai prétendu que l'histoire qui va se jouer à partir d'eux peut être lue comme un effet de capture : les « grands problèmes » soulevés par la diversité qualitative des formes d'énergie intéressent tout le monde alors qu'il faut être physicien pour se préoccuper de la différence entre état d'équilibre mécanique, caractérisé par un minimum de l'énergie potentielle, et état d'équilibre thermodynamique, caractérisé par l'extremum d'un potentiel thermodynamique. Mais je n'ai pas parlé de ceux qui vont s'affronter, seulement de représentations physico-mathématiques. Serais-je tombée dans le piège d'une « histoire des concepts » qui les représente comme créations pures, détachées des pratiques et des histoires de leurs créateurs<sup>1</sup> ? J'ai

---

1. Alors que certains de ces créateurs, comme William Thomson, sont en train de contribuer à transformer le

voulu au contraire présenter, c'est-à-dire rendre présents, les êtres qui singularisent l'histoire de la physique et qui, loin de permettre de l'expliquer, ou de la résumer, en font une véritable histoire, avec des moments de suspens, voire de drame, ne pouvant appartenir qu'à elle. Car les êtres que j'ai décrits ou que je vais encore décrire, l'entropie issue du cycle de Carnot, les états d'équilibre thermodynamique, le démon de Maxwell, ambassadeur parmi nous de la Reine des Cieux hamiltonienne, et on pourra un jour ajouter les relations d'indétermination quantique ou encore la différence de symétrie entre l'interaction gravitationnelle et les trois autres, sont bien sûr des créatures de l'histoire humaine, mais de très singulières créatures, qui hantent leurs créateurs, qui se voient attribuer le pouvoir d'imposer leurs propres questions.

Dans *La Guerre des sciences*, j'ai présenté ce que j'ai appelé des « faitiches expérimentaux », le neutrino ou le micro-organisme pastorien. Dans *L'Invention de la mécanique* sont apparus des faitiches assez différents, « physico-mathématiques », ces équations mécaniques traduisant et actualisant le pouvoir et la liberté que le signe « = » confère au physicien. Nous avons maintenant affaire à des « faitiches énigmatiques », dont la singularité est d'imposer des questions que l'on serait tenté de dire « illégitimes », des questions qu'ils ne sont

---

monde et de participer à la construction d'empire. Voir C. SMITH et M. N. WISE, *Energy and Empire. A Biographical Study of Lord Kelvin*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

pas allés fabriquer pour résoudre et que devrait donc exclure une analyse sobre de leur mode de construction.

Illégitime ne signifie pas irrationnel, mais traduit seulement le fait, à constater, que les valeurs que font et qui font exister ces faitiches ne sont pas celles de la preuve ou de la mise à l'épreuve des faits mais celles de la vocation : ils font énigme au sens où, sans pouvoir en indiquer le chemin, ils en appellent à la fois à une autre physique et à un autre monde. Bien sûr, les faitiches énigmatiques seraient inconcevables sans la démarche expérimentale et sans la démonstration physico-mathématique. Mais ils ne sont réductibles ni à l'une ni à l'autre, alors qu'ils empruntent à chacune un trait particulier. Comme le faitiche expérimental, et contrairement au faitiche physico-mathématique, le faitiche énigmatique pose le problème de son pouvoir face à un monde *a priori* hétérogène. Cependant, les dispositifs expérimentaux, appelés à devenir boîtes noires lorsqu'ils ont triomphé des controverses, étendent leur pouvoir en multipliant et en diversifiant ceux qui se réfèrent à eux, et se transformeront à mesure, jusqu'à incorporer finalement l'existence d'utilisateurs qui doivent pouvoir se borner à suivre le mode d'emploi d'un dispositif commercialisé. Alors qu'ils étendent leur pouvoir, les faitiches énigmatiques conservent, quant à eux, une transparence que n'opacifie aucune redéfinition pratique. Comme les faitiches physico-mathématiques, ils ne s'adressent en fait (c'est-à-dire en dehors des opérations de vulgarisation où leur pouvoir prend une allure quasi prophétique) qu'à

des utilisateurs bien définis, et ceux-ci, dès lors qu'ils s'y réfèrent, sont voués à habiter tous le même monde, un monde défini par l'énigme suscitée, par la vocation proposée. Ce ne sont pourtant pas des modèles, au sens où ce terme implique le pouvoir qu'aurait l'imagination à créer ou à repérer des rapports de ressemblance, ce sont bien plutôt des vecteurs d'obligations, conférant aux questions qu'ils permettent de formuler le pouvoir d'engager, d'autoriser ou d'interdire.

L'apparition des « faitiches énigmatiques » marque une date dans l'histoire de la physique. Henri Poincaré pouvait encore distinguer entre deux types de démarche, celle de la physique mathématique et celle de la physique expérimentale. Avec eux, c'est un nouveau type de physique qui va s'imposer : la physique théorique. Mais nous n'en sommes pas encore là, car la question doit d'abord être posée : comment l'emprise de l'« énigme » s'est-elle produite ? Quelles controverses a suscitées l'intrusion des obligations de type nouveau qui engageront la « physique théorique » ?

Il est très rare que celui ou celle qui parle de science réussisse à inventer des questions que les scientifiques eux-mêmes n'ont pas déjà posées. La question de la « légitimité » des problèmes engageant leurs collègues était posée pour Henri Poincaré, comme pour Ernst Mach ou Pierre Duhem, ces physiciens pour qui la « valeur » de la science tenait d'abord à la netteté de la distinction à laquelle elle oblige par rapport aux rêves d'un savoir rejoignant la vérité du monde. Alors que Max Planck célébrera, avec la conservation de

l'énergie, la conquête d'un savoir qui s'imposerait même aux Martiens, Poincaré s'oblige à en réduire la portée. « Il y a quelque chose qui demeure constant <sup>2</sup> », écrit-il, pour définir cette énergie qui se conserve, et sans doute Engels aurait-il accepté cette formulation. Et ce d'autant plus que Poincaré a soin d'affirmer la solidarité de l'énoncé avec la démarche expérimentale. En effet, pour lui, cette « généralisation », loin d'être prouvée par les faits, ne tient qu'à cause de sa remarquable fécondité : on peut parler de « principe » de conservation de l'énergie parce que, jusqu'ici, la conservation a été un guide fiable qui a permis de précéder l'expérience. Mais si l'exigence de bilans équilibrés cessait un jour d'être utile, cessait de mener à la prévision de phénomènes nouveaux, le physicien devrait abandonner son principe, qui n'aura pas été réfuté par l'expérience, mais que l'expérience aura néanmoins condamné.

Henri Poincaré n'a pas subi l'emprise des faitiches énigmatiques, et il n'en appelle pas non plus à une autre physique. Il se borne à « maintenir l'église (de la théorie) au milieu du village », à lutter pour que cette dernière maintienne avec les faits expérimentaux une connexion vivante. Il n'en va pas de même pour Ernst Mach et Pierre Duhem, qui, chacun à sa manière, entendent contester le rapport de regroupement du village autour de l'« église », le pouvoir que s'arrogent les théories qui, comme la mécanique, semblent

---

2. *La Science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1906, p. 158.

en passe de prétendre à une vérité allant au-delà de l'expérimentation. Ernst Mach s'en prend aux « théories » physiques – et pour ce faire il écrit de fougueuses et brillantes analyses historiques de la mécanique ou de la science de la chaleur – et il en appelle à une science qui reconnaîtrait dans ces prétendues théories une manière simplement économique, ne leur ajoutant rien, de rassembler une multitude de cas pratiques. Une telle science éliminerait activement toute référence à l'inobservable, qu'il s'agisse des atomes, de l'espace absolu ou, de manière plus générale, de tous les termes qui suscitent l'illusion que nous savons de quoi le monde est fait. Quant à Pierre Duhem, il souligne que la généralisation qui ordonne la « cohue désordonnée », la « foule innombrable » des lois expérimentales a peu de chose à voir avec la logique et donc avec la preuve. « La logique laisse une liberté presque absolue au physicien qui voudrait faire choix d'une hypothèse ; mais cette absence de tout guide et de toute règle ne saurait le gêner car, en fait, le physicien ne choisit pas l'hypothèse sur laquelle il fonde une théorie ; il ne la choisit pas plus que la fleur ne choisit le grain de pollen qui la fécondera ; la fleur se contente d'ouvrir toute grande sa corolle à la brise ou à l'insecte qui porte la poussière génératrice du fruit ; de même le physicien se borne à ouvrir sa pensée, par l'attention et la méditation, à l'idée qui doit germer en lui, sans lui<sup>3</sup>. » Et c'est, pour Duhem, cette esthétique de la création

---

3. *La Théorie physique, son objet, sa structure* (2<sup>e</sup> édition 1914), republiée chez Vrin, Paris, 1981, p. 390.

physico-mathématique qui doit être reconnue comme vectrice d'obligations. Duhem en appelle donc comme Mach à une autre physique, une physique qui ferait passer les valeurs de la création – cohérence, beauté, simplicité – avant celles du réalisme.

A la différence de Mach, qui adopte une stratégie délibérément antifaitichiste, niant que la loi puisse transcender en quoi que ce soit les faits pratiques, Duhem, et c'est là sa grandeur, accepte la morsure de l'énigme. Ce qu'il refuse est sa localisation, la mise en contraste entre l'énigme de la croissance de l'entropie, par exemple, et le savoir fiable de la mécanique. Ce qu'il refuse, en d'autres termes, est que l'énigme donne le pouvoir et le droit de formuler des questions qui auraient pour vocation de la résorber. Pour Pierre Duhem, tous les faitiches théoriques, qu'ils soient issus de la mécanique ou de la thermodynamique, sont aussi bien énigmatiques. C'est pourquoi le caractère « abstrait » du potentiel thermodynamique, définissant un état sans pour autant le décrire, et le caractère artificiel des « déplacements d'équilibre », soumettant les processus physico-chimiques à une norme rationnelle qui leur est étrangère, loin de lui inspirer une quelconque frustration, le satisfont pleinement.

Duhem en appelle donc également à un autre physicien. Ce physicien-mathématicien saurait que, pas plus que l'édifice physico-mathématique entier, aucune des propositions qui le constituent ne peut être, comme telle, confrontée à l'expérience. Face à une contradiction expérimentale

touchant certaines conséquences d'une théorie, il saurait qu'il peut choisir de modifier l'édifice ou d'en jeter à bas les colonnes. Et il saurait surtout que, quel que soit son choix, si nul ne peut lui donner tort, nul non plus ne pourra jamais lui donner raison. Jamais un tel physicien ne pourra donc se référer à la satisfaction des exigences expérimentales pour abdiquer une responsabilité que, pourtant, aucune méthode logique ne lui dit comment exercer. Il travaillera sous l'emprise d'une énigme mais saura qu'il ne lui appartient pas de la percer à jour, d'obtenir, *ou même d'espérer obtenir*, que la réalité confirme la convergence entre ses raisons et celles que met en scène la théorie.

Il y a des distinctions très intéressantes entre Poincaré, Mach et Duhem, ces témoins du moment de « recul » où, il y a un siècle, des théoriciens interrogèrent les êtres étranges qu'ils avaient fait exister. Ces distinctions se rapportent à eux en tant que véritables auteurs, négociant la signification de l'engagement auquel ces êtres les obligent. Mais ces auteurs ont un trait commun : en aucun cas ils ne peuvent être confondus avec les épistémologues conventionnalistes, positivistes ou instrumentalistes qui se réclameront d'eux par la suite. En aucun cas ils ne traitent d'une quelconque « science en général », qui pourrait être définie à partir du modèle de la physique tel qu'ils le construisent et serait alors assurée de sa rationalité<sup>4</sup>. Tous tentent d'entendre les obligations

---

4. C'est notamment la grande différence entre Pierre Duhem et Karl Popper, qui reprendra contre les positi-



suscitées par la nouvelle donne de la physique, par la création d'êtres qui semblent dotés du pouvoir d'imposer leurs propres questions, de juger les phénomènes au nom d'exigences qui transcendent le témoignage expérimental. Et, en cela, ils s'opposent tous trois à ce que l'on peut appeler le « grand positivisme » propre à l'époque, cette grande chevauchée imaginative traduisant les visions et les espoirs suscités par une double unification : l'unification de la nature physico-chimique par l'énergie, et l'unification de la nature « historique » par une évolution plus ou moins darwinienne.

Les « grands positivistes » tels Wilhelm Ostwald, Herbert Spencer, Ernest Solvay, Ernst Haeckel ont été, comme Poincaré, Mach et Duhem, non pas les victimes de l'histoire de la physique, mais les vaincus de cette histoire. Car on n'est pas victime lorsqu'on s'est fait auteur d'une thèse censée valoir pour tous les autres. Mais leurs défaites respectives sont de type différent. Le rêve que portaient les premiers n'est pas mort avec eux. Bien au contraire, il resurgit chaque fois

---

vistes le thème de l'impuissance de la logique à assurer la réfutabilité d'une théorie, à interdire une modification théorique qui annule la « contradiction expérimentale ». Popper transformera ce thème en mot d'ordre, obligeant ceux qui se veulent scientifiques à prendre l'initiative à laquelle la logique ne les contraint pas. Il passera ce faisant sous silence un « petit problème » : la contradiction, qu'on la fasse taire par « stratagème conventionnaliste » ou qu'on lui donne le pouvoir de réfuter, n'a de sens clair que dans le champ théorico-expérimental.

qu'une nouvelle notion semble promettre une conception unitaire où l'intelligibilité de la nature telle qu'elle est produite par les sciences et celle de l'évolution biologico-sociale productrice *in fine* de ces sciences semblent pouvoir se rencontrer. Que l'on pense aux séductions contemporaines de la « complexité ». En revanche, le symbole le plus éloquent de la défaite des seconds, ce qui fait que c'est à eux que je m'intéresse, est que leur œuvre est considérée désormais comme appartenant à l'épistémologie, lue par les philosophes des sciences et non par les physiciens à qui elle était adressée. Corrélativement, la « lucidité » qu'ils défendaient, chacun dans son style propre, contre l'énigme fascinante est devenue une vertu douteuse pour les physiciens, synonyme de « défaitisme », trahison, crainte pusillanime ou positiviste d'aller au-delà des phénomènes, volonté douteuse de vouloir se borner à les « sauver » de manière cohérente.

Psychologie et épistémologie n'ont pas le pouvoir d'expliquer la manière dont un scientifique déchiffre ses obligations. C'est toujours rétroactivement que s'impose, pour analyser des conflits scientifiques, le pouvoir de catégories psychologiques ou épistémologiques car ce pouvoir apparent signe le fait que le problème posé aux acteurs et par les acteurs n'intéresse désormais plus personne d'autre que l'épistémologue, le psychologue ou le philosophe. Que l'histoire des sciences « se faisant » ne soit pas, quant à elle, soumise à ces catégories n'empêche pas que tel acteur puisse leur conférer une pertinence. Mais si tel scientifique

s'inscrit lui-même, au cours d'une controverse, dans une perspective historique ou épistémologique longue, ce n'est pas à la lumière de cette perspective qu'il faut analyser sa position, c'est au contraire à sa position qu'il faut demander pourquoi cette mise en perspective a pu, pour lui, devenir argument. Ainsi, Pierre Duhem a mis en scène la longue hésitation qui marque la physique, depuis Copernic, entre « sauver » les phénomènes, c'est-à-dire les reproduire de manière mathématiquement cohérente, ou les « expliquer ». Mais c'est exactement ce qui, pour lui, se jouait dans la différence entre potentiels thermodynamique et mécanique.

Lorsque surgissent ainsi mises en perspective historique et recours aux grands thèmes de l'épistémologie ou de la psychologie de la connaissance, ils traduisent et trahissent le plus souvent une situation dont l'un des ingrédients peut être mis sous le signe d'un conflit entre obligations. C'est pourquoi leur pertinence est toujours locale et circonstancielle : il peut arriver que le même scientifique passe, sans le moindre état d'âme, d'une mise en perspective à une autre, passe, par exemple, d'un discours axé sur la lucidité, et les limites que les constructions théoriques doivent respecter, à un autre, affichant le réalisme le plus triomphant, ou *vice versa*. Ces « valeurs » générales, tout-terrain, qui semblaient expliquer ou justifier sa position, ne l'obligeaient en rien, elles généralisaient seulement ce à quoi l'obligeait ou l'engageait à ce moment l'être théorique qu'il était en train de construire.

La crise « épistémologique » de la physique d'il y a un siècle ne traduit donc pas l'époque révolue où « les physiciens étaient encore philosophes », elle appartient à l'histoire singulière de la physique qui en a créé les termes. Que se serait-il passé sans cet étrange rejeton hybride de la théorie du calorique et de la mécanique rationnelle, le cycle de Carnot ? Sans doute les « deux principes de la thermodynamique » n'auraient-ils pas vu le jour, et ils n'auraient pas alors suscité, par leur parallélisme affiché, l'ambition de conférer à la « dégradation » de l'énergie une portée comparable à celle de sa transformation, ni non plus le refus de cette ambition.

Mais pourquoi et comment l'affrontement entre physiciens a-t-il revêtu la signification dont nous avons héritée ? Car les enjeux qui divisaient physiciens « réalistes » et « rationalistes » ont été plus ou moins oubliés alors que la morale la plus courante de l'histoire, celle à laquelle entend résister l'opération d'anamnèse que je tente, nous mène maintenant à « attendre » la solution de l'énigme, le triomphe de la Reine des Cieux, triomphe d'une conception du monde unifiée à partir de laquelle le second principe de thermodynamique deviendra une simple question de probabilité.

Certes, ce que je viens de raconter est un ingrédient nécessaire de cette issue annoncée car elle n'aurait pas eu de sens si d'abord l'irréversibilité n'était pas devenue la propriété maîtresse, capturant la multiplicité des processus physico-chimiques et des problèmes qu'ils sont susceptibles de poser. Mais comment l'« arène » qu'a

constituée le cycle de Carnot et les protagonistes qui s'y sont définis ont-ils basculé dans la catégorie de ce qu'on appelle la « physique classique », traversée par de simples conflits épistémologiques entre « positivistes » et « réalistes » ? Comment la page a-t-elle été tournée de telle sorte que l'ensemble de leurs questions apparaît avant tout déterminé par ce qu'elles ignoraient : les grands enjeux de la physique du  $xx^e$  siècle, les révolutions qui auraient *enfin* confronté l'« homme » à la question de ce qu'il peut connaître ?

C'est lorsque l'on arrive à des questions de ce genre que l'anamnèse a fait son travail. Elle a recréé un problème là où dominait l'impression d'un progrès, elle a remélangé ce qui s'était dissocié en analyse épistémologique et en production proprement physique, et elle est arrivée à rendre intéressante, parce que surprenante, l'exigence qui a été reprise par des physiciens tout au long du  $xx^e$  siècle : nous exigeons que soit reconnue et respectée notre foi dans la valeur réaliste de la physique, et nous ne nous satisferons de nos théories que si elles confirment cette foi, si elles ne nous mènent pas à trahir la vocation du physicien.

Ce qui est intéressant et surprenant est que la scène sur laquelle j'avais axé la question de cette vocation dans *La Guerre des sciences*, celle qui opposa Max Planck et Ernst Mach, a d'ores et déjà perdu son caractère de modèle, à la répétition duquel il faudrait échapper. Planck comme Mach sont maintenant situés dans un moment précis de l'histoire. La « foi » de l'un et la critique logico-historique de l'autre ne sont plus de « grandes

alternatives» qui transcendent l'histoire, mais l'expression polémique d'une histoire qui, en 1908, est en passe de s'achever sur un mode singulier, sur le mode d'une mobilisation générale autour d'une alternative par rapport à laquelle chacun doit prendre parti. De même l'opposition proposée quelques années plus tard par Einstein, opposition entre le désir d'échapper aux vicissitudes du monde qui mène le « vrai » physicien au temple de la science, et les préoccupations utilitaires qui y conduisent ceux qui en seront seulement des parasites<sup>5</sup>, superpose à l'histoire achevée une morale qui semble parcourir les âges mais traduit avant tout la clôture et l'oubli de la crise. Car c'est bel et bien une crise de la réalité physique qui vient de « passer », au sens où sa « moralisation » la renvoie à un passé dépassé. Chacun à leur manière, les vaincus de cette histoire, Ostwald mais aussi Duhem et Mach, étaient des « révolutionnaires », luttant, un peu comme les futurs créateurs de la mécanique quantique, Bohr, Heisenberg ou Pauli, pour une nouvelle conception de l'histoire de la physique, appelée à se dégager de la particularité de ses premiers objets. Ils ne s'en prenaient pas au « réalisme » par conviction utilitaire. Ils affirmaient que c'est la trompeuse simplicité de ses premiers objets, mécaniques, qui a favorisé la croyance naïve du

---

5. « Les principes de la recherche scientifique », in *Comment je vois le monde*, Flammarion, Paris, 1958, p. 139-140.

physicien «réaliste» en une réalité généralement capable de dicter ses raisons. Et ils voyaient la thermodynamique comme une généralisation de la dynamique obligeant celle-ci à la lucidité dont elle avait jusque-là pu faire l'économie, obligeant les physiciens à dire adieu au monde transparent et rationnel où règne la Reine des Cieux.

L'histoire rétroactive des sciences est le plus souvent injuste envers les vaincus, mais la manière dont elle est injuste est hautement significative. En l'occurrence, le fait qu'une morale «anti-utilitaire» ait pu être tirée de l'épisode, dès lors qu'il était clos, n'est pas simplement un «coup de pied de l'âne», du vainqueur au vaincu. Il traduit une question qui, selon des modalités différentes en fonction des pays, a bel et bien mis sous tension la crise de la physique, et l'a inscrite dans un ensemble d'enjeux politiques et culturels.

L'histoire de Henri Poincaré est significative à ce sujet. Poincaré avait écrit *La Science et l'Hypothèse* en 1902 dans la plus grande sérénité, mais à sa grande surprise, ses thèses furent mobilisées dans la controverse sur la «banqueroute de la science» qui faisait rage en France depuis 1895. Contre l'alliance «troisième République» entre les valeurs de la science, de la laïcité et de la République, qu'illustre à merveille le personnage de Marcellin Berthelot, les catholiques plaidaient que, en tant que source de valeurs morales, la science avait fait faillite. Et comment ne l'aurait-elle pas fait, parent-ils renchérir en 1902, puisque, comme l'a bien montré Poincaré, elle n'est finalement qu'un ensemble de «recettes

commodes », visant l'action et la prédiction et non la connaissance véridique. Les premières lignes du livre suivant de Poincaré, *La Valeur de la science* (1905), traduisent l'indignation de l'auteur : « La recherche de la vérité doit être le but de notre activité ; c'est la seule fin qui soit digne d'elle », et l'ensemble du livre constitue une protestation contre le détournement dont il a été victime. Mais le fait est là : les débats entre physiciens sur le statut des théories physiques intéressent d'autres protagonistes, et ceux-ci n'ont que faire des subtilités. Ils mettent le physicien au pied du mur : croit-il ou non que les lois physiques « disent vrai » ?

Si le paisible Poincaré a pu être ainsi pris à témoin, comment le polémique Duhem aurait-il pu éviter la mobilisation ? Duhem n'aura d'ailleurs pas besoin de prendre position. Ses thèses ont été reconnues comme dangereuses par les « laïques », et il va faire l'objet d'une attaque sanglante de la part du philosophe Abel Rey<sup>6</sup>, qui l'accuse de

---

6. Abel REY, *La Théorie de la physique chez les physiciens contemporains* (1907), 2<sup>e</sup> édition augmentée, Alcan, Paris, 1923, p. 211-212. Abel Rey fut également l'auteur de « La philosophie scientifique de M. Duhem », in *Revue de métaphysique et de morale*, 12<sup>e</sup> année, juillet 1904, p. 699, dans lequel il fait le lien entre le « scepticisme scientifique » de Duhem et sa foi catholique. La réponse de Duhem, « Physique de croyant » et son commentaire de *La Théorie de la physique chez les physiciens contemporains*, « La valeur de la théorie physique », figurent en appendice de la réédition de *La Théorie physique, son objet, sa structure*, *op. cit.*



saper la confiance du peuple silencieux et laborieux des physiciens au travail. Dans la mesure où le mécanisme suppose une réalité connaissable et permet d'affirmer que la «réalité empirique» autorise directement la théorie, elle inspire confiance et foi, et le physicien au travail est donc «spontanément mécaniste». Le scepticisme et la subtilité mathématicienne d'un Duhem ne traduisent-ils pas la volonté pernicieuse de détruire cette confiance non réflexive qui fait la force des physiciens ?

Pour Abel Rey, le mécanisme n'était qu'un *postulat pratique*, privilégiant les modèles qui mettent en scène les corps en mouvement, et non une vérité au sens philosophique. C'est pourquoi Lénine, dans *Matérialisme et empiriocriticisme*, le traite de «confusionniste», une attitude inadmissible pour ce qui concerne la véritable croisade que lui-même vient de lancer contre les «machistes» Adler et Bogdanov : l'avenir du mouvement révolutionnaire semble en jeu avec les valeurs de la connaissance.

Si les positions des physiciens à propos de leurs théories ont été prises à témoin dans des querelles où étaient engagées les valeurs de la cité et de l'histoire, la question de leur liberté d'action, de leur autonomie et de leurs moyens, c'est-à-dire de leurs conditions de travail, a également mené à une confrontation entre valeurs de la connaissance et valeurs «de la cité». En cette seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, les exigences que les scientifiques peuvent faire valoir à l'égard de l'État (financement de la recherche) mais aussi

les exigences que l'État et l'industrie peuvent faire valoir à l'égard de la science (privilegier les questions d'intérêt économique) sont devenues matière à stratégies, offensives et défensives. Dès 1863, le chimiste allemand Liebig, sous le prétexte d'un livre à propos de lord Bacon, se livrait à une attaque virulente contre la science anglaise dominée par des valeurs utilitaires, et à un plaidoyer pour l'autonomie d'une science préoccupée seulement de vérité – et qui serait au demeurant d'autant plus utile à la société qu'on ne lui imposerait pas de contraintes à courte vue<sup>7</sup>. A la même époque, les scientifiques français sont fascinés par la symbiose entre science, État et industrie qui leur semble caractériser l'Allemagne, mais cette symbiose les inquiète aussi : la science française, toute pauvre qu'elle soit, ne bénéficie-t-elle pas d'une inventivité à laquelle les Allemands, asservis à des intérêts utilitaires, ont dû, quant à eux, renoncer<sup>8</sup> ? Bref, naît ici ce qui deviendra une préoccupation constante au XX<sup>e</sup> siècle : la défense de l'autonomie de la science face aux intérêts économiques, industriels et étatiques. Le rôle joué dans cette défense, depuis Planck et Einstein, par le « type psycho-social » du physicien inspiré, fécond si, et seulement si, il est libre de pour-

---

7. J. LIEBIG, *Lord Bacon*, Baillière et Fils, Paris, 1894.

8. Voir H. W. PAUL, *The Sorcerer's Apprentice. The French Scientist's Image of German Science 1840-1919*, University of Florida Press, Gainesville, 1972, et aussi l'étonnant *La Science allemande*, de Pierre DUHEM (Hermann, Paris. 1915)

suivre sa vocation, est bien connu, et son message est toujours le même : la science désintéressée est une « poule aux œufs d'or » pour la cité, et celle-ci doit donc éviter de lui demander des comptes qui la tueraient. Cette figure un peu pauvre d'une liberté académique qui abandonne la recherche « appliquée » au triste destin d'avoir à être, quant à elle et par contraste, soumise aux exigences socio-économiques, marque, aussi bien que le physicien inspiré, un moment où les valeurs « de progrès » désignant respectivement la cité et les sciences ont cessé de coïncider. Les « comptes à rendre » sont désormais une menace pour la « vocation ». Quels que soient les tours et les détours de l'histoire, il ne faudra pas oublier cette donnée : le triomphe des lois et du démon de Maxwell pouvait également signifier pour la physique la fin de toute compromission avec des « valeurs utilitaires » ; aller « au-delà des phénomènes » pouvait également signifier pour les physiciens « échapper à la menace » d'être assimilés à de simples instruments du progrès technico-économique.

Il y a donc à l'œuvre, en cette fin du XIX<sup>e</sup> siècle, une série de « causalités lourdes » qui concourent à favoriser la constitution de ce que l'on peut appeler un *milieu critique*, le terme « critique » étant entendu au seul sens intéressant qui puisse rapprocher les crises des sociétés humaines des « états critiques » décrits par la physique : la disparition des distinctions d'échelle, la mise en résonance multiple de dimensions normalement séparées. Et une question fait effectivement

converger les séries et entrer en résonance les dimensions, non pas au sens où elle déterminerait la solution des problèmes posés mais où elle fait plutôt office de parade à ces problèmes. Alors que, dans une large mesure, les problèmes sont partagés par beaucoup d'autres sciences, et notamment par la chimie, seuls les physiciens sont en position de transformer en enjeu non pas le thème générique de la science désintéressée, mais celui, spécifiant, de la physique inspirée, seule habilitée à déchiffrer l'énigme de la réalité.

Dans *La Guerre des sciences*, j'ai avancé que la manière dont une science se présente, dont elle définit ses liens avec les autres pratiques et avec la réalité fait partie de l'identité de cette science. Le fait que les physiciens aient cherché une parade, «paradé», sur un mode qui leur permet de faire cavalier seul constitue une mutation d'identité. Et cette mutation raréfie le rôle de porte-parole qui a été attribué à la science : c'est la physique qui, sur des modes distincts, a été prise à témoin et à partie, c'est son rapport à la réalité et à la vérité qui a été pris pour cible comme si la manière dont elle peut être présentée valait *a fortiori* pour toutes les autres sciences. Par ailleurs, le thème de la « vocation du physicien », par la brutalité avec laquelle il rompt les liens avec les autres pratiques dites rationnelles, traduit bien l'incapacité de la raison à faire face aux comptes polémiques qui lui sont demandés. L'heure n'est plus aux prudences subtiles de Poincaré, à la lucidité ascétique de Duhem. L'heure est aux mots d'ordre et à la mobilisation.

Cependant, la mise en contexte que je viens d'opérer peut certes contribuer à éclairer la virulence de l'opération de mobilisation par où s'est refermée, à la manière d'une parenthèse, l'hypothèse d'une physique « rationnelle », cultivant les vertus de la lucidité la plus ascétique. Mais elle ne permet pas de comprendre *comment* cette parenthèse s'est refermée. Elle permet de prévoir un lien entre la manière dont le physicien se présente et la manière dont va se forger l'identité de sa science, ce qu'elle va privilégier, ce qu'elle va juger secondaire. Mais elle ne permet pas de déduire ce que sera ce lien. Ici encore, il convient de ne pas aller trop vite afin de ne pas faire de la « vocation du physicien » une simple image que l'on aura tôt fait de dire « idéologique ». Les physiciens auraient raison de protester que *quelque chose est arrivé qui a changé la donne*, qui explique par exemple pourquoi Planck, ancien défenseur fervent de la distinction entre états d'équilibre dynamique et thermodynamique, est devenu celui d'une vision du monde unifiée. Quelque chose est arrivé qui, à nouveau, singularise l'histoire de la physique et peut contribuer à expliquer pourquoi, pour tout physicien d'aujourd'hui, l'histoire de la physique ne pouvait, en tout état de cause, donner raison à ceux qui ont été vaincus. Par qui Duhem, Mach et Ostwald ont-ils été vaincus ? Par les atomes, répondra tout physicien.

## Percolation

Les atomes ! La nature en personne, sous la guise de la plus ancienne des spéculations avec laquelle la physique moderne se reconnaisse quelque parenté, aurait donc fait pencher la balance. Et le plus curieux est que cette réponse, vraie en première approximation, lorsque s'énonce l'histoire en termes de progrès, *reste vraie* dans les approximations suivantes. A ceci près que se pose alors la question de savoir quels rapports les atomes peuvent bien avoir avec le triomphe de la Reine des Cieux. Car, sous la guise d'un acteur ancien, déconsidéré, assimilé par les rationalistes comme Ernst Mach au représentant mystificateur de toutes les croyances en un monde existant « en soi », c'est bien un *nouveau* protagoniste qui apparaît, associé à de nouvelles pratiques qu'il fait et qui le font exister. Et rien n'est moins évident que la manière dont se sont construits les rapports entre ces nouvelles pratiques, ces nouveaux acteurs et l'histoire qui précède.

Quelque chose « devait » arriver à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, et ce indépendamment des « causalités lourdes », culturelles, politiques, économiques, que je viens d'évoquer. Car la physique expérimentale, qui venait de créer les moyens d'accéder à des acteurs inobservables au-delà des phénomènes, les ions, les électrons, les noyaux, « devait », d'une manière ou d'une autre, transformer l'identité de la physique. D'une manière ou d'une autre : ce point est important. Pour les physiciens de la nouvelle génération, Paul Langevin, Jean Perrin ou Albert Einstein, c'est l'ensemble des phénomènes réguliers, « macroscopiques », qui étaient le bien commun de la mécanique et de la thermodynamique, qui font partie d'un passé dépassé. Le triomphe de la mécanique, la Reine des Cieux de Maxwell, était donc loin d'être assuré par les « atomes ». Pourquoi la page qui se tourne n'a-t-elle pas alors emporté avec elle Reine des Cieux et démon, héritiers d'Hamilton et de Maxwell comme elle a balayé les descendants de Carnot et de Clausius ?

Que l'on n'attende pas ici de réponse qui, par un coup de baguette magique, résoudrait le problème et ferait disparaître la perplexité. Nous avons affaire à une véritable histoire, et peut-être le modèle de « percolation » proposé par Michel Serres est-il celui qui conviendra le mieux à ce qui suit. Pas de grande raison, pas de cause ayant en elle-même le pouvoir de rassembler et de conduire, pas de berger rassemblant des causalités multiples car celles-ci, en elles-mêmes, ne nous mèneront jamais très loin. Mais des processus par

lesquels des connexions deviennent localement plus denses jusqu'à ce que, un moment donné, un seuil soit franchi et que « cela coule » : « En fait, comme l'Amour ou le Yukon, l'histoire filtre, laisse, retient, revient, oublie, paresse, gèle ou paraît dormir parmi de multiples entrelacs, et soudain, sans que nous ayons pu le prédire, entraîne avec soi un cours ou un fil droit, irrésistible, presque permanent, comme immortel<sup>1</sup>. » L'histoire semble alors « couler de source », à travers la mécanique ondulatoire que Louis de Broglie met sous le signe d'Hamilton, puis la seconde mécanique quantique qui confère à un formalisme hamiltonien généralisé le pouvoir de représenter les états stationnaires de l'atome.

Le modèle de la percolation est riche en ce qu'il reconnaît les « grandes causalités » (la gravitation pour le café ou le fleuve) mais ne leur permet pas de prétendre faire l'économie du récit, ou de le transformer en conte moral. Alors que l'histoire coule, d'autres possibilités d'histoire « s'assèchent », incapables de résister au grand récit qui prend forme, et ce sont toutes ces histoires absentes, toutes les questions qui ne furent pas posées ou qui furent laissées sans réponse, qui tracent le véritable espace de l'événement de percolation. En l'occurrence, si l'on peut parler de causalité lourde tant du point de vue « contexte socio-culturel » que du point de vue « physique expérimentale », c'est bien au sens, et seulement

---

1. *Les Origines de la géométrie*, Flammarion, Paris, 1993, p. 43.



au sens d'« il fallait que quelque chose passe, ou se passe ». Mais, on le verra, la vérité qui va s'imposer comme permanente, presque immortelle, dès lors qu'aura été stabilisée la vocation du physicien, celle qu'illustre et que célèbre le triomphe de la Reine des Cieux sur la thermodynamique, n'aura pas, à l'issue de la percolation, le pouvoir de résoudre les questions posées jusqu'ici. Celles-ci auront été « asséchées ». Mais ces questions resurgiront avec un tour nouveau qui va fasciner de nouvelles générations de physiciens. Le chat de Schrödinger meurt-il dans sa boîte close, alors que nul ne l'observe ?

Avant de poursuivre cette histoire en aval<sup>2</sup>, je veux donc suivre la manière dont, autour d'un humble filet, s'est fédéré le grand cours de l'histoire. Car elle était ancienne, et assez peu prestigieuse, la thèse selon laquelle la chaleur pourrait n'être rien d'autre qu'une forme de mouvement invisible des constituants de la matière. Associée à Bacon, Boyle, Hooke, Leibniz, puis à Rumford et Davy, elle ne produisit pas de pratique de mise en mesure, contrairement à la théorie calorique, et les spécialistes du calorique purent en faire l'exemple type de spéculation stérile. Mais elle restait disponible, et lorsque la conservation de l'énergie tua le calorique, James Joule, von Helmholtz et d'autres l'invoquèrent immédiatement comme alternative prometteuse à la théorie de la chaleur-substance. Cependant, c'est Clausius, encore lui, qui, dans son article « Sur le genre de

---

2. Voir *Mécanique quantique : la fin du rêve ?*

mouvement que nous appelons chaleur » (1857), a créé l'innovation. Entrent ici à nouveau en scène les « collisions » quelque peu oubliées depuis que la mécanique rationnelle les a asservies à la conservation dynamique. Il ne s'agit plus cependant de « la » collision, posant la question de la perte éventuelle de mouvement. Les collisions sont élastiques, et donc conservatives, mais elles se présentent en foule. Et c'est cette foule qui doit expliquer « ce qu'est » un état d'équilibre gazeux, *et comment cet équilibre est (irréversiblement) atteint*. La « théorie cinétique », comme on l'appelle depuis, constitue bel et bien un événement dans l'histoire de la physique car elle est porteuse d'une redistribution des rapports entre « état » et « explication » : l'état (d'équilibre thermodynamique) ne s'explique plus de lui-même, il est issu d'une réalité innombrable et tumultueuse, qui l'explique mais pourrait bien, en même temps, permettre la mise en théorie de cette fameuse évolution vers l'équilibre à propos de laquelle la thermodynamique est muette.

On parla d'abord de « modèle cinétique ». L'analyse de Clausius (et de Krönig qui publie juste avant lui) concernait d'abord et avant tout les gaz, et elle se bornait, représentation délibérément partielle, à attribuer aux molécules un mouvement de translation entrecoupé de collisions élastiques. Clausius reconnaissait l'existence probable d'autres mouvements affectant les molécules, mais le mouvement de translation suffisait pour interpréter l'expansion du gaz, et l'ensemble des relations entre pression, volume et tempéra-

ture ( $pV = nRT$ ) qui relevaient autrefois de la physique du calorique. Ces relations, rappelons-le, caractérisent des états d'équilibre. Elles ont un caractère « purement expérimental » qui leur a permis de survivre depuis les premières mesures de Boyle, c'est-à-dire de se préciser dans le cadre de la théorie du calorique et de résister à la découverte de la conservation de l'énergie.

Prenons, propose Clausius, le phénomène de l'évaporation dans une enceinte fermée, caractérisé par un équilibre déterminé entre deux « phases » : une partie du liquide reste liquide, une partie passe en phase gazeuse. Passer en phase gazeuse signifie, en termes moléculaires, que des molécules sont « arrachées » à l'attraction mutuelle forte entre les molécules liquides, et s'échappent avec un mouvement « libre » qui ne sera plus affecté que par des collisions avec d'autres molécules du gaz. Mais certaines molécules voyageant dans l'espace peuvent, de leur côté, être piégées par l'attraction des molécules du liquide. L'équilibre s'établit lorsque, en moyenne, autant de molécules se font piéger par unité de temps que de molécules se font expulser.

L'essentiel de la nouveauté cinétique est là, dès Clausius, avec la création d'une *nouvelle mise en équivalence* qui traduit, cette fois, une compensation *statistique*. Il faut souligner la différence entre cette mise en équivalence et celle de la dynamique et de la thermodynamique. Ces deux dernières créent une égalité identificatrice, indépendamment de laquelle les termes qu'elle unit sont dénués de signification physique (pourquoi

$mv^2$ , pourquoi  $Q/T$ ?). En revanche, la compensation statistique implique une activité élémentaire qu'elle ne définit pas. Les collisions ne cessent de se produire dans un gaz et elles ne sont pas, en elles-mêmes, différentes selon que le gaz est, ou non, à l'équilibre. L'état d'équilibre n'est plus qu'une simple résultante. Le véritable sujet de la description est une foule désordonnée. Le mouvement brownien d'une particule de poussière, dont la direction varie follement d'instant en instant alors que la particule est en suspension dans un liquide apparemment en repos, sera élu par les partisans de l'hypothèse cinétique comme le témoignage visible de ce nouveau rapport entre apparence et réalité. Le liquide semble au repos mais la particule brownienne, soumise à des chocs innombrables, *montre* l'agitation incessante des molécules qui le constituent. Ce que la nature nous impose de concevoir est donc cette agitation incessante, mais nous ne sommes pas obligés de suivre le mouvement de chaque particule individuelle : ce qui importe est l'effet moyen, et donc la *fréquence* relative, des différents types d'événements qui contribuent à ce que nous observons.

Le modèle cinétique de Clausius affirme donc sa dépendance par rapport à la science du mouvement, mais garantit également la non-pertinence des mises en équivalence dynamiques : forces, accélération, énergie potentielle, ces grandeurs qui permettent d'identifier l'état d'un « système » dynamique ne sont pas niées mais leur rôle est défini comme négligeable. La relation de compensation statistique ne prend en compte que les évé-

nements discrets, qu'elle peut définir comme aléatoires puisque seule la résultante moyenne de leurs effets l'intéresse. Corrélativement, les relations d'entre-détermination entre variables qui caractérisent l'état d'équilibre thermodynamique deviennent intelligibles. Comment une variation de température se traduit-elle par un « déplacement » de l'équilibre entre phases liquide et gazeuse ? Si la température traduit la vitesse moyenne des molécules, ou l'énergie moyenne caractérisant leur mouvement, on peut le comprendre. L'expulsion d'une molécule hors du liquide est un événement énergétiquement « coûteux » puisque la molécule emmène avec elle, sous forme de mouvement, une partie de l'énergie liée aux interactions entre molécules du liquide, et la probabilité de cet événement dépend du degré d'agitation des molécules du liquide, c'est-à-dire de sa température. Quant à la probabilité du piégeage d'une molécule gazeuse, qui restitue son énergie au liquide, elle dépend, elle, du nombre de molécules gazeuses. Plus la température est élevée, plus nombreuses sont les molécules à pouvoir s'échapper, et plus elles sont nombreuses, plus augmente la fréquence de leur piégeage. L'augmentation de température intensifie donc à la fois les deux processus rivaux, et c'est cette relation complexe que traduisent les lois thermodynamiques du déplacement d'équilibre.

Le plus célèbre des convertis à l'hypothèse cinétique fut sans conteste James Clerk Maxwell, et l'histoire de sa conversion traduit bien la fécondité singulière de la symbiose que va permettre d'instaurer cette hypothèse entre l'exploration de

relations expérimentales, c'est-à-dire macroscopiques, nouvelles et la construction de propriétés précises attribuables aux particules.

Dès 1860, Maxwell lève l'hypothèse approximative adoptée par Clausius, qui attribuait une même vitesse moyenne à toutes les molécules d'un gaz, et centre sa description autour de la notion de *distribution statistique*, caractérisant un état instantané. Chaque état est alors défini par une répartition déterminée des vitesses parmi les molécules du gaz, et le gaz à l'équilibre thermique correspond à la situation où les collisions incessantes entre molécules, qui ne cessent de modifier leurs vitesses, ne modifient plus cette distribution des vitesses. En d'autres termes, l'activité microscopique, au lieu de se voir attribuer une vitesse moyenne déductible d'observables macroscopiques telles que la température, est mise en scène en tant que productrice de cette moyenne, et la description de l'équilibre met effectivement à l'œuvre la compensation statistique : il se produit en chaque instant à peu près autant de collisions faisant « disparaître » une molécule de vitesse donnée que de collisions faisant « apparaître » une molécule de cette vitesse, et cela pour toutes les vitesses. Maxwell démontra que, selon son modèle, la viscosité d'un fluide gazeux devrait varier avec la température mais non avec la densité du gaz. C'est la vérification expérimentale, en 1866, de cette conclusion, qui l'avait d'abord laissé sceptique, qui transformera Maxwell en adepte de ce qu'il appelle significativement la « théorie dynamique des gaz ».

On se souviendra du ricanement de Maxwell face aux Icare allemands, ces von Helmholtz, Clausius et Boltzmann, qui cherchent à identifier l'évolution irréversible vers l'extremum d'un potentiel thermodynamique à une loi dynamique hamiltonienne<sup>3</sup>. Les « tracasseries statistiques » qui permettent d'articuler description macroscopique et interactions moléculaires, il les connaît bien, et il apprécie leur valeur, mais elles sont seulement bonnes pour interpréter ces formes nuageuses, ces milliards de milliards de molécules dont il faut renoncer à suivre le mouvement dynamique. Là où la Reine des Cieux affirme explicitement son règne, là où la dynamique hamiltonienne donne la théorie complète, les raisonnements statistiques doivent disparaître, et avec eux la croissance irréversible de l'entropie. Pour Maxwell, dès 1870, la cinétique n'est rien d'autre qu'une *théorie dynamique incomplète*.

La théorie cinétique n'est-elle donc alors que l'humble servante de la dynamique, approximation valide appelant la figure d'un démon qui, lui, serait capable de suivre les trajectoires dynamiques individuelles ? C'est la conclusion à laquelle nous avons été habitués, et c'est elle en effet qu'annonce

---

3. La querelle de priorité à laquelle Maxwell faisait allusion dans la citation du début de chapitre opposa, en 1871, le jeune Boltzmann, qui a publié dès 1866 une « preuve » de ce que le second principe n'est rien d'autre qu'un théorème de mécanique, à Clausius, qui venait de publier une démonstration du même type.

le démon de Maxwell. Lisons la manière dont, selon Thomson, ce démon, parce qu'il sait prélever, conserver et mettre au travail l'énergie des molécules en mouvement, pourrait forcer une réaction chimique à se produire. Il suffit « qu'il prélève une petite réserve d'énergie en résistant à l'approche de deux molécules constituantes, les laissant, si l'on peut dire, presser contre ses deux mains, et qu'il conserve cette énergie à la manière d'un ressort comprimé ; qu'il appuie alors les deux mains entre l'oxygène et le double hydrogène constituant une molécule composée de vapeur d'eau, et qu'il les sépare<sup>4</sup> ». Et le tour est joué, la réaction a eu lieu et a manifesté ce faisant sa soumission à l'intelligibilité dynamique. Mais, et c'est ce que je veux maintenant souligner, Thomson ne cherche pas en chimie ou ailleurs les moyens de prouver que cette soumission est effective. Il la tient pour acquise. Ce qu'il entend démontrer est que *le second principe de thermodynamique, la loi macroscopique de « dégradation irréversible de l'énergie », ne vaut pas pour le démon*. Il peut provoquer des réactions chimiques à loisir et, si telle est sa volonté, écarter un système de l'état d'équilibre chimique.

Maxwell et Thomson « tiennent » donc déjà l'interprétation statistique de l'entropie, mais ils

---

4. William THOMSON, « Kinetic Theory of the Dissipation of Energy », *Nature*, 9, 1874, p. 442, cité dans E. DAUB, « Maxwell's Demon », in *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 1, n° 3, 1970, p. 213-227, cit. p. 216.



ne nous permettent pas de comprendre le processus de percolation lui-même, le fait que cette interprétation ait été acceptée en tant que réglant *dans sa généralité* la question des rapports entre le monde «dissipatif» des processus physico-chimiques, pour lesquels la théorie cinétique est pertinente, et le monde dynamique, par rapport auquel la cinétique se présente en tant que «théorie dynamique incomplète». En effet, une question n'est pas posée, qui pourtant devrait s'imposer. Si nous oublions le quart d'un instant la cinétique des gaz, ou des changements de phase, pour laquelle des interactions dynamiques (attraction et répulsion) semblent pouvoir conférer leur signification aux événements cinétiques, c'est toute la foule disparate des événements cinétiques requis pour comprendre la foule tout aussi disparate des processus «énergétiques» qui se présente.

La réaction chimique fut très vite interprétée (au grand dam des «vrais» thermodynamiciens comme Pierre Duhem<sup>5</sup>) en termes de «collisions réactives» entre molécules, collisions qui ne se soldent pas par un simple changement de vitesse mais par une transformation chimique des molécules. L'état d'équilibre chimique correspondrait alors à une compensation statistique entre les effets de différents types de collision réactive, les unes créant un composé, les autres le détruisant en restituant les réactifs originels. Mais qu'est-ce

---

5. Voir P. DUHEM, *Le Mixte et la Combinaison chimique* (1902), républié au *Corpus des œuvres de philosophie en langue française*, Fayard, Paris, 1985.

qu'une « collision réactive » en termes dynamiques ? Il n'y a pas, bien sûr, l'ombre du début d'une réponse à ce sujet. Au début du  $xx^e$  siècle, c'est la désintégration radioactive qui sera à son tour soumise au calcul cinétique par Ernest Rutherford. Le rayonnement radioactif d'équilibre est mis en relation avec les temps de vie respectifs de chacun des types de noyau dans la chaîne des désintégrations successives du produit radioactif de départ. Mais qu'est-ce qu'une désintégration radioactive caractérisée par un temps de vie, en termes dynamiques ? Pas de réponse. Et c'est encore à la cinétique qu'Einstein demande en 1916 le secret des processus d'absorption et d'émission de lumière par l'atome de Bohr : deux types d'événements sont nécessaires, montre-t-il, ceux qui sont induits par le champ électromagnétique et ceux, « spontanés », qui sont caractérisés, comme la décomposition radioactive, par un temps de vie. Pourquoi le démon de Maxwell a-t-il survécu alors même qu'aucune théorie n'indique comment il devrait s'y prendre pour « défaire » un processus caractérisé par un temps de vie <sup>6</sup> ?

---

6. La possibilité de caractériser une population de particules instables par un temps de vie, c'est-à-dire par une loi exponentielle de décomposition (ou de désexcitation pour les atomes excités), signifie que chaque membre de cette population possède *a priori*, et quel que soit l'environnement physique, la même probabilité de se décomposer en chaque instant. Un événement caractérisé par un temps de vie ne peut, par définition, être influencé par des variables telles que celles que peut manipuler le démon de Maxwell.

Une autre histoire de la physique aurait été possible, que semblait d'ailleurs annoncer *Les Atomes* de Perrin, une histoire qui se serait centrée autour de l'événement, et y aurait cherché le secret de la diversité des transformations physico-chimiques, réunies désormais par le seul fait qu'elles conservent toutes l'énergie. Et peut-être, dans cette histoire, la découverte de l'existence d'événements spontanés aurait-elle été racontée comme le moment où la physique dut, pour de bon, dire adieu à l'idéal d'intelligibilité associé à la Reine des Cieux. En effet, la notion même d'événement spontané semble bien briser l'égalité réversible entre cause et effet : jamais le noyau désintégré ne se reconstituera, jamais un atome de Bohr, qui s'est « désexcité » de manière spontanée, ne se réexcitera spontanément, sans champ électromagnétique. Et dans ce cas, certes, les thermodynamiciens à la Duhem auraient été vaincus, mais ils l'auraient été par les atomes cinétiques et non par le démon de Maxwell. Et jamais n'aurait résonné cet énoncé étrange, où la physique semble prétendre au pouvoir de nier ce à quoi elle a affaire, cet énoncé que, il faut le souligner, nous n'avons pas encore, à ce stade du récit, les moyens de comprendre : du point de vue « fondamental », l'asymétrie temporelle des processus n'existe pas, elle n'est qu'une simple question de probabilité.

Décrire un processus de percolation, c'est donc poser le problème des raisons que s'est données l'histoire qui a « coulé ». L'interprétation cinétique de Clausius et de Maxwell semble donner « raison » au démon, mais cette raison ne va pas très

loin. Un possible plausible ne s'est pas actualisé, qui aurait affirmé la diversité des événements. La cinétique n'a pas été, historiquement, définie comme science des événements mais, comme le proposa Maxwell, elle est devenue science subordonnée, « théorie dynamique incomplète ». Les événements n'ont donc pas été reconnus<sup>7</sup>, comme posant un problème nouveau, exigeant une intelligibilité nouvelle et suscitant de nouvelles obligations de la part des physiciens. Ils l'ont été sur le modèle de la collision élastique : celle-ci relève en droit de la théorie dynamique alors qu'elle n'est utilisée par la théorie cinétique que sous forme d'une « boîte noire », transformant les molécules qui y entrent avec une vitesse donnée en des molécules sortantes, caractérisées par d'autres vitesses. De même, tout événement cinétique doit pouvoir être conçu à la manière d'une boîte noire dont la théorie dynamique devrait bien un jour percer le secret.

---

7. Je laisse de côté pour le moment la question de l'interprétation quantique de l'événement. L'ironie de l'histoire est que, au moment où l'événement quantique posera problème, la génération de ceux qui s'intéressaient à l'irréversibilité thermodynamique aura disparu, la croissance de l'entropie étant considérée comme un problème réglé. Dans « Thermodynamique et cinétique : les deux sources non classiques de la théorie de la relativité restreinte » (*in Nouvelles Tendances en histoire et philosophie des sciences*, Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique, Bruxelles, 1993), Yves PIERSEAUX montre la singularité du jeune Einstein à cet égard. En effet, les publications d'Einstein portaient en 1905 tout à la fois sur le mouvement brownien, sur les

Nous arrivons maintenant au terme de l'anamnèse, c'est-à-dire à un épisode qui appartient à l'histoire des sciences des manuels : la construction du fameux théorème  $\neq$  de Boltzmann, et nous savons que les suites de cette construction ratifieront le verdict de Maxwell sans permettre de « justifier » la percolation que traduit cette ratification. Car le théorème de Boltzmann accepte l'identification entre événement cinétique et événement dynamique, et ne contribuera donc en rien à éclairer la réduction de l'un à l'autre. Mais c'est par lui qu'est passée l'histoire, et c'est cette histoire qui a fait exister le physicien du XX<sup>e</sup> siècle.

Que cherchait Boltzmann ? Nous savons qu'il avait déjà essayé de faire du second principe de thermodynamique un théorème de mécanique. Mais il faut se garder de penser que, ce

---

quanta de Max Planck et sur la relativité, et leur auteur n'y considérait pas du tout que la question du second principe était une « simple affaire de probabilité ». Pour Einstein, les probabilités devaient permettre de comprendre le second principe, non d'en régler le problème. Peut-être même, d'après Pierseaux, les quanta discrets de Planck annonçaient-ils pour Einstein la possibilité d'une « cinétique » du mouvement dont la relativité restreinte poserait peut-être quelques prémisses. Dans cette hypothèse, Einstein lui-même aurait été redéfini par la signification que revêtit son œuvre lorsqu'elle devint synonyme d'une « révolution » affectant la science (dynamique) de l'espace, du temps et du mouvement, *et désigna donc celle-ci comme « la » science maintenue une, invariante et toute-puissante depuis Newton qu'il fallait une révolution pour mettre en question.*

faisant, c'est le pouvoir réducteur de la mécanique qu'il cherchait à confirmer. Ce qui intéressait Boltzmann, comme Maxwell avant lui, était l'articulation entre propriétés macroscopiques et microscopiques, et la possibilité de créer des modèles de type nouveau qui étendent le domaine de la théorie à des relations expérimentales encore non interprétées, voire inconnues. En l'occurrence, Boltzmann voulait prolonger le travail de Maxwell là où la théorie thermodynamique était muette : dans le domaine des processus de non-équilibre, et notamment des phénomènes de relaxation (autre terme pour parler du retour vers l'équilibre d'un milieu perturbé). C'est pourquoi il n'est pas anormal que Boltzmann se soit adressé au cas le plus simple, celui du « gaz dilué » (à faible densité), où les « événements », représentés comme des collisions élastiques, semblent ne présenter aucun mystère. C'est seulement à partir d'un tel cas qu'il pouvait espérer montrer la fécondité de la cinétique là où échouait la théorie purement macroscopique, et peut-être réussir enfin à construire la représentation d'un processus à entropie croissante. A réussir, en d'autres termes, à « faire parler » le faitiche énigmatique que constitue la croissance de l'entropie.

Le théorème de Boltzmann dérive donc d'une équation mettant en scène l'évolution au cours du temps de la distribution statistique des vitesses des molécules d'un gaz. Maxwell avait défini la valeur d'équilibre de cette distribution. Boltzmann, lui, veut décrire l'évolution qui mène vers l'équilibre. L'équation construite par Boltzmann

est une équation « intégral-différentielle », cauchemar des physiciens, traduction de la complication de la relation entre état et évolution qui correspond à l'hypothèse cinétique : la variation de la distribution des vitesses en un instant résulte de l'intégration sur toutes les vitesses des effets des différentes collisions en cet instant, mais la fréquence relative de ces différentes collisions est elle-même fonction de la distribution des vitesses. Cependant, traitée avec des approximations adéquates, cette équation donne des informations précieuses à propos notamment des propriétés de transport (viscosité et conductibilité thermique) et des temps de relaxation. Elle a, à ce titre, été la première d'une lignée d'équations cinétiques qui sont encore aujourd'hui au cœur de la mécanique statistique. Par ailleurs, l'équation cinétique de Boltzmann autorise aussi une conclusion générale, extrêmement précieuse pour son auteur : elle permet de construire la fameuse grandeur  $\mathcal{H}$  dont la propriété est de décroître vers un minimum qu'elle atteint lorsque l'équilibre est atteint. Pour Boltzmann, c'était le triomphe : alors que la collision entre deux particules est représentée comme un événement strictement dynamique, les collisions agissant au sein d'une population de particules expliquent l'approche irréversible vers l'équilibre.

L'histoire qui suit a été mille fois racontée. Alors que Boltzmann présentait son équation comme une stricte dérivation de la description mécanique, il sera convaincu d'avoir introduit une approximation, vitale pour son calcul mais

condamnant la croissance irréversible de l'entropie, c'est-à-dire la décroissance de  $\mathcal{H}$  prévue par son équation, à redevenir « seulement relative » à notre ignorance. Cette hypothèse est celle du « chaos moléculaire ». Elle intervient lorsque Boltzmann détermine le nombre moyen des différents types de collision à partir de la distribution des vitesses en cet instant : comme cette distribution ne concerne que les vitesses, et ignore les positions relatives des particules, la validité de l'opération dépend de ce que ces positions « ne comptent pas », c'est-à-dire de ce que le fait de les connaître ne permettrait aucune prévision supplémentaire à l'observateur. En termes techniques, on dit que pour que l'hypothèse du chaos moléculaire soit valide il faut que les particules ne soient pas « corrélées » avant les collisions. Cette identification des limites du modèle de Boltzmann est seulement rétroactive. Elle date de la dernière décennie du XIX<sup>e</sup> siècle, à un moment où Boltzmann est d'ores et déjà vaincu<sup>8</sup> et où il s'agit de savoir ce qui l'a vaincu, en l'occurrence pourquoi son théorème, apparemment purement mécanique, a été vulnérable à l'objection soulevée en 1876 par son collègue Loschmidt.

Ce que l'on appelle traditionnellement le « paradoxe de Loschmidt » met en scène une très hypothétique et parfaitement irréalisable « inversion instantanée des vitesses de toutes les parti-

---

8. Voir Thomas S. KUHN, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity. 1894-1912*, The University of Chicago Press, Chicago, 1987, p. 60-71.



cules » qui constituent un gaz boltzmannien. Dans ce cas, selon les équations dynamiques, chaque particule devrait retracer son chemin à l'envers et des collisions « inverses » devraient « défaire » ce que les collisions « directes » ont fait. En conséquence, si l'état affecté par l'inversion caractérisait un gaz évoluant vers l'équilibre, l'état résultant de l'inversion appartiendra à une évolution qui éloigne le système de l'équilibre, et la grandeur  $\mathcal{H}$  qui lui correspond devrait aller en croissant et non plus en décroissant. Le théorème de Boltzmann donne donc en fait, et bien malgré lui, une recette pour obtenir une évolution « anti-thermodynamique », prohibée par le second principe : il « suffit » pour cela de partir d'un état initial obtenu par inversion de toutes les vitesses d'un état quelconque d'un système approchant de l'équilibre.

Le paradoxe de Loschmidt a mis en lumière la faiblesse cachée de la construction de la grandeur  $\mathcal{H}$  de Boltzmann, c'est-à-dire l'hypothèse du chaos moléculaire. La particularité des collisions « inverses », qui découlent de l'inversion des vitesses, est précisément qu'elles ne répondent pas à cette hypothèse : ces collisions, qui éloignent le gaz de l'équilibre, sont strictement dépendantes du fait que chaque particule a précisément telle vitesse, mais aussi telle position relativement aux autres. Brouillez légèrement les positions, et le gaz ira à l'équilibre. En d'autres termes, les particules issues de l'inversion doivent être reconnues comme corrélées. Non seulement la théorie dynamique complète peut les prévoir,

ce qui serait toujours le cas, mais cette théorie est, dans leur cas, nécessaire pour les prévoir, c'est-à-dire pour prévoir l'évolution « anormale » qu'elles engendrent.

Arrêtons-nous ici car il y a matière à étonnement. Pourquoi Boltzmann n'a-t-il pas objecté que l'argument de Loschmidt n'était pas un argument physique recevable ? Qui peut effectuer l'inversion des vitesses et donner tort à Boltzmann ? Ce n'est plus un démon manipulateur, ou alors il faut lui attribuer quelque  $10^{23}$  mains pour manipuler simultanément *tous* les constituants d'un état instantané. C'est apparemment la Reine des Cieux elle-même qui se manifeste et fait valoir le plus incommunicable de ses attributs : la symétrie dans le temps des équations dynamiques. Mais cette manifestation n'est-elle pas quasi surnaturelle ? Ne prête-t-elle pas à des équations théoriques, dont tous les physiciens reconnaissent, au moins formellement, qu'elles doivent ce qu'elles ont d'autorité à l'expérience, le pouvoir d'affirmer, contre l'expérience, qu'une évolution éloignant spontanément un système de l'équilibre est parfaitement concevable ? Peut-être Boltzmann ne pouvait-il recourir à ce type d'argument car il aurait donné raison à ses propres adversaires. C'était Ernst Mach qui soutenait la nécessité de maintenir la théorie dans le cadre strict des contraintes opératoires qui qualifient la physique comme science. Boltzmann plaidait pour la liberté de l'imagination créatrice de modèles, et il a été vaincu par un autre usage de l'imagination, imagination au service du pouvoir et non de la création.

Autre matière à étonnement : pourquoi a-t-il fallu attendre 1876 pour que se formule une objection comme celle de Loschmidt ? N'était-elle pas déjà contenue dans la distinction entre réversible et irréversible ? Pour nous, certainement, mais, sauf à considérer que les physiciens du XIX<sup>e</sup> siècle étaient incapables d'un raisonnement d'étudiant de première année aujourd'hui, il faut penser que la question de la symétrie temporelle caractérisant la dynamique *n'avait pas été explicitement mise en lumière jusque-là*. Et en particulier il faut penser que ni la réversibilité ni l'irréversibilité n'avaient jusque-là été reconnues comme traduisant la symétrie ou la non-symétrie des évolutions physiques par rapport au temps, ce que l'on appelle depuis la « flèche du temps ». Le contraste entre dynamique et thermodynamique s'inscrivait dans les lignes de la mécanique rationnelle, axée sur les notions de conservation et de perte. C'était l'absence de perte, l'égalité pleine de la cause dans son effet, et non la réversibilité dans le temps, que désignait la conservation et que mettaient en scène les expériences de pensée où la bille galiléenne remonte vers son altitude initiale. Et c'est encore la question de la dégradation de l'énergie, du nivellement spontané des différences que mettait en question le démon de Maxwell. C'est seulement à partir de l'objection de Loschmidt que s'imposera cette constatation : on ne peut renvoyer l'évolution vers l'équilibre, la « dégradation de l'énergie », à la finitude et à l'ignorance humaines sans y renvoyer tout aussi bien l'ensemble des témoignages physiques portant sur la différence entre le passé

et l'avenir. La dynamique est devenue science d'évolutions réversibles non plus au sens conservatif qui l'oppose aux préoccupations des ingénieurs, mais au sens où ces évolutions ne créent pas de différence entre l'avant et l'après.

La manière dont s'est produit ce changement de signification, le fait que le plus incommunicable des attributs de la Reine des Cieux se soit finalement explicité pour abattre en plein vol un « Icare allemand », fait partie des questions posées par la « percolation historique » que je mets en scène. Qui sait l'effet qu'aurait eu cet argument s'il n'était pas intervenu comme une objection, mettant en scène le pouvoir qu'a la Reine des Cieux de « défaire » une évolution à entropie croissante ? S'il était intervenu sur un mode polémique, mettant en scène l'absurdité à vouloir étendre la juridiction de la Reine des Cieux au domaine de la physique terrestre ? En tout état de cause, vient d'apparaître ici celui de ses attributs qui s'imposera rétroactivement comme la clé des rapports entre dynamique et thermodynamique. Pour soumettre la seconde à la première, pour affirmer la subordination de l'ensemble de la physico-chimie « phénoménologique » au règne des lois, il n'est pas nécessaire de soumettre explicitement chaque type d'événement cinétique à ces lois. Il n'est même pas nécessaire de connaître les lois auxquelles ils répondent. Il faut et il suffit de poser que tous les événements cinétiques sont, comme la collision élastique, réversibles dans le temps.

Et donc, en 1877, Boltzmann accepte l'objection fondée sur l'inversion des vitesses. Il a bel et

bien été mis au pied du mur par la propriété de symétrie des équations dynamiques qu'explique l'expérience de pensée de Loschmidt. La possibilité d'un état dynamique tel que celui qui est issu d'une inversion des vitesses et le fait qu'un tel état engendrerait bel et bien une évolution faisant diminuer l'entropie lui semblent, pour son plus grand malaise, irréfutables. Il peut seulement qualifier une telle éventualité de « hautement improbable ». Dès lors, Boltzmann développera l'interprétation probabiliste de l'entropie qui lui est depuis associée au point que la formule qui lui correspond est inscrite sur sa pierre tombale. Contrairement au théorème  $\mathcal{H}$ , cette interprétation fait explicitement appel à notre ignorance, et elle se prive corrélativement de toute possibilité de décrire une évolution dans le temps. Chaque état dynamique est en effet tenu pour « équiprobable », et la probabilité d'un état macroscopique est, quant à elle, mesurée par le nombre d'états microscopiques distincts qui peuvent le réaliser. Nouvelle définition, combinatoire, cette fois, de l'état d'équilibre : c'est l'état que réalise la majorité écrasante des configurations microscopiques<sup>9</sup>.

---

9. De là suit l'idée récurrente, mais assez saugrenue, que l'état d'équilibre n'est pas du tout caractérisé par l'uniformité ou l'oubli des différences. N'est-il pas au contraire celui auquel correspond le maximum de diversité microscopique ? L'idée est saugrenue à cause de l'hypothèse d'équiprobabilité, qui frappe chacun de ces divers états d'insignifiance. Quelle que soit l'extraordinaire configuration microscopique réalisée en un instant donné,

Et de cette définition découle celle de l'évolution irréversible vers l'équilibre : si l'on se donne un état peu probable, réalisé par un petit nombre de configurations microscopiques, l'évolution la plus probable devrait mener à un état plus probable, auquel correspond un plus grand nombre de configurations élémentaires. En d'autres termes, la croissance de l'entropie ne nous parle pas d'une évolution physique dans le temps – celle-ci appartient à la juridiction de la dynamique –, elle nous parle seulement de l'évolution dans le temps du système tel que nous pouvons l'observer, du système macroscopique dont chaque état peut correspondre indifféremment à une multitude d'états dynamiques distincts.

Dire que l'évolution thermodynamique irréversible correspond à l'évolution la plus probable est commode et rassurant. Mais elle l'est seulement pour qui veut régler, une fois pour toutes, une question de droit. S'il est question de fécondité, l'équation cinétique de Boltzmann reste incomparable : c'est elle et ses sœurs qui donneront sens aux grandeurs expérimentales qui caractérisent les comportements de non-équilibre <sup>10</sup>.

---

son caractère extraordinaire ne peut « compter » ni pour nous, vulgaires observateurs macroscopiques, ni non plus pour quoi que ce soit qui puisse en inventer des conséquences (par exemple en ce qui concerne l'origine de la vie). En effet, cette configuration est par définition transitoire et non reproductible.

10. Voir *Au nom de la flèche du temps : le défi de Prigogine*.

Les probabilités ne permettent pas plus que le potentiel thermodynamique de parler de tels comportements. Qui plus est, et le fait que ce trait remarquable soit rarement souligné traduit une dernière fois le processus de percolation – il y a des problèmes par où on ne passe pas –, on ne peut pas dire que les probabilités expliquent en quoi que ce soit la différence entre les évolutions prédites par le second principe et celles qu'il interdit. Bien au contraire, l'inversion des vitesses permet de faire correspondre systématiquement à un état dynamique engendrant une évolution qui correspond à une approche de l'équilibre macroscopique un autre état qui engendrera, lui, une évolution correspondant à un éloignement spontané de cet état d'équilibre. On doit donc conclure que la probabilité *a priori* des deux types d'évolution est la même. Il n'y a pas en fait de privilège de l'évolution thermodynamique par rapport à celle qu'interdit le second principe. Une difficulté similaire se retrouve dans la définition des probabilités elles-mêmes : face à un état macroscopique de non-équilibre, les probabilités nous permettent de prédire une évolution vers un état plus probable, plus proche de l'équilibre donc. Mais le même argument nous mènerait aussi bien à conclure que cet état « non probable » est, selon toutes probabilités, issu d'un état « plus probable » situé dans le passé. L'argumentation probabiliste est donc implicitement limitée au calcul des probabilités futures. Elle n'explique pas l'irréversibilité, elle la rend simplement compatible avec la réversibilité dynamique. Elle ne peut convaincre

que ceux qui ne demandent qu'à se laisser convaincre <sup>11</sup>.

C'est l'objection de Zermelo, en 1896, qui mettra en lumière l'absence de privilège de l'évolution irréversible. Zermelo utilise un théorème dynamique dû à Poincaré, selon lequel tout système dynamique, et donc, pourquoi pas, l'univers, finit toujours par repasser aussi près que l'on veut de son état initial. Les probabilités ici sont impuissantes puisque la question n'est pas celle de la préparation d'un état « improbable », mais celle d'une évolution dynamique spontanée. Et Boltzmann à nouveau s'inclinera : il reconnaîtra que, à l'échelle d'un univers que l'on peut concevoir comme globalement à l'équilibre, il existe sans doute autant de régions où les évolutions éloignent de l'équilibre que de régions où, comme la nôtre, l'équilibre appartient à l'avenir. Le second principe est purement relatif à une *contingence cosmologique*, au fait que notre région de l'univers constitue une fluctuation locale improbable, un écart à l'équilibre en route vers la résorption.

---

11. Le seul comportement macroscopique dont l'argumentation probabiliste fonde donc véritablement le privilège est celui de l'état d'équilibre stable : si un système a été préparé dans un état d'équilibre, l'écrasante majorité des évolutions dynamiques, qu'elles soient ou non engendrées par une inversion des vitesses, le maintiendra à l'équilibre. En d'autres termes, l'argumentation probabiliste permet de caractériser l'état d'équilibre mais non pas de « sauver » l'évolution irréversible. Son champ est donc le même que celui des potentiels thermodynamiques, dont seul l'extremum, correspondant à l'état d'équilibre, est défini.



## Sans épilogue

La démonstration invoquée par Zermelo avait pour objet un système dynamique. Boltzmann reconnaît que l'univers lui-même est incapable de rendre témoignage de la différence entre le passé et l'avenir. Il renonce donc à faire valoir tout ce qui pourrait séparer les deux cas, comme s'il allait sans dire que l'univers répond aux exigences de la dynamique, tombe sous la juridiction de la Reine des Cieux. Et aujourd'hui encore, tous ceux qui acceptent l'interprétation probabiliste de l'entropie, c'est-à-dire l'immense majorité des physiciens, acceptent que, d'une manière ou d'une autre, le Soleil ne brûle pas vraiment, qu'il doit exister un point de vue, le seul véridique, à partir duquel on pourrait renvoyer la fournaise solaire à un effet « seulement macroscopique », déterminé par un état initial improbable. En vérité, sur la Terre comme aux cieux, « il ne se passe rien », rien d'autre que la calme répétition à l'identique d'une réalité intégralement soumise au pouvoir du signe « = ».

Que s'est-il passé ? Pourquoi l'interprétation probabiliste a-t-elle été acceptée, et l'est-elle toujours ? Comment, sans bruit, a-t-on pu passer du problème posé par la dégradation de l'énergie, par le nivellement spontané des différences lors des évolutions vers l'équilibre thermodynamique, à la négation la plus audacieuse qui puisse être inventée, celle de la « flèche du temps » ? Et pourquoi, la question se pose à nouveau, la diversité des événements cinétiques qui, à l'exception de la collision élastique, semblent tous témoigner d'une différence entre le passé et le futur, n'a-t-elle pas été mobilisée pour résister au pouvoir de la dynamique ?

En ce qui concerne Boltzmann lui-même, on peut sans doute invoquer un effet de capture, qui rappelle l'arène qu'a constituée le cycle de Carnot. Les transformations entre chaleur et travail sont de celles où le seul type d'événement requis par les modèles cinétiques est la « collision », et c'est aussi à leur sujet qu'a été énoncée la loi de croissance de l'entropie. On peut donc dire que, pour Boltzmann, c'est là que devait se jouer l'articulation entre dynamique et thermodynamique. De même que la diversité des formes d'énergie avait été capturée par le contraste entre conservation au sens mécanique, d'une part, conservation *et* dégradation au sens thermodynamique, de l'autre, la diversité des événements cinétiques aurait été capturée par l'enjeu qui a mis la physique en crise : le physicien a-t-il pour obligation de s'en tenir aux seuls phénomènes observables, ou a-t-il la liberté de construire des modèles

impliquant des acteurs inobservables, « au-delà des phénomènes » ? Doter ces acteurs de propriétés « dissipatives », qui en fassent, à titre individuel, des témoins de la « flèche du temps », c'eût été, dans les termes de cet enjeu, recourir à un coup « hors jeu » · faire porter à l'inobservable la responsabilité de ce que le modèle avait précisément pour objet d'engendrer. Cet effet de capture est assez usuel : plutôt que de changer de problème, surtout s'il est chargé de prestige, que de fois un chercheur ne propose-t-il pas l'impasse à laquelle il est acculé comme une conclusion indépassable, point de vertige valable pour tous.

Cependant, cet effet de capture vaut peut-être pour Boltzmann, mais ne suffit pas à comprendre le succès de l'interprétation probabiliste. Et ce d'autant plus que, à la mort de Boltzmann, la « percolation » n'avait pas encore vraiment eu lieu. Boltzmann lui-même avait été sur la défensive jusqu'au bout, et, à Vienne, son adversaire Mach, l'anti-atomiste, tenait toujours le haut du pavé. Une « autre histoire » semblait encore possible, où « les atomes » répondraient à la cinétique mais échapperaient à la juridiction de la Reine des Cieux. La question se pose d'autant plus que ceux qui étudiaient ces acteurs inobservables, au tournant du siècle, s'aventuraient dans des pratiques expérimentales nouvelles, mettant en scène des « événements » toujours plus divers, décomposition radioactive, émission, absorption de lumière, etc., étaient loin d'être des adorateurs de la Reine des Cieux. Chacun était plus ou moins convaincu qu'aller au-delà des phénomènes

c'était aller au-delà de la dynamique aussi bien que de la thermodynamique. Lisons le grand livre de Jean Perrin, *Les Atomes*, qui, en 1912, célèbre l'événement conférant aux atomes droit de cité dans la physique : nous pouvons les compter, nous pouvons chiffrer le « nombre d'Avogadro ». Pour Perrin, le monde des atomes signifie la destitution des lois régulières : c'est la course folle, sans cesse brisée, sans loi, de la particule brownienne et non plus celle des planètes dans les cieux qui donne désormais sa figure pertinente au mouvement. Adressons-nous également au premier modèle « quantique » de l'atome, celui de Niels Bohr, qui contrevient de manière explicite et délibérée aux lois de la dynamique et de l'électrodynamique. Lisons d'autres textes, comme celui où Paul Langevin entreprend, en 1904, de ramener la masse mécanique à un cas particulier pour déployer la perspective d'une représentation non mécanique de la matière<sup>1</sup>. Découvrons enfin le sens qu'Einstein donnait peut-être à la relativité restreinte en 1905<sup>2</sup>. Il semble évident à tous que les limites de l'intelligibilité dynamique ont été atteintes : aller au-delà des phénomènes signifie aussi aller au-delà des vieilles lois du mouvement. Le déterminisme lui-même est battu en brèche avec le processus exponentiel de décompo-

---

1. « La physique des électrons », repris dans Paul LANGEVIN, *La Physique depuis vingt ans*, Doin, Paris, 1923.

2. Voir Y. PIERSEAU, « Thermodynamique et cinétique : les deux sources non classiques de la théorie de la relativité restreinte », *op. cit.*

sition spontanée des noyaux atomiques instables, et Oswald Spengler chante, dans *Le Déclin de l'Occident*, le retour de la « liberté » au cœur de la physique.

Comment raconter une histoire sans épilogue ? L'épilogue est usuellement ce moment du récit où tous les ingrédients ont joué leur rôle et peuvent, une dernière fois, être rassemblés et envisagés du point de vue de ce rôle qu'ils ont finalement joué. C'est le moment où les événements qui ont scandé l'histoire peuvent être pensés par les différents protagonistes dans le contraste entre les significations multiples qui auraient pu leur être attribuées et celle qu'ils ont finalement revêtue. Or, la singularité de notre histoire, son ironie, est qu'elle se clôt aux mains de ceux qui la considèrent comme déjà close, *parce qu'elle ne les intéresse plus le moins du monde*. Le triomphe de la Reine des Cieux, face au pouvoir de laquelle Boltzmann s'incline, *n'a jamais véritablement eu lieu*. Le désert où s'affrontaient les « anti-mécanisme » du XIX<sup>e</sup> siècle et les partisans de l'hypothèse cinétique la question de la différence entre équilibres mécanique et thermodynamique, a été tout simplement déserté. La question de l'événement cinétique en lui-même n'a pas trouvé de représentant parce que, enrôlé dans la question du statut de la dissipation macroscopique, il a partagé le destin de celle-ci : basculer dans une histoire dépassée.

Le triomphe de la Reine des Cieux n'a pas eu lieu parce que, pour la nouvelle génération des physiciens qui vont effectivement au-delà des

phénomènes, vers les atomes, les noyaux, les électrons, les ions, elle n'est plus qu'une ombre déçue. Et pourtant l'interprétation probabiliste, elle, a triomphé, alors même que sa fonction était de soumettre les phénomènes macroscopiques dissipatifs à la juridiction des équations de la dynamique. Le démon de Maxwell a résisté à la déchéance de la dynamique. Que s'est-il passé ?

C'est ici qu'il convient de faire intervenir une connexion imprévisible, ironique, qui, peut-être, a finalement provoqué le franchissement du seuil de percolation. Peut-être les probabilités ont-elles triomphé parce qu'elles ont été associées, dès les premières années du  $XX^e$  siècle, à un point tournant de la physique, à l'épisode qui a renvoyé à la préhistoire les vieilles querelles entre dynamique et thermodynamique : la création de la première *théorie* non mécaniste désignant la réalité « au-delà des phénomènes ». Je veux parler de la théorie quantique de l'absorption et de l'émission de la lumière due à Max Planck. C'est cette théorie qui marque la déchéance de la dynamique hamiltonienne en tant que mode fondamental d'intelligibilité parce qu'elle décrit le « rayonnement de corps noir » en termes d'une *distribution discrète* d'énergie. Mais c'est le terme « distribution » qui doit faire ici dresser les oreilles : le caractère discret des « quanta lumineux » s'impose à partir d'un argument qui fait intervenir une distribution statistique et donc un raisonnement probabiliste. Et donc il n'est pas impossible que l'argument probabiliste ait été accepté non pas du tout en conséquence du triomphe de la Reine des Cieux,

mais bien parce que, en tout état de cause, les probabilités étaient devenues l'instrument de la physique de pointe. Thomas Kuhn souligne à ce sujet un point important. Alors que le nombre des physiciens qui, en 1900, utilisent les probabilités se compte sur les doigts d'une ou deux mains, l'événement que constitue la découverte de la discontinuité quantique va en faire un instrument obligé, crucial pour l'ensemble des physiciens qui se lancent à l'assaut de la réalité nouvelle<sup>3</sup>. Dès lors aurait été accepté comme allant de soi le pouvoir des probabilités à interpréter cette ancienne réalité *qui n'intéresse plus personne*, la dissipation irréversible de l'énergie.

S'il en est ainsi, l'histoire dont j'ai tenté l'anamnèse se clôt sur un mode profondément ironique. En effet, le point de départ des travaux de Planck sur le rayonnement de corps noir, en 1894, avait été précisément de reprendre le grand projet de Boltzmann, donner une interprétation physique de l'irréversibilité. Planck était thermodynamicien, il était de ceux que passionnait la différence entre potentiels mécanique et thermodynamique et que fascinait la possibilité d'une description objective des processus irréversibles. Face à l'échec de Boltzmann, il avait caressé l'espoir que, peut-être, les collisions élastiques entre particules ne constituaient pas le bon terrain, et qu'un autre cas, plus

---

3. Voir pour cela et pour ce qui suit Thomas S. KUHN, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity. 1894-1912*, *op. cit.*

prometteur, permettrait une articulation rigoureuse, sans approximation, de l'approche vers l'équilibre avec une interprétation physique des processus. Ce cas n'était autre que l'équilibre du rayonnement de corps noir. La lumière absorbée et réémise au sein d'une cavité aux parois opaques connaît en effet une évolution « irréversible », où elle « oublie » sa distribution énergétique initiale et devient « rayonnement de corps noir », dont la distribution énergétique n'est plus fonction que de la seule température de la cavité. Le rayonnement de corps noir déçut Planck : les lois de l'électrodynamique l'acculèrent, comme les lois de la dynamique l'avaient fait pour Boltzmann, à une interprétation « seulement probabiliste » de l'approche vers l'équilibre. Mais c'est lorsqu'il s'agira pour lui d'articuler ces malheureuses probabilités aux faits expérimentaux (portant sur la variation de la distribution énergétique d'équilibre du rayonnement de corps noir en fonction de la température) que se produisit la surprise : seule l'hypothèse d'une distribution énergétique discontinue, « quantique », du rayonnement pouvait rendre compte des faits.

L'histoire est sans épilogue, car le sujet de cette histoire vient de changer d'identité. Alors que tous les protagonistes de la physique du XIX<sup>e</sup> siècle tentaient de comprendre, chacun à leur manière, ce qu'exigent les relations expérimentales et en quoi elles obligent l'édifice physico-mathématique qui prétendrait les articuler de manière cohérente, vient d'apparaître un nouveau protagoniste, la *physique théorique*. Cette phy-



sique affirme, comme Einstein l'avait bien souligné, l'*énigme* que constitue l'intelligibilité du monde. En d'autres termes, elle honore les « faitiches énigmatiques » mais – contre Duhem – affirme que leur énigme peut être percée à jour et que cette possibilité est la seule véritable énigme.

La physique théorique est, par définition, révolutionnaire, parce qu'elle est explicitement associée à la thèse de transformations révolutionnaires dont la lumière quantique et bientôt la relativité constituent l'annonce. Ce qui signifie qu'elle introduit avec elle de nouvelles valeurs et de nouvelles obligations. Elle ne célèbre plus son enracinement expérimental et les obligations qui correspondent à cet enracinement. Ce n'est pas qu'elle méprise les « faits », bien au contraire, mais qu'elle a, par rapport à eux, une liberté qui désigne leur au-delà seul véritable enjeu. Sa première obligation n'est plus tant d'aller au-delà des phénomènes – cela est le précédent qui l'autorise, l'énigme résolue, l'acquis dont elle célèbre l'héritage – que de constituer cet au-delà en ressource révolutionnaire, dont la valeur se mesurera à l'aune des démentis qu'il permettra d'imposer aux « évidences » phénoménologiques. « On croyait », « on sait maintenant. » De manière énigmatique mais incontestable, l'intelligibilité du monde se doit de s'imposer, et la marque de ce qu'elle s'impose est la blessure qu'elle impose à nos évidences.

A ces valeurs nouvelles de la physique correspondent de nouvelles exigences adressées tout à la fois au monde et à tous les humains. L'identité nouvelle de la physique exige passionnément du

monde qu'il justifie, et des humains qu'ils acceptent, le droit du physicien à négocier en toute liberté comment et dans quelle mesure des obligations le lient à ces phénomènes au-delà desquels il se situe. La manière dont l'interprétation probabiliste résout la question de l'évolution dissipative, et avec elle celle de l'ensemble diversifié des phénomènes physico-chimiques, est, du point de vue des valeurs de la révolution, devenue exemplaire et très profondément satisfaisante : elle traduit la liberté avec laquelle le physicien peut non pas prendre en compte, mais *régler leur compte* aux « phénomènes observables ».

Bien des choses resteraient à dire s'il s'agissait d'histoire, et notamment la différenciation des temps qui caractérisent la manière dont l'histoire du XIX<sup>e</sup> siècle se clôt. La « science française », par exemple, résista plus longtemps que d'autres à la nouvelle passion révolutionnaire, et sera donc jugée « en retard ». Mais l'anamnèse peut se clore, car ce qui suit est vivant dans l'expérience de chacun. Chacun d'entre nous a appris à faire rimer le triomphe de la physique avec la découverte bouleversante du caractère illusoire de ce que nous pensions connaître. Le chat de Schrödinger meurt-il avant que l'observateur ouvre la boîte ? Quiconque accepte que la physique soit susceptible de poser ce genre de question (que l'on discutera dans *Mécanique quantique : la fin du rêve*) est prêt à tout accepter de la part de cette science révolutionnaire. Et cette anamnèse aura fait son office si elle a réussi à instabiliser ce qui marque l'histoire de la physique du XX<sup>e</sup> siècle, la manière

dont elle se présente à nous, mais dont elle est aussi présente à elle-même : les certitudes qui s'annoncent sous le terme de « révolution physique », et le pathos associé au grand thème de la « vocation du physicien » aspirant depuis toujours à l'unité d'une conception unifiée du monde au-delà des phénomènes empiriques hétérogènes. La hiérarchie qui correspond à cette vocation à l'intérieur même de la physique n'a pas consacré une victoire dont nous pourrions entendre les attendus, mais traduit un fait brutal : les « phénomènes » peuvent être subordonnés puisque ceux qui s'y intéressent sont eux-mêmes subordonnés, laissés sur place par la dynamique révolutionnaire.

*(A suivre.)*

## Table

1. LE TRIPLE POUVOIR DE LA REINE DES CIEUX .....	9
2. ANAMNÈSE .....	19
3. L'ÉNERGIE SE CONSERVE ! .....	31
4. LE PEU PROFOND MYSTÈRE DE L'ENTROPIE	51
5. LES OBLIGATIONS DU PHYSICIEN .....	81
6. PERCOLATION .....	102
7. SANS ÉPILOGUE .....	129

# Cosmopolitiques

## *Ouvrages parus*

1. *La Guerre des sciences* (novembre 1996).
2. *L'Invention de la mécanique : pouvoir et raison* (novembre 1996).
3. *Thermodynamique : la réalité physique en crise* (janvier 1997).

## *A paraître*

4. *Mécanique quantique : la fin du rêve* (février 1997).
5. *Au nom de la flèche du temps : le défi de Prigogine* (mars 1997).
6. *La Vie et l'artifice : visages de l'émergence* (avril 1997).
7. *Pour en finir avec la tolérance* (mai 1997).

Composition : D.V. Arts Graphiques, 28700 Francourville  
Achévé d'imprimer en France en janvier 1997  
par **Bussière Camedan Imprimeries**  
à Saint-Amand-Montrond (Cher)  
Dépôt légal : janvier 1997  
Numéro d'imprimeur : 1/75  
Premier tirage  
ISBN 2-7071-2659-4

