

LA TROUSSE A OUTILS DU PHYSICIEN

Martin H. Krieger, University of Southern California, Los Angeles, USA.

La "trousse à outils" du physicien peut comprendre des outils mathématiques, des outils pour les schémas et pour la modélisation, incluant des modèles tels qu'un solide cristallin, un oscillateur harmonique, ou une loi d'interaction en raison inverse du carré. La notion de trousse à outils fournit un terrain de rencontre pour les scientifiques, les philosophes et les enseignants afin de comprendre ce que font les scientifiques. Faire de la science peut être considéré comme un artisanat utilisant, avec compétence, une trousse à outils.

I. Introduction

On peut penser au travail scientifique comme à un artisanat doté d'une trousse à outils et pratiqué en corporation. On peut considérer qu'il y a un petit nombre de type d'outils et de pratiques que l'on peut spécifier et enseigner (voir le tableau I pour une telle trousse). Considérons la physique comme "outillée", elle a la nature sous contrôle si elle possède une trousse à outils efficace et une pratique de type artisanal¹. Les physiciens choisissent et formulent soigneusement leurs problèmes de manière à pouvoir y travailler en utilisant leur trousse à outils. Comme nous pourrons le voir, ils s'obstinent à choisir des situations linéaires ou tout au moins linéarisables (en incluant celles qui sont apparemment non linéaires). Et ils inventent des états fondamentaux adéquats pour cacher les non-linéarités. Les physiciens expliquent leur capacité à appréhender la nature en rendant compte des hiérarchies des forces (et de la monotonie d'une échelle de température) et de la stabilité de la matière. Ensuite, leur approche par la perturbation linéaire devrait "fonctionner", puisqu'à chaque niveau de la hiérarchie, on a un état stable à partir duquel il est possible de travailler.

La notion d'outils donne un moyen efficace de comprendre et décrire ce que font les scientifiques. Ici nous décrivons seulement ce qui fait partie de la trousse à outils du physicien et les savoir-faire et jugements nécessaires à une pratique efficace. Nous rendrons compte de la manière dont la théorie scientifique est efficace, du fait qu'elle fournit les bons outils pour effectuer le travail et qu'elle justifie le travail comme étant celui qui doit être effectué. En général, un artisanat doit emprunter sélectivement et adapter les outils d'autres métiers. Ainsi, par exemple, la physique et les mathématiques, ou la physique et les sciences de l'ingénieur s'empruntent mutuellement des outils. Ainsi, la notion d'outils peut suggérer pourquoi les mathématiques fonctionnent en physique.

La notion de trousse à outils est attrayante parce qu'elle contourne la séparation conventionnelle entre théorie, hypothèse et idée par opposition à expérience, vérification et instruments. Tous ces éléments peuvent être considérés comme des outils. Les questions traditionnelles concernant la vérité scientifique, la connaissance ou la croyance ne disparaissent pas, mais elles permettent alors une approche relativement plus concrète.

Dans la section II, je décrirai comment les physiciens se conçoivent eux-mêmes comme disposant d'une trousse à outils, et quels sont les outils. Puis, j'exposerai la structure générale d'une trousse, avec comme objectif la compréhension plutôt que le détail. (Le lecteur intéressé

¹ Les outils, bien entendu, ne sont pas réservés à la menuiserie ou à la physique. Les outils de l'informatique comprennent "les outils logiciels" qui sont employés pour construire et organiser des programmes importants, la récursivité et les structures de données (comme celles réunies dans LISP) ; de nos jours, les études littéraires utilisent la rhétorique classique et ce qui est appelé les stratégies "déconstructionnistes" ; et les hommes de loi et les physiciens parleront de compétences et d'outils professionnels. Mais tous les domaines ne revendiquent pas leurs outils comme étant des outils. La plupart des sciences politiques et humaines se considèrent elles-mêmes en opposition aux outils ou aux méthodes. [voir S. Wolin, *Am. Poll Sci. Rev.* 63, 1062 (1969)]. Ainsi il est intéressant que la physique se voit comme étant outillée.

par le contenu de la trousse à outils du physicien peut passer directement à la troisième partie). La trousse décrite convient à la conceptualisation papier-crayon, au travail d'explication et de résolution de problèmes d'un physicien. La trousse à outils est contemporaine, relative à la physique des particules et à celle de la théorie des champs, en accord avec les vues modernes de la matière condensée. Elle est issue des textes, des examens et des manuels. Enfin, dans la quatrième partie, je préciserai quelques conséquences de la prise en compte de la physique comme "outillée".

II. Les physiciens et les outils

Les physiciens aiment à se considérer comme possédant un ensemble d'outils, et les écrits modernes sur la science se sont sérieusement penchés sur cette proposition. Fermi a été tristement célèbre pour son approche des problèmes de manière simple, en utilisant un petit nombre de modèles (tel que l'électromagnétisme) et en les adaptant lorsque cela était nécessaire.

Tableau 1 - La trousse à outils du physicien

1- Outils mathématiques
a. Calcul et approximation
combinatoire, statistique, asymptotique
b. Structure ⁱ
géométrie, symétrie, lois de conservation
c. Linéarité et limites
calculs, procédures d'optimisation, représentations linéaires
2- Outils pour faire des diagrammes ⁱⁱ
a. Géométrie et spatial
vecteurs et graphes
b. Expressions algébriques et symboliques structurées
formes canoniques
3- Rhétorique
a. Outils
(1) Milieux :
vide de l'espace-temps, atome d'hydrogène, cristal, milieu continu élastique, fluide, gaz
(2) Objets :
particules et excitations, oscillateurs, champs et ondes ; opérateurs linéaires incluant les équations différentielles et les groupes ; corrélations ; propriétés incluant l'énergie, la quantité de mouvement et les opérateurs de translation
(3) Interactions :
objets avec des objets et avec des milieux (potentiels, échange de particules, champ de force, diffusion), Lagrangien d'interaction, fonctions de réponse.
b. Approches
(1) Stratégies :
vide poussé ou état fondamental, équilibre, potentiels conservatifs ; analogie et heuristiques, homologie des équations et des solutions ; $n \log n$ en opposition à n
(2) Lieux communs :
méthodes qualitatives (par exemple Migdal) : devenir familier avec les dures réalités matérielles comme les fonctions d'onde de Coulomb ; rechercher des contributions importantes, la physique se situe entre deux pôles ; utiliser une image classique, complétée par des règles quantiques ; les choses diminuent, mais les asymptotes sont importantes ; bien connaître les puits de potentiel, les oscillateurs, les transitions à une particule, les milieux polarisables, ...

Les calculs et les estimations d'ordre de grandeur faits lors de conversations de couloir ou au restaurant font partie de la légende de la physique. Pais commence son étude récente d'Einstein

avec une biographie scientifique en une phrase : "mieux que quiconque avant lui, il savait comment inventer des principes d'invariance et faire usage des fluctuations statistiques". Le cours de physique théorique de Landau, "le minimum théorique", est bien connu. Moins célèbre est la liste talismanique ou emblématique de ses "dix commandements", ses formules et ses modèles les plus utiles, gravés dans la pierre, qui lui ont été donnés par ses élèves pour son cinquantième anniversaire. Les méthodes des diagrammes de Feynman étaient des outils pour exprimer la physique et pour faire calculer. Peierls donne une liste des modèles standards en physique qui comprennent : les modèles hypothétiques, phénoménologiques, approchés, simplifiés, instructifs, analogiques et de pensée (Gedanken). Kenneth Wilson a décrit un nouvel ensemble d'outils basé sur le traitement numérique et l'informatique².

Les physiciens offrent également volontiers des conseils pour choisir un problème sur lequel travailler, le bon niveau de difficulté avec lequel commencer, ou bien où rechercher de nouvelles lois. Par exemple, Dyson suivant Bragg: "N'essayez pas de ranimer des gloires passées. Ne faites pas les choses simplement parce qu'elles sont à la mode. Ne soyez pas effrayés du mépris des théoriciens"³. Comme types de conseil et de prudence, Peierls décrit les surprises en physique théorique, surprises en ce sens que les intuitions et les approches initiales se sont révélées inexactes⁴. A.B. Migdal a écrit dans un texte de pointe en mécanique quantique qui a pour objectif d'exposer aux élèves « comment-le-faire » de manière qualitative, comme un vrai professionnel. Il s'agit d'une trousse à outils complète et explicite, dont je résume certains de ses conseils dans le tableau I (items 3b(2)) sous l'intitulé "lieux communs"⁵.

Une trousse à outils de physicien peut être séparée en trois parties : mathématique, représentation ou diagramme, et description ou rhétorique. Comme on peut le constater à partir du tableau I, la trousse comprend des modèles de milieux comme un cristal, des modèles d'objets tels qu'une particule, et des modèles d'interactions comme une collision. Et la pratique comprend des stratégies et des lieux communs, comme la recherche des états d'équilibre. L'utilisation d'une trousse à outils exige des compétences techniques pour une manipulation experte des expressions mathématiques ou des diagrammes. Cela exige également un jugement, pour évaluer et décider quel outil ou modèle est adapté à une situation, ou quand une stratégie aura tendance à être efficace.

A. Les outils en général

Les outils sont des choses que nous utilisons pour faire notre travail. Les outils semblent objectifs, et sont bel et bien partageables, alors que les savoir-faire sont personnels et imités. Une trousse d'outils apparemment abstraits ou objectifs est associée à une pratique d'utilisation des outils - comment travailler et comment le travail est organisé, et au sens des outils lorsque l'artisan les utilisent. Les trousse à outils du menuisier comportent certainement des marteaux et des ciseaux, mais les menuisiers utilisent des clous et travaillent avec le bois, ils savent comment lancer un marteau, ils travaillent régulièrement pendant des heures avec d'autres artisans, et leur travail consiste à construire quelque chose. Le contenu et la pratique de la trousse à outils dépendent de la période historique dans laquelle le travail est effectué, les types de matériaux qui sont travaillés (bois, métal, atome, matière condensée), et ce qui est construit.

2 E.M. Purcell, Am. J. Phys. **51**, 11 (1983) ; P.B. James and J.S. Rigden, Am. J. Phys. **50**, 1069 (1982) ; G. Holton, *The scientific Imagination* (Cambridge U.P., Cambridge, 1973) ; A. Pais, "Subtle is the Lord..." *The Science and Life of Albert Einstein* (Oxford U. P., New York, 1982) ; A. Livanova, *Landau: A Great Physicist and Teacher* (Pergamon, Elmsford, NY, 1980); R. Peierls, Contemp. Phys. **21**, 3 (1980); *University of Chicago Graduate Problems in Physics With Solutions*, edited by J. A. Cronin, D. F. Greenberg, and V. L. Telegdi (Addison-Wesley, Reading, MA, 1967).

3 F. Dyson, *Phys. Today* **23**, 23(September 1970); R. P. Feynman, *The Character of Physical Law* (MIT Press, Cambridge, MA, 1965).

4 R. Peierls, *Surprises in Theoretical Physics* (Princeton U.P., Princeton, NJ, 1979).

5 Les méthodes de Migdal reflètent une situation dans laquelle les ordinateurs sont relativement indisponibles. Wilson a soutenu en argumentant une science théorique basée sur le calcul, avec un ensemble différent d'outils et de modèles. A.B. Migdal, *Qualitative Methods in Quantum Theory* (Benjamin, Reading, MA. 1977): K. Wilson, *CERN Courier* **23**, 172 (June 1983).

Il y a des outils standards, ainsi que des appareils personnels faits de bric et de broc. Le terme "trousse à outils" suggère un petit nombre d'outils d'une grande souplesse d'emploi permettant de travailler ensemble.

Les outils peuvent être conceptuels, comme dans la description de Kuhn des problèmes exemplaires ou standards et de la pratique paradigmatique. Ravetz développe explicitement le modèle d'outils avec de nombreux détails, en décrivant les outils comme plurifonctionnels, robustes, élaborés, standardisés et ainsi de suite⁶. Dans une histoire récente de la physique contemporaine des particules, les théoriciens du domaine sont décrits comme ayant un intérêt pour l'exploitation de leurs outils et de leur expertise, et la venue d'un problème qui leur convient est décrite comme leur permettant de travailler. Auparavant, ils étaient des "mécaniciens sans outils" pour calculer le quantum de faible énergie en chromodynamique, alors que les propriétés des particules étaient déjà bien connues⁷. Et Hacking considère les particules comme des sondes, des moyens pour intervenir sur le monde qui produisent des effets bien définis et mesurables. Il dit "les entités théoriques d'une grande longévité, qui ne disparaissent pas lorsqu'elles sont manipulées, se révèlent généralement être de merveilleuses erreurs"⁸.

Une autre version de « l'instrumentalisme », plus littérale et matérialiste, devient importante. Les scientifiques encouragent les responsables nationaux à prendre en charge les appareils vitaux dans leur travail, comme les télescopes et les synchrotrons. Ils présentent leurs recherches comme guidées par les instruments, plus que par les personnes ou les idées. Un accent plus fort est placé sur l'importance de l'artisanat et des instruments, et sur leurs limites et capacités dans l'investigation scientifique. Des facteurs particuliers de l'instrumentation, et l'interprétation de ce que ces instruments produisent (données), sont désignés comme jouant un rôle subtil dans la fabrication de la science. Et les anthropologues, utilisant la structure de l'anthropologie culturelle et matérielle, montrent comment des outils tels que les accélérateurs et les détecteurs organisent la culture et la production de la science⁹.

Nous pouvons distinguer deux traditions pour décrire des outils, l'objective et la situationnelle. Dans la tradition objective, un outil est un objet, comme un marteau ou un microscope, possédant certaines capacités. Une personne entraînée prend un outil et l'utilise pour faire quelque chose. Un tel outil peut être fabriqué par un fabricant d'outils et lorsqu'il est fait, il est alors disponible pour l'emploi. Dans les temps modernes, la fabrication et l'utilisation sont le plus souvent distinctes, même si il est bien connu que des artisans efficaces modifieront un outil pour des usages particuliers ou pour convenir à leurs propres particularités. Un outil est ici principalement passif, objectif et modulaire¹⁰.

Les compétences sont des capacités à utiliser des outils, et ces compétences deviennent automatiques et non observables. Mais différents utilisateurs, de ce que nous considérons être un même outil, ont des compétences et des pratiques différentes. Les cristallographes et les

6 T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1970); J. Ravetz, *Scientific Knowledge and Its Social Problems* (Clarendon, Oxford, 1971); M. Heidegger, *Being and Time* (Harper and Row, New York, 1962). Voir également, sur les compétences, M. Polanyi, *Personal Knowledge* (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1958). Heidegger emploie l'utilisation d'outils comme une image centrale dans son travail; Wittgenstein utilise la pratique artisanale dans partie initiale de *Philosophical Investigations* (Macmillan, New York, 1968). Les "outils" et "l'artisanat" sont des métaphores d'une philosophie traitant de la fonction opposée à l'essence, de la pratique opposée aux idées, de la technologie opposée à la nature.

7 A. Pickering, *Constructing Quarks* (Univ. of Chicago Press Chicago, 1984); see also, J. T. Cushing, *Synthese* **50**, 5 (1982).

8 I. Hacking, *Representing and Intervening* (Cambridge U. P., Cambridge, 1983), p. 275.

9 M. Harwit, *Cosmic Discovery* (Basic, New York, 1982); D. D. Price, *Nat. Hist.* **93**, 49 (January 1984); B. Latour and S. Woolgar, *Laboratory Life* (Sage, Beverly Hills, 1979); H. Garfinkel, M. Lynch, and E. Livingston, *Philos. Social Sci.* **11**, 137 (1981); P. Galison, *Rev. Mod. Phys.* **55**, 477 (1983); S. Traweek, in *Les Savoirs dans les Pratiques Quotidiennes*, edited by C. Belisle and B. Schiele (Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1984).

10 Kuhn, Ref. 6; Ravetz, Ref 6; A. H. Dupree and H. W. Dupree, "Performer Crafts and Instrument Maker Crafts: The Persistence of Craft Traditions in Industrial Transformation." Mimeo, 7 May 1979.

physiciens des particules élémentaires utilisent la théorie des groupes, mais de manière différente. Cela est toujours considéré comme un même outil. On devient plus compétent en utilisant un outil dans une pratique, par exemple en faisant beaucoup d'intégrales, et on acquiert des talents variés, par exemple en résolvant un oscillateur harmonique comme étant une équation différentielle $F = ma$, un problème d'Euler-Lagrange, ou par les variables action et angle.

Dans la tradition situationnelle, les outils sont définis dans les termes du travail à effectuer. Ils sont des moyens de maîtriser le monde, de le manipuler, d'appriivoiser ses nombreux degrés de liberté. Lorsqu'ils ne fonctionnent pas, nous découvrons les outils comme tels, comme des choses abstraites, objectives¹¹. Nous remarquons le marteau lorsque sa tête s'envole. Notre attention est attirée par une expansion asymptotique quand il y a divergence. Dans cette tradition, le monde existe dans la mesure où il *est* manipulé, les outils existent seulement *dans* la pratique, la pratique est apprise et mise en oeuvre seulement *dans* des environnements spécifiques et pour des tâches spécifiques.

Les deux traditions sont complémentaires, et chaque tradition hérite d'un problème complémentaire. La tradition objective doit rendre compte de comment les outils sont utilisés et sont utilisables dans des situations variées et doit rendre compte de leur rôle. La tradition situationnelle doit rendre compte de comment les outils sont considérés comme objectifs, séparables, dégagés de leur contextes originaux, comme universels, disponibles pour tous. Toutefois, les deux traditions s'accordent sur le fait qu'un outil est quelque chose qui peut être considéré comme objective et partageable, qu'il est affecté par la manière dont il est utilisé, que le monde que nous découvrons et que nous faisons est intimement lié aux outils que nous utilisons. Les outils ont une grande souplesse d'emploi et dépendent de leurs utilisateurs¹².

Les maîtres d'un artisanat emploient des outils de manières plus inventives et plus subtiles et produisent de plus beaux objets que les objets usuels¹³. Leurs productions sont des pièces de maîtres, mais pas suffisamment distinctives ou difficiles pour qu'ils ne puissent pas être produits par d'autres une fois qu'ils voient comment le faire.

Ceux d'entre nous qui ont eu suffisamment de chance pour regarder Enrico Fermi au travail étaient émerveillés de la vitesse et de la facilité avec lesquelles il était capable de produire une solution à presque tous les problèmes de physique sur lesquels il portait son attention. Lorsqu'il en avait suffisamment entendu pour savoir en quoi consistait que le problème, il travaillait au tableau noir et la solution coulait de source. Il se conservait en forme en faisant un grand nombre de problèmes, soit pour les cours qu'il dispensait, les conférences qu'il donnait, ou les papiers qu'il écrivait. Plus fréquemment, il trouvait ses propres solutions aux problèmes qu'il entendait, dans des séminaires, ou lors de discussions avec ceux qui venaient pour parler de physique avec lui. Les solutions de Fermi étaient presque plus simples et plus faciles à comprendre que celles qui étaient obtenues par la personne qui avait posé le problème en premier.¹⁴

Le style et les méthodes de Fermi ont été appréciées, apprises, et ensuite enseignées à plusieurs générations de physiciens. Ses notes de cours sont devenues des textes, son approche répétée par ses étudiants à leurs propres étudiants.

Une trousse à outils et un artisanat rencontrent le succès si ils permettent de faire un travail important¹⁵. Une corporation réussit parce que ses artisans ont trouvé à la fois du travail à faire

11 Heidegger, Ref. 6; A. R. Luria, *Cognitive Development: Its Cultural and Social Foundation* (Harvard U. P., Cambridge, MA, 1976).

12 Voir référence 6, et par exemple, M. Harris, *Culture, People, and Nature* (Harper and Row, New York, 1980).

13 Voir par exemple R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures in Physics* (Addison-Wesley, Reading, MA 1964). Sur la pratique de Feynman, voir F. Dyson, *Disturbing the Universe* (Harper and Row, New York, 1979).

14 *Physics Vade Mecum*, edited by H. L. Anderson (American Institute of Physics, New York' 1981).

15 G. Kubler, *The Shape of Time* (Yale U. P., New Haven, CT, 1962).

et un marché pour leurs produits. C'est dans un contexte d'outils et d'artisanat qu'une pratique est méthodique, claire, naturelle et simple. Et c'est dans les termes d'outils et d'artisanat qu'un style personnel est créé.

III. La trousse à outils

Une version assez facile de la trousse à outils d'un physicien devrait comprendre des systèmes de modèles spécifiques tels que les solides cristallins ou les pompes à chaleur, des objets spécifiques tels que les particules Newtoniennes ou les champs de Maxwell, et des modes d'approche tels que la linéarisation, la théorie du potentiel, les formulations de l'espace des phases, et les principes de moindre action. Il y a, par exemple, comme Peierls les décrit, un petit nombre de modèles de gaz ou atomiques, ou des types d'interactions interatomiques qui sont fréquemment utilisés¹⁶.

Ici, je décrirai la trousse à outils de manière plus schématique (voir tableau I). Je propose que la trousse à outils et la compétence du physicien soient composées de trois éléments : (1) les mathématiques, (2) les dessins ou les diagrammes, et (3) la description ou la rhétorique correspondant approximativement à un nombre et à une structure, à un dessin et à un patron [structure]ⁱⁱⁱ et au langage et aux arguments. Les outils (3a) comprenant le modèle des mondes ou des milieux (3a(1)) que nous utilisons en faisant de la physique, les modèles d'objets (3a(2)) qui peuplent chaque milieu, les modèles d'interactions (3a(3)) entre les objets eux-mêmes et avec le milieu, et les stratégies (3b(1)) pour formuler et travailler sur un problème.

Je décrirai brièvement la partie des mathématiques et celle relative aux diagrammes d'une trousse à outils, et ensuite je discuterai en détail la partie descriptive ou rhétorique.

Apparemment, les mathématiques sont peut-être le plus souvent considérés comme une compétence et un ensemble d'outils. Je me risque à faire une description synoptique de l'étendue d'une telle compétence : un physicien doit être capable de compter et de faire des approximations (tableau I, item 1a), d'où, dans la trousse à outils, la présence d'outils de la combinatoire, de statistiques et d'asymptotes. On doit maîtriser des structures (1b), et c'est pourquoi l'on trouve la géométrie et le calcul des variations, les principes de symétrie et les lois de conservation et les règles de propagation pour les ondes et les influences des bornes. Et il y a une maîtrise des principes de linéarité, de limites et de stabilité (1c) : dans les calculs, dans les procédures d'optimisation, et dans les représentations linéaires.

En admettant que la physique elle-même puisse expliquer pourquoi les mathématiques sont utiles, on pourrait commencer par justifier l'utilisation des mathématiques comme suit. Du point de vue de la physique, le comptage et l'approximation (1a) concernent habituellement les fluctuations et les perturbations et leur petite taille, ce qui est vrai pour beaucoup de situations pour lesquelles le physicien est concerné. Les structures (1b) traitent du petit nombre de bonnes classifications dans la nature, à nouveau dans la mesure où les physiciens sont concernés. Et linéarité et limites (1c) traitent du fait qu'il existe une hiérarchie de forces bien séparées, mesurées en terme de leur importance, et qu'il y a des objets stables qui peuvent être linéairement (ou presque) perturbés. Construit au sein de ce sous ensemble des mathématiques, on trouve les principes les plus profonds du monde comme les physiciens le comprennent. Et ainsi, les mathématiques semblent naturellement s'appliquer à la physique.

Un deuxième ensemble d'outils est constitué des outils de dessins et des outils pour faire des diagrammes (tableau I, item 2), des figures qui représentent le monde, et à partir desquelles on peut « écrire sur » et « lire » la physique. Ces figures peuvent être considérées soit comme géométriques et spatiales (2a) ou structurées à partir de l'algèbre et des symboles structurés (2b). Les vecteurs, les diagrammes de Feynman et les représentations des conditions aux limites sont de la première sorte, alors que les expressions covariantes et les formes canoniques des équations sont de la seconde. Bien entendu, les diagrammes doivent être interprétés correctement. Un Lagrangien symétrique peut avoir un état fondamental asymétrique (comme dans la congélation) ; le parallélisme dans une sphère n'est pas le même que dans un plan.

¹⁶ Peierls Référence 2.

Admettons encore que la physique elle-même puisse expliquer tout ce qui est diagramme. Nous pourrions dire que faire des diagrammes (2) exprime le fait que la physique rend littéralement compte des liaisons et des flux, et il peut ainsi y avoir des lois de conservation. Les vecteurs et autres notions de ce type, et les expressions covariantes sont des outils pour exprimer plus ou moins automatiquement les flux et les lois de conservation. Et la physique est également une histoire de symétries et de catégories systématiques, tels que les groupes, pour organiser les phénomènes. Les différents symbolismes structurés sont conçus pour faire ce travail.

La troisième compétence (tableau I, item 3) est une maîtrise des outils descriptifs et rhétoriques de l'artisanat, ou de la modélisation, ce qui pourrait être appelé « l'art d'aborder la nature » comme l'indique Rabi¹⁷. Les outils sont ici les modèles invoqués lorsque l'on affronte une situation, modèles qui font de la nature quelque chose dont on peut parler. Ils incluent les modèles des milieux (3a(1)) des objets (3a(2)), et des interactions (3a(3)). Il y a également des compétences stratégiques plus explicites (3b(1)) telles que la recherche de quantités se conservant, et l'utilisation de lieux communs (3b(2)) tels que ceux suggérés par Migdal.

Ce qui est caractéristique de ce mode de description ou de rhétorique est que les différents milieux, les objets et les interactions sont facilement séparables, et qu'ils peuvent être combinés de manière apparemment arbitraires - le milieu x avec l'objet y avec le mécanisme d'interaction z . Pour un physicien, la nature correspond à des parties presque isolables et néanmoins combinables. Les états de la matière sont séparés par des transitions de phases nettes; les particules ont des propriétés bien définies, et il y a une hiérarchie des interactions fondamentales.

Outils physiques et savoir-faire

Lorsque les physiciens approchent une situation en tant que physiciens, ils la considèrent immédiatement *comme* un monde physique ou un *milieu*. Les milieux (tableau I, item 3a(1)) incluent : le vide de l'espace-temps, un atome ou un système solaire, un solide cristallin ordonné, un milieu continu élastique (incluant les gouttes de liquide et les surfaces de tambour), et des fluides et des gaz.

Les milieux sont souvent traités du point de vue de leur évolution dans le temps, ils tendent à avoir une plus grande symétrie et des plus grandes températures (par exemple, solide/liquide/gaz ou atome/noyau/quark). Lorsque la température augmente, chaque milieu « fond » dans l'un des suivants et le nombre de degrés de liberté augmente. Il y a des « phases de transition » entre eux. Dans chacun de ces milieux, il y a des fluctuations, et généralement, ces fluctuations augmentent avec la température. Des fluctuations élevées ou susceptibles de l'être (aux phases de transition) se succèdent avec des états stables réguliers ou fortement amortis¹⁸. Cette image heuristique des milieux est inspirée par les modèles actuels des origines de l'univers et des particules élémentaires, tout comme ceux de la matière condensée¹⁹.

Lorsqu'il décide d'un milieu, le physicien identifie immédiatement des choses dans ce milieu, en utilisant des modèles comme les particules. En appelant ces choses *objets*, ce qui semble crucial concernant ces objets (3a2)) est que chaque objet est individuel et cependant additionnable - typiquement linéaire et superposable - même si lui-même, il est fait de choses bien plus compliquées. Les objets sont démographiques. L'effet total d'un groupe d'objets est un problème d'addition de leurs effets individuels marginaux. Il y a souvent des règles de conservation, et ainsi, la manière dont vous faites l'addition n'a pas d'importance. Si on démontre qu'il n'est pas possible de faire une telle addition démographique, on cherche alors des modes normaux, des états propres qui permettent de telles additions.

17 I.I. Rabi, *Columbia Today*, 6, (Winter 1977).

18 Stricto sensu, ceci est une explication des phases de transition de second ordre.

19 Henry Adams raconte une histoire similaire dans "The Rule of Phase Applied to History (1909)" in *A Henry Adams Reader*, edited by E. Stevenson (Anchor, Garden City, 1958).

Les objets peuvent être des choses ou des entités "moteurs" (nous traiterons de ces dernières). En tant que choses, elles semblent être des particules, des oscillateurs, des champs et des ondes. Remarquables par leur absence, on trouve les structures réelles, telles que les leviers et les fléaux. Leur substantialité et leur extension les délèguent dans le domaine de l'ingénierie, où les effets d'échelle et de non linéarité sont pris en compte.

Un milieu peut être un objet dans un autre milieu, comme un gaz d'électrons peut remplir un cristal. Il existe également des modes de transformation parmi les objets. Une particule peut être considérée comme une onde, ou une onde comme un oscillateur. Un cristal pris comme un champ symétrique à N corps est considéré comme étant un espace peuplé de particules telles que des phonons. Parce que ces transformations ne se font pas seulement à une échelle unique mais entre échelles, une hypothèse atomique nous dit « regardez plus finement ».

Alors que ma description de la trousse à outils est schématique, dans l'usage effectif, les outils sont pris de manière tout à fait spécifique. Un solide cristallin est facilement cubique, un atome sera l'atome d'hydrogène, un gaz sera parfait ou de van der Waals, un champ sera le champ électromagnétique de Maxwell, et une interaction sera en inverse du carré.

Les milieux et les objets interagissent, en fin de compte changeant peut-être par rapport à leur état initial. L'interaction (tableau I, item 3a(3)) nécessite des acteurs, des moyens et une résolution. Les objets peuvent interagir entre eux dans un milieu (deux électrons dans le vide), un objet peut interagir avec un milieu dans lequel il est inséré (un électron dans un cristal) ; ou un objet peut interagir avec un milieu pris comme un objet (un électron rebondissant sur un cristal, tous deux dans le vide). Les interactions peuvent être exprimées en terme de forces et d'influences (en contact, propagé à travers un milieu, ou à distance), ou en termes d'échanges d'informations, ou d'énergies, ou en termes de testeurs et de réponses dans un milieu polarisable. De fait, une interaction peut être considérée comme une auto-expansion. Les objets et le milieu qui interagissent désormais et qui ont peut-être changé peuvent encore une fois évoluer de manière indépendante - jusqu'au prochain épisode d'interaction. Ceci est exprimé par la matrice de diffusion, par l'existence de constantes de vitesse, comme les variables d'action et d'angle, et par des quasiparticules stables représentant une « somme » de la plupart des interactions.

Les entités moteurs sont des moyens pour l'interaction, transportant les milieux et les objets les uns vers les autres, et en fin de compte les libérant les uns des autres. Les équations différentielles « déplacent » les objets ou les poussent en avant dans le temps. La théorie des groupes montre comment ils peuvent être combinés. Les fonctions de corrélation ou de transfert relient ce qui se passe dans une partie d'un milieu à une autre. Les propriétés conservées, comme l'énergie ou le moment angulaire conduisent à des opérateurs de translation [$\exp(-iHt)$, $\exp(-ipx)$, $\exp(-iJ)$] qui font passer un monde à un monde similaire pour des temps, des lieux ou des orientations différents. Les entités moteurs, exprimées comme des opérations linéaires, sont combinées et additionnées pour accéder à la nature, tout comme les objets sont en général combinés pour fabriquer la nature. Mais contrairement aux objets en tant que choses, l'espace que ces objets occupent est explicitement mathématique ou formel.

Peupler un milieu avec des objets interagissants amène à mobiliser tous les outils pour rendre compte d'une situation. Toutefois, une explication physique exige d'utiliser ces outils de manière efficace. On a besoin d'un mode pour questionner la nature²⁰.

Il existe un certain nombre de telles stratégies de questionnement (tableau I, item 3b(1)). La plus cruciale est de trouver un bon état fondamental ou vide, tels qu'un réseau cristallin ou des

20 Je dois remarquer que j'ai mis en parallèle ma description de la trousse à outils et les descriptions de la rhétorique, l'art classique de questionner, car en questionnant la nature, nous produisons également des démonstrations convaincantes pour nous-mêmes et pour les autres. Les milieux correspondent à des genres, les objets à des tropes, les interactions à des intrigues, les stratégies à des modes d'attaque et les méthodes qualitatives à des lieux communs.

quasiparticules dans ce réseau, le vide physique de l'espace-temps, les paires de Cooper dans un état fondamental de Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS), l'état singlet S d'un atome d'hydrogène, ou un gaz parfait. Une étude des perturbations ou des excitations de l'état fondamental est intéressante pour la recherche d'informations concernant sa structure. Il est peut-être possible de trouver des potentiels conservatifs, comme les potentiels électriques ou thermodynamiques, qui caractérisent comment l'état fondamental évolue de manière quasi statique. Cela peut valoir la peine d'inventer de nouvelles particules, telles que les neutrinos, ou de nouvelles quantités, telles que l'entropie, pour avoir une bonne conservation.

Deux autres stratégies doivent être mentionnées.

La première est celle de l'analogie et de l'heuristique. Si vous pouvez commencer à traiter un corps noir comme un gaz parfait, ou la lumière comme une particule, ou les forces nucléaires comme des forces potentielles, faites-le. Aussi, rappelez-vous que les mêmes questions ont les mêmes solutions, et qu'il y a des analogies physiques derrière cela²¹.

Une deuxième stratégie concerne ce qui peut être appelé la plénitude restreinte de la nature²². Lorsque vous questionnez la nature, ne soyez pas surpris si un « bon » monde stable n'est pas toujours le meilleur des mondes possibles, mais simplement celui qui est suffisamment à la mode ou ordonné. Statistiquement, les équilibres ont de nombreux équivalents macroscopiques d'états microscopiques, de manière combinatoire, certaines structures sont plus stables et se renforcent plus elles-mêmes que beaucoup d'autres. Les gaz, les marchés en économie, et la loi macroscopique des carrés inverses, sont des exemples de la ruse de la nature ou de la main invisible²³.

Nous pourrions résumer les stratégies de la manière suivante : saisissez quelque chose qui restera posée et qui permettra des investigations simples et pourtant productives. Utilisez tout ce que vous savez sur une situation pour en étudier une autre qui semble similaire. Et supposez que vous pouvez d'une manière ou d'une autre comprendre le monde.

En créant cette trousse à outils schématique, j'ai manqué d'égards envers des outils cruciaux. Les diagrammes sont souvent des morceaux d'appareils, plus que des vecteurs ou de l'algèbre. La thermodynamique conçue en termes de pompes à chaleur, l'électricité en termes de résistances et de capacités, et l'optique conçue comme des miroirs, des lentilles et des rayons lumineux peuvent être adaptés à cette trousse, mais ils n'y appartiennent pas vraiment. En partie, cette trousse se concentre sur le monde microscopique. Et en partie, cette trousse à outils ainsi que l'ensemble des compétences et des stratégies pour l'utiliser, sont en relation avec la résolution de problèmes papier-crayon.

Lorsque les problèmes proviennent plus directement de l'expérience et de l'investigation empirique, nous devons imaginer des ajouts à cette trousse. Il y aurait à la fois des outils d'investigation et de reconnaissance²⁴. Pour l'investigation, il existe des outils logiques, tels que l'électronique ou les filtres, pour identifier des événements, des amplificateurs pour les rendre plus marquants, et des stimulateurs ou des sondes pour chercher et trouver des cas intéressants. Pour la reconnaissance, il existe des outils et des compétences de simulation ou d'empathie, de manière à se représenter comment, par exemple un électron pourrait agir dans un appareil ; des outils pour savoir traiter la dissimulation, pour traiter de la façon dont la chance et les truquages produisent des événements ; et des outils pour l'émulation, pour mettre en place des situations afin qu'elles soient identiques, pour permettre une reproductibilité et donner des résultats stables (à savoir des bonnes données). Dans une bonne trousse à outils, la résolution de problèmes et les outils expérimentaux sont intimement connectés, de manière à ce que,

21 Feynman, référence 3. Et le simple fait que deux systèmes aient les mêmes équations ne signifie pas qu'ils sont identiques - les approximations utilisées pour obtenir ces équations peuvent être différentes.

22 A. Lovejoy, *The Great Chain of Being* (Harvard U. P., Cambridge, MA, 1936).

23 H. Simon, *The Sciences of the Artificial* (MIT Press, Cambridge, MA, 1969); S. Kirkpatrick, C. D. Gellatt, Jr., and M. P. Vecchi, *Science* **220**, 671 (1983).

24 Voir Hacking, référence 8, sur la représentation et l'intervention, et Cushing, référence 7, pour une autre vision dans la théorie des matrices S.

comme le suggère Hacking, une particule soit une meilleure sonde, et que les filtres et les amplificateurs soient de meilleurs mécanismes d'interaction.

IV. La physique considérée comme outillée

Ces outils et compétences nous donnent une version de la nature qui est additive, lisse et muette ou inanimée. La nature est une « somme » de ses parties ; les parties interagissent sans problème comme dans les calculs, et des discontinuités peuvent être montrées comme disparaissant, disons dans une dimension supérieure ; et les outils sont objectifs, indépendants du contexte, ils n'ont pas de mémoire ou de souhaits pour eux-mêmes, seuls nous, les artisans en avons²⁵. La modularité de cette trousse à outils est un miroir de l'image de la société moderne composée d'individus.

La physique, considérée comme un artisanat muni d'une trousse à outils, est vraie parce que la trousse à outils fonctionne et conduit à des travaux intéressants. Elle se concentre sur des phénomènes reproductibles et explicables, au sein d'une tradition historique qui donne à l'artisan une idée de ce que signifie travailler et être intéressant. Lorsque la trousse à outils ne fonctionne pas ou devient d'un intérêt limité, de nouveaux outils et pratiques doivent être inventés, de nouvelles sondes, filtres et modèles créés. Les nouveaux outils peuvent être considérés comme des adaptations des anciens, mêmes si ils sont utilisés de manière relativement différentes. Par exemple, la théorie moderne des interactions faibles est simplement considérée comme une autre étape dans la tradition des équations de Maxwell pour l'électromagnétisme.

Une description d'une trousse à outils commence à être adéquate si elle contient de manière raisonnable des textes standards, des examens et des manuels scolaires. Les réactions des praticiens de l'artisanat et des membres de la corporation à une telle description sont également importantes. Cela devrait toucher la corde sensible de la reconnaissance. La description devrait paraître familière et juste, être un "bien sûr". Désormais, la croyance largement partagée en une trousse à outils et l'admiration pour les maîtres qui l'utilisent, signifie que si une trousse à outils est proposée et semble relativement adéquate, elle a des chances de toucher la bonne corde sensible. Elle occasionne des débats concernant des détails spécifiques et leur articulation, et c'est justement lors de ces débats que l'adéquation de la trousse à outils proposée est jugée.

La trousse à outils proposée et l'ensemble des compétences qui en font partie peuvent être plus complets. Comment se modifie une telle trousse dans les différentes institutions, nations et époques, et comment les outils ont-ils pénétré et sont-ils sortis de la trousse ? (un bon problème serait d'étudier le destin de l'oscillateur harmonique durant les derniers siècles.) Est-ce qu'elle aide à observer le partage du travail - des artisans fabriquant des instruments ou des artisans les mettant en œuvre ou les utilisant - quand on fait de la physique ?²⁶ Quel est le rôle du style et de la mode dans l'utilisation des outils ?²⁷ Existe-t-il des trousse à outils comparables en chimie, en biologie ou géologie ?

Comment la formation du type compagnonnage^{iv} se fait-elle ? La formation se fait-elle en restant centrée sur elle-même ou aussi à partir des comportements qui y sont associés ? Comment les maîtres choisissent-ils leur disciples ?²⁸ Quels sont les exemples et les contre

25 L'homme économique rationnel dans une microéconomie néoclassique est pareillement lisse, adaptable et objectif. A. Marshall dans ses *Principles of Economics* (Macmillan, London, 1890, 1920) déclare ceci en termes de « principe de continuité". Voir également M. H. Krieger; J. Poll. *Anal. Management* **5**, 779 (1986). Un autre exemple de la manière de rendre le monde adapté au physicien est le récent intérêt pour le « chaos », un moyen d'appréhender les aspects de phénomènes « non linéaires » insolubles dans une forme que les physiciens peuvent manipuler de manière conventionnelle.

26 Dupree, référence 10.

27 M. H. Krieger, *Fundam. Sci.* **2**, 425 (1981).

28 S. Traweek a décrit ce processus pour le champ de la physique des particules élémentaires aux Etats-Unis et au Japon. Voir son livre à paraître, *Particle Physics Culture* (Harvard University Press).

exemples qui ressortent lorsqu'un point doit être transmis ? Comment l'erreur et la surprise sont-elles traitées ?²⁹

Un des développements intéressants en physique durant ces dernières décades a été l'émergence d'équipes de recherches importantes et de la bureaucratie, celle concomitante de l'utilisation de détecteurs standardisés et l'accroissement des programmes qui manipulent les symboles. Ce qui était jusqu'alors un artisanat est maintenant manufacturé. Comment le travail de la science a-t-il été modifié à l'âge de la reproduction mécanique ?³⁰

Le travail scientifique est un artisanat qui demande des compétences. La trousse à outils d'un physicien n'est que le début de la description de ce que fait le scientifique, comment il le fait et comment cela est relié à la structure de la nature telle qu'il la découvre.

Remerciements

J'ai commencé cet article au National Humanities Center à la Van Leer Jerusalem Foundation. Les travaux plus récents ont été soutenus par l'Exxon Education Foundation par une bourse de "Science, Technology, and Society Research fellowship" au Massachusetts Institute of Technology et par la "Russell Sage Foundation".

Reproduit avec la permission de l'American Journal of Physics **55** (11), November 1987 PP. 1033 - 1038

Note du traducteur

i Nous n'avons pas traduit le mot anglais "pattern" par modèle ; nous avons réservé ce mot pour la traduction de "model". Nous avons également traduit "patterned" par "structuré".

ii "diagrammatic tools" a été traduit par outils "pour faire des diagrammes". Nous avons choisi de traduire diagram et diagrammatic par le même mot "diagramme" et non par deux mots différents "diagramme" pour le nom et schématique pour l'adjectif.

iii Ici nous avons traduit "pattern" par patron car le mot structure est déjà utilisé

iv [*coaching* en anglais]

29 Peierls, référence. 4; C. Bosk, *Forgive and Remember* (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1979).

30 W. Benjamin, *Illuminations* (Schocken, New York, 1969).