Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

18-2 | 2014

**Hugo Dingler et l'épistémologie pragmatiste en
Allemagne**

Sur l'histoire et l'essence de l'expérience

Hugo Dingler

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/935>

DOI : 10.4000/philosophiascientiae.935

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 15 juin 2014

Pagination : 33-56

ISBN : 978-2-84174-672-9

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

Hugo Dingler, « Sur l'histoire et l'essence de l'expérience », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 18-2 | 2014, mis en ligne le 15 juin 2017, consulté le 04 novembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/935> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.935>

Tous droits réservés

Sur l'histoire et l'essence de l'expériment*

Hugo Dingler

Traduit par un collectif de l'« Académie Helmholtz »,
Nancy (France)

Résumé : Traduction de l'essai de Hugo Dingler : *Über die Geschichte und das Wesen des Experiments*, 1952, Munich : Eidos Verlag [Dingler 1952], réalisée par un collectif de l'« Académie Helmholtz ».

Abstract : Translation of Hugo Dingler's essay: *Über die Geschichte und das Wesen des Experiments*, 1952, Munich: Eidos Verlag [Dingler 1952], by a collective of the "Helmholtz Academy".

L'expériment est le moyen d'investigation le plus important des sciences de la nature. C'est pourquoi il est particulièrement séduisant de retracer le chemin qu'il a emprunté au cours de l'histoire pour atteindre aujourd'hui son degré supérieur de formation. Je me permets d'abord de faire quelques remarques sur l'objet de mon exposé†.

On peut considérer et faire de l'histoire de manières très diverses : à chaque fois d'après le point de vue selon lequel on sélectionne les circonstances historiques prises en compte (ce que l'on nomme les faits [*Tatsachen*]). Écrire l'histoire, c'est faire sans cesse un choix. Chaque suite d'événements en elle-même, comme processus réel, est inépuisable. Elle contient en effet tant de détails qu'il n'est jamais fondamentalement impossible de les noter et de les citer tous. Chaque suite réelle d'événements n'est donc jamais complètement conceptualisable et ne peut par conséquent jamais être traitée de manière rationnelle. Elle est en dernière instance irrationnelle. Aussi l'histoire ne peut-elle traiter en mots que des circonstances partielles. Cela est particulièrement évident, lorsqu'il s'agit de processus intellectuels accomplis par les hommes

Philosophia Scientiæ, 18 (2), 2014, 33–56.

*. Sur le choix du mot « expériment », cf. l'article de ce numéro de la revue qui est consacré à ce néologisme p. 95–104.

†. Les ajouts, provenant du collectif de l'« Académie Helmholtz », sont signalés dans le texte par des crochets [] et, pour les notes explicatives, par un symbole * ou †.

dans l'histoire. Il est impossible de mettre parfaitement au clair les processus actuels dans un cerveau humain, et *a fortiori* ceux du passé.

Dans l'histoire des processus scientifiques, comme par exemple dans le cas de l'expérience, d'autres circonstances spécifiques entrent en compte.

Bien entendu, on peut se contenter également de recenser les faits dans l'ordre chronologique. On peut constater que, par exemple, le thermomètre ou l'horloge furent inventés en telle ou telle année, ou encore que l'électromagnétisme ou l'effet photo-électrique furent découverts en telle ou telle année. Edmund Hoppe a rédigé une histoire de la physique qui est largement tributaire de cette forme d'exposé. C'est ainsi que se créent des ouvrages de référence excellents, pour ainsi dire des annales. Nous pouvons nommer cette forme d'histoire, « histoire de dates ».

On peut cependant concevoir l'histoire de la physique d'une manière encore différente.

Prenons par exemple le constat selon lequel les Grecs ne possédaient pas de dynamique, ou, dit plus clairement qu'ils n'étaient pas parvenus à élever leur dynamique au degré de synthèse atteint par Archimède dans la statique. C'est là une proposition qui, prise comme simple donnée historique, nous dit trop peu. Il en va de même des propositions qui nous disent que la dynamique synthétique fait son apparition avec Galilée, Huygens et Newton, ainsi que la chimie moderne avec Lavoisier. Il va de soi que, face à ces exemples d'histoire de dates, on est conduit à se demander pourquoi il en fut ainsi. Pourquoi donc les Grecs ne sont-ils pas parvenus à une authentique dynamique ? Pourquoi a-t-il fallu attendre Galilée pour en obtenir une ? Pourquoi la chimie analytique en son sens le plus plein n'a-t-elle été possible qu'à partir de Lavoisier ?

Ces interrogations font ainsi partie de l'histoire scientifique. En revanche, elles ne se rapportent pas à de simples dates, mais à des relations causales et logiques ou systématiques entre dates différentes. Cette dernière forme d'interrogation historique, nous voulons la qualifier d'« histoire explicative ». Il est clair que c'est elle qui recèle l'authentique problématique historique. L'histoire des dates nécessite également l'étude exacte des sources et la « critique historique ». Mais l'histoire explicative a besoin de plus. Elle a besoin de connaître les régularités, les rapports internes entre processus historiques.

La pratique exclusive de l'histoire des dates, dans l'idée qu'il s'agit là de la vraie histoire, découle aisément de certaines convictions épistémologiques et métaphysiques souvent inconscientes. Par exemple, de la croyance que des relations internes entre dates n'ont pas d'existence, et que cela n'importe donc pas. Cette opinion fleurit par exemple sur le terrain d'un empirisme total, pour lequel la nature est ainsi faite que l'on peut en dégager les lois particulières les unes tout à fait indépendamment des autres.

L'histoire explicative ne peut se construire qu'à partir d'investigations détaillées très précises. Seules ces investigations peuvent nous dire si et comment les méthodes et les opérations des sciences de la nature entretiennent des liens internes. Dans le cas qui nous intéresse, cela revient à nous demander si certains

expériences entretiennent des relations entre eux ou avec certains processus intellectuels.

Seul un mode de recherche « méthodique » peut former le socle à partir duquel nous pouvons nous attaquer à l'histoire de l'expériment de manière réellement significative.

Nous serons alors peu ou prou obligés de mener, à côté et avant son histoire, une sorte d'enquête sur les principes de l'expériment, et de poser la question de la méthode, de la structure interne et du sens de celui-ci.

On pourrait supposer que cela se produit coûte que coûte dans la physique théorique. Car celle-ci subordonne les uns aux autres les résultats des mesures, au travers d'équations, mais aussi au travers de calculs numériques à partir de théories et d'hypothèses. Mais c'est là cependant un procédé plutôt indirect.

Une recherche portant sur les liens immédiats existant entre expériences serait beaucoup plus directe et concrète. Pour cela toutefois, l'expériment doit être examiné comme action concrète, et pas seulement d'une manière théorique comme une relation éventuellement numérique de ses résultats avec ceux d'un autre expériment, comme on l'entend en physique théorique.

Ce point de vue ne vient, hélas ! jamais à l'esprit des chercheurs qui s'attachent à la théorie de l'expériment.

André Lalande, professeur à la Sorbonne, a écrit en 1929 un ouvrage des plus remarquables, *Les Théories de l'induction et de l'expérimentation*, dans lequel il a, avec une érudition et une acribie étonnantes, discuté les conceptions qui ont été avancées à propos de l'expériment. Il traite des possibilités des hypothèses et des théories, de leur psychologie, de leurs méthodes, de leur rapport à la réalité, des problèmes de l'induction et de ses présupposés. Mais à aucun endroit et à travers aucun mot n'apparaît l'idée que l'on pourrait analyser la structure de l'expériment en soi. Il en va de même pour d'autres chercheurs dans ce domaine, par exemple dans la logique de Wundt, chez Mach, Brunschwig, Duhem, etc. Ces savants s'estiment pleinement satisfaits dès lors qu'ils traitent de l'*experimentum crucis*, des cinq méthodes de l'investigation expérimentale selon Stuart Mill, et ainsi de suite. Ils rédigent de nombreux volumes sur la théorie des probabilités en tant que théorie des « inférences inductives », alors qu'il n'existe simplement qu'un seul calcul des probabilités. Ce sont là des recherches très méritoires, mais elles passent à côté de la structure interne de l'expériment.

Examinons à présent où et sous quelle forme ce que nous qualifions d'expériment est apparu la première fois.

Tout expériment est précédé par l'observation. On en relève deux étapes : l'observation unique et l'observation à répétition. Pour que celle-ci s'imprègne dans la mémoire collective, elle doit être exprimable. Nous supposons que le langage est suffisamment élaboré à cette fin. Nous désignons une observation répétée par le terme d'expérience [*Erfahrung*], *experientia*.

L'étape suivante en est la reproduction factice et intentionnelle, ou encore la restitution de l'observation. C'est alors que nous avons devant nous un

authentique expériment, une *experientia quaesita*, pour parler comme Francis Bacon.

À ces fins, on a besoin d'une combinaison artificielle ou, pour mieux dire, manuelle, de certaines circonstances. À cause de la reproductibilité de l'expérience, il faut pouvoir retrouver les mêmes circonstances d'une fois à l'autre.

Ce à quoi nous avons affaire jusqu'ici est l'« expérience qualitative ». Celui-ci doit être rigoureusement distingué de l'« expérience mesurant » [*messendes Experiment*]. Nous verrons que l'expérience qualitative joue un rôle décisif dans l'Antiquité classique, en opposition complète avec ce qui est avancé dans les ouvrages populaires.

Par contre, ce que nous entendons aujourd'hui par recherche expérimentale consiste largement en expériences mesurantes. Ceux-ci étaient pratiquement inconnus des Grecs. La raison n'en est pas une limitation de leur esprit, comme cela a été souvent affirmé par la suite. Les raisons étaient plutôt de nature très concrète, comme nous allons nous en apercevoir.

On peut citer un très grand nombre d'exemples d'expériences qualitatives dans l'Antiquité. Je n'en citerai ici qu'un petit nombre.

Nous savons par un disciple de Pythagore, Hippase de Métaponte, autour de 507-506, qu'il aurait fait des expériences acoustiques. En frappant quatre disques métalliques de même dimension, mais d'épaisseurs entretenant certains rapports numériques, il semble avoir produit des accords, de même qu'en frappant des vases en terre cuite remplis d'eau à des hauteurs différentes. Il aurait ainsi prouvé que les harmoniques sont déterminées par certains rapports numériques (Diels, *Présocratiques*).

Aristote raconte qu'Anaxagore (500-428) et d'autres, « qui apportent des preuves à l'aide d'expériences », impriment une torsion à des vessies animales pour montrer que l'air est quelque chose et peut exercer une force.

Le médecin Alcmeon de Crotone (tournant v^e-vi^e siècles) observe que l'eau gelée, quand elle fond, occupe un espace plus réduit et tire certaines conclusions de cette observation.

Straton de Lampsaque (340-269), dans son écrit *Du vide*, apporte des preuves expérimentales concernant la possibilité, c'est-à-dire l'existence « artificielle » du vide ainsi que la corporéité de l'air. Lorsqu'on pompe l'air d'une bouteille vide, elle reste collée aux lèvres et se remplit en partie de liquide sous l'eau. Si l'on perce un trou dans le fond d'un récipient, qu'on bouche ce trou avec le doigt et qu'on immerge le récipient avec le trou vers le bas dans l'eau, le récipient chasse l'eau ; si l'on retire le doigt du trou, l'air s'échappe vers le haut.

Le médecin Éristrate (305-240) enferme un oiseau dans un récipient métallique, et le pèse après l'avoir affamé, avec les excréments. Mais il découvre que du poids s'est perdu.

Dans le *Corpus* hippocratique, une collection d'écrits datant de la fin du v^e et du début du iv^e siècle, il est rapporté entre autres choses un expérience dans lequel un récipient est fixé sur un petit concombre afin que le fruit y

croisse à l'intérieur. En outre, les stades du développement de l'embryon du poulet sont constatés en fonction de la durée d'incubation.

Platon et Aristote ont parfois raillé les expérimentateurs, quoique le second ait manifestement eu affaire à des expériences. La suite de notre exposé va expliciter cette attitude. Pour la position actuelle, ceci est moins compréhensible, car elle considère l'expériment comme une instance de contrôle pour toute notion scientifique ou hypothèse.

Nous sommes entre autres redevables à feu le botaniste G.[ustav] Senn de Bâle, pour ses recherches détaillées sur notre sujet¹.

L'étape suivante, après l'expériment qualitatif, est l'expériment mesurant.

Ce n'est plus une simple observation de la nature ou une série d'observations répétées ou artificielles. Ici intervient un élément tout à fait nouveau, à savoir la mesure*. La mesure se fait au moyen d'un instrument de mesure. Or, celui-ci n'est maintenant plus la nature, mais tout d'abord un produit de l'homme. Et ceci non pas seulement du fait que la mesure ou l'unité de mesure relève d'une définition toute conventionnelle. Nous allons bientôt voir que l'instrument de mesure est également, dans un autre sens significatif, le produit de l'homme.

On pourrait croire que pour chaque expériment à effectuer, l'instrument de mesure se présente pour ainsi dire de lui-même dans la nature. Mais un rapide coup d'œil dans les laboratoires nous apprend déjà qu'il n'en est rien. Bon nombre de processus étaient connus bien avant qu'on puisse les mesurer.

On doit donc, dans l'examen de l'expériment mesurant, considérer d'abord de plus près l'acte de mesurer en tant que tel, et avant tout la manière dont les instruments de mesure sont conçus. Il nous faut d'abord examiner s'il s'agit là d'un « système ». Pour cette raison, nous nous pencherons d'abord sur l'examen de ces rapports métrologiques qui interviennent le plus souvent et qui sont de nature spatiale. Ils sont toujours, d'une manière ou d'une autre, partie prenante de chaque mesure†.

Nous avons reconnu ci-dessus l'importance capitale de la reproductibilité de tout expériment, c'est-à-dire de la reproductibilité de ses circonstances, éléments ou conditions. Si ces éléments sont des choses qui, dans la vie quotidienne, sont presque entièrement reconnaissables et univoques, nous pouvons procéder à la répétition d'expériences. Si l'on dit : prends un morceau de fer, un morceau de bois, un verre d'eau, etc., ces éléments sont qualitativement reproductibles. Mais on reconnaît qu'avec de tels éléments, on ne peut effectuer que des expériences qualitatifs. Avec des choses que l'on a sous la main

1. Cf. „Über Herkunft und Stil der Beschreibungen von Experimenten im Corpus Hippocraticum“, *Sudhoffs Archiv*. „Die Entwicklung der biologischen Forschungsmethode in der Antike und ihre grundsätzliche Förderung durch Theophrast von Eresos“, *Veröff. d. Schweiz. Ges. f. Gesch. d. Medizin u. d. Naturwiss.*, VIII, Verlag v. Sauerländer & Co, Aarau, 1933, 262 S.

*Ici, « mesure » signifie « acte de mesurer ». Une autre signification sera précisée par une note.

†Ici, « mesure » désigne le résultat du processus.

et que l'on peut nommer dans le langage quotidien, on ne fait que des expériences qualitatifs.

Si nous posons la question de la genèse historique des instruments de mesure spatiaux, de la mise en forme spatiale en général ou du géométrique, il existe à ce propos, hélas ! bien peu de renseignements. La mesure spatiale a besoin de toute évidence de formes géométriques, par exemples de plans, droites, cercles, et les instruments de mesure spatiaux doivent s'en servir. D'où viennent ces formes géométriques ?

Le directeur du musée du Proche-Orient à Vienne, le professeur Victor Christian, répondit le 4 mai 1929 à une question que je lui avais posée : le mode de construction originaire en Mésopotamie semble avoir été de saisir de l'argile de ses deux mains et de poser ces morceaux [*Batzen*] l'un à côté de l'autre. Par la suite, on les prépara sur un support plan. La face supérieure demeura courbée, les bords étaient arrondis. La forme rectangle fit ensuite son apparition, mais la face supérieure demeura courbe (briques de plan convexe). La courbure disparaît progressivement. Et après Eanatum de Lagash, la face supérieure devient plane elle aussi. Sous la dynastie d'Akkad (2684-2488), enfin, apparaissent les briques rectangulaires.

On s'imagine que le succès des briques parallélépipédiques consiste en ceci qu'elles peuvent toujours s'entasser les unes sur les autres sans interstice. Si elles sont parallélépipédiques, elles peuvent à la fois être disposées les unes à côté des autres et les unes sur les autres sans interstice. Cette possibilité de pouvoir se juxter sans interstice dans toute position est caractéristique de la propriété du plan, propriété qu'il ne peut partager avec aucune autre surface par laquelle il peut donc être défini de manière univoque.

On observe très tôt des plans qui sont fabriqués par des tailleurs de pierre. Si l'on analyse la manière dont un tailleur de pierre produit aujourd'hui encore un plan, on découvre que cette façon de procéder est probablement la même que celle adoptée d'emblée. Le tailleur de pierre se sert de sa règle*, que l'on pouvait obtenir dans des circonstances primitives par le rabotage réciproque de deux morceaux de bois. Si le tailleur veut obtenir sur une pierre une surface plane, il s'assure d'abord du bord, qui est taillé d'après la règle. Mais par la suite, il travaille la surface interne au moyen d'un marteau à pointe, d'un marteau à dents, d'un marteau aplatisseur, etc., en ne cessant d'appliquer la règle.

Si l'on pose la question de savoir ce qu'est un plan, nous trouvons chez Euclide, dans le premier livre des *Éléments*, une définition qu'il n'utilisa plus par la suite et avec laquelle les savants n'ont jamais su au juste quoi faire. Elle s'énonce comme suit : le plan est la surface qui est également comprise entre ses droites. Si nous comparons cette définition avec ce que nous avons appris à l'instant des tailleurs de pierre, il s'avère qu'Euclide a repris sa définition des tailleurs de pierre.

Comment ce problème se présente-t-il à nous aujourd'hui ?

* Ici : niveau.

Allons dans un magasin de matériel pour dessinateurs, comme il s'en trouve à proximité de toutes les écoles polytechniques et des collèges, et demandons, p. ex., une équerre. Se pose donc la question de savoir comment cette droite a été obtenue. Évidemment à l'aide d'une glissière en acier, d'après laquelle elle a été taillée. Mais d'où la glissière en acier tient-elle sa rectitude ? Si l'on continue à poser les questions de cette manière, on reconnaît que tous ces instruments proviennent d'autres instruments. Les plus anciens doivent évidemment être les plus précis. La droite la plus précise, le plan le plus précis doivent donc exister à l'origine.

Imaginons un homme voulant monter une fabrique d'outils de précision et d'appareils de mesure. S'il ne veut pas acquérir par achat des étalons, dont il ne sait pas s'ils possèdent l'ultime précision, il doit lui-même recommencer à zéro. Comment s'y prend-il ? Il doit produire le plan le plus précis servant de mesure à tous les autres, et à l'aune duquel la précision de ces derniers est mesurée. Si l'on demande à un tel homme comment il s'y prend, on apprend la chose suivante :

On prend trois plaques d'acier grossièrement arasées *a*, *b* et *c*, et on les rabote réciproquement l'une contre l'autre deux par deux, jusqu'à ce qu'elles soient adhérentes. Si l'on ne prenait que deux plaques, on encourrait le risque d'obtenir deux surfaces sphériques (calottes). Dans le cas de trois plaques, il résulte une surface dont un côté est superposable à lui-même [*aufeinanderlegbar*]. *a* peut être posée sur *c* et *b* sur *c*, et donc également *a* sur *b* (procédé des trois plaques). Ce procédé est utilisé par tous les ateliers de mécanique de précision, ainsi par exemple par la firme Zeiss.

Mais – c'est une circonstance historique bizarre – cela ne s'est produit que depuis peu. Otto Mahr, l'historien de la technique bien connu, a constaté que c'est l'ingénieur anglais Maudslay* (1771-1831) qui a découvert le procédé.

Sir Joseph Whitworth (1803-1887), un mécanicien anglais, a construit pendant des décennies les meilleures machines-outils du monde en utilisant le procédé de Maudslay. Il tint en 1840 à Glasgow, devant l'Association britannique, une conférence sur la production des plans pour la construction des machines. Cette conférence est publiée dans le volume 34 du *Mechanics Magazine* de 1841 (aux pages 39-42) sous le titre de « On the metallic surfaces and the proper mode of preparing them ». Whitworth inventa également le système qu'on a nommé après lui système de filetage.

M. Mahr m'écrit ceci dans une lettre datée du 11 février 1952 :

Il s'agit de l'histoire des instruments de mesure astronomique de I. A. Repsold, *Geschichte der astronomischen Meßwerkzeuge*, Leipzig, 1908. Il y est rapporté à la page 88 que Jacques-Dominique Cassini (1748-1845), le quatrième de la célèbre dynastie des Cassini, a dirigé de 1784 à 1786 la construction d'un cadran de sept pieds et demi à l'Observatoire de Paris. « Deux

*L'auteur a diversement orthographié le nom de l'ingénieur anglais Henry Maudslay. Nous rectifions si nécessaire.

blocs de marbre, le premier d'une surface de sept pieds et demi sur sept pieds et demi, l'autre d'une surface de quatre sur quatre, furent dressés sur l'une des voûtes de l'infrastructure », « dressés et polis à la manière des glaces » ; ils devaient tenir lieu de disque de pointage [*Richtscheibe*]. À cette même fin, trois tringles d'acier de huit pieds de long furent polies les unes contre les autres des mois durant.

C'est une indication indubitable sur le procédé des trois plans, mais je ne crois pas, vu l'état lamentable de la construction des instruments à l'époque en France, que ce procédé ait pu se développer en France. Cassini lui-même était en relation avec Jesse Ramsden (1735-1800), le grand facteur d'instruments anglais, auquel il a rendu visite en 1787 et dont il obtint la promesse que les mécaniciens français seraient autorisés à être formés dans ses ateliers. Je pourrais donc supposer que le procédé des trois plans est d'origine anglaise et qu'il fut développé à travers la construction d'instruments astronomiques, et peut-être même par Jesse Ramsden lui-même, qui s'était fait un grand renom en tant que mécanicien et opticien et qui était obligé pour la construction de ses machines auxiliaires à un travail inconnu dans tout autre domaine de la technique. On peut néanmoins se poser la question de savoir si le procédé des trois plans a été appliqué tout d'abord pour la partie mécanique ou pour la partie optique des instruments astronomiques.

Ramsden était le gendre de l'important opticien John Dollond (1706-1761), qui connaissait peut-être déjà lui aussi la méthode des trois plans. Dans Poggendorff*, t. I de 1863, col. 587, est évoqué, parmi ses autres prestations, ceci : objectif constitué de lentilles plan-convexes pouvant coulisser l'une sur l'autre. Là où je suis, je ne trouve rien de publié sur cette question.

Lorsque je vous écrivis précédemment qu'Henry Maudslay avait inventé le procédé consistant à construire des surfaces exactement planes par ponçage réciproque de trois plaques planes, il fallait entendre par-là la reprise d'un procédé déjà développé antérieurement dans la facture d'instruments de précision, dans le cadre de la construction de machines en général.

La construction de ces plans fut d'abord une procédure purement pratique. Examinons à présent ce qu'il faut en dire d'un point de vue conceptuel. Nous effleurons nécessairement l'aspect conceptuel dès que nous appelons « plan » le résultat de ce procédé. Le concept de plan se définirait donc ici par un procédé, par une opération, par un faire actif, et non pas en premier lieu par des mots, comme nous en avons l'habitude.

* Voir la bibliographie en fin de traduction, [Poggendorff 1863].

Cependant, ce n'est pas seulement le comportement des mains qui est essentiel pour la signification de cette activité. Derrière la procédure des trois plaques se cache plutôt ce que nous appelons une « idée ». À savoir, une exigence intellectuelle qui dépasse de loin ce que nous sommes en mesure d'exécuter manuellement à un moment donné.

Cette idée recèle ceci. Premièrement, la pensée que l'exécution de cette procédure se fait toujours plus soigneusement et plus finement ; deuxièmement, que le grain du matériau est toujours plus fin ; troisièmement, que les plaques se comportent au cours du temps d'une manière toujours plus constante, de sorte qu'elles ne subissent plus aucune modification ; quatrièmement, que l'on pourrait considérer le procédé comme exécuté quelle que soit la dimension des trois plaques, celle-ci pouvant aller jusqu'à l'infini.

Si nous pensons que ces quatre exigences sont remplies dans une perfection absolue et idéale (seule la pensée permet d'effectuer ceci), alors nous saisissons l'idée sur laquelle repose le procédé. C'est cette idée-là qui est visée par le mot « plan ». Personne n'ayant jamais aperçu un tel plan, cette idée ne peut donc jamais être une vraie représentation. Elle est par conséquent une représentation non-intuitive qui se constitue à partir de réminiscences de surfaces planes auxquelles s'ajoutent les exigences précitées. Pouvoir en principe penser de cette manière est un don que nous portons d'emblée en nous. Mais c'est seulement ce don que nous apportons, et non pas l'idée de plan en tant que telle. Cette idée doit d'abord avoir été trouvée, ne fût-ce que peu à peu, quelque part, comme nous l'avons vu tout à l'heure chez les Babyloniens.

Il est certain que la parfaite réalisation de cette idée est impossible. Même si une telle réalisation devenait une fois effective, nous ne serions pas en mesure de nous en apercevoir car, pour cela, il faudrait pouvoir atteindre une exactitude d'observation infiniment subtile, par exemple au moyen d'un microscope infiniment fin. Chaque réalisation de l'idée ne peut donc être qu'une étape intermédiaire sur le chemin vers l'idéal, tandis que la réalisation achevée se situe dans l'infini : elle est inaccessible. En revanche, les étapes intermédiaires se laissent ordonner, selon une sorte d'ordre linéaire, si bien que chaque étape de réalisation est plus exacte que les précédentes.

Le procédé des trois plaques constitue donc une définition « pratique, manuelle ou opératoire » du plan. Ceci est quelque chose de nouveau et d'inhabituel. Mais, bien entendu, la définition n'est effective que si l'on y ajoute l'idée. Les seules opérations ne sauraient définir le plan, car on ne peut, à partir d'elles, savoir jusqu'où il est nécessaire d'aller dans le procédé.

L'ajout de l'idée rend souhaitable en outre une formulation langagière qui seule permet de communiquer à l'autre quelle est l'intention de mon opération et quelle est sa visée. L'observation seule ne permet pas à autrui d'atteindre la moindre certitude sur ce que je vise. Même la *vox populi* s'exprime ici à juste titre en disant : « Quelle est l'idée de la chose ? », ou plus souvent encore en anglais : « What is the idea ? » C'est pourquoi la simple imitation « aveugle » ne conduit le plus souvent qu'à des échecs. J'aime à mentionner ici une caricature d'Oberländer. Un paysan voit un joueur de trombone dans une fanfare.

Quand le trombone actionne la partie inférieure de son instrument, le paysan s'exclame tout d'un coup : « c'est bien le diable s'il n'arrive pas à enlever la chose », le dit, et l'arrache. Il avait bien observé l'action, mais lui avait attribué un faux « sens ».

Nous devrions ainsi essayer de mettre des mots sur l'idée de plan : raboter trois plaques de matière dure de dimension quelconque mutuellement, de telle sorte qu'elles adhèrent complètement, ou que les deux côtés des surfaces ainsi produites soient entièrement congruents et indiscernables en chaque point. Mais ceci est exactement la propriété du plan que les anciens Babyloniens avaient découverte en produisant des briques.

Cette définition du plan coïncide ici avec une « consigne de production ». En outre, il résulte pour des raisons de logique qu'il doit être possible de déduire de cette définition toutes les propriétés du plan, étant donné que la consigne représente une détermination complète et univoque du plan. Dans un certain sens, cette définition joue en même temps le rôle d'un axiome, mais autrement que le concept d'axiome n'avait été compris jusqu'à maintenant.

Il est clair également que l'on va définir l'intersection de deux plans comme « droite ». De fait, cette définition est également une consigne de production. On sait en outre de la géométrie théorique que les deux notions de plan et de droite ne sont pas suffisantes pour définir univoquement toute la géométrie ; elles ne donneraient que la géométrie dite projective. Il manque encore l'élément qui est représenté dans la géométrie théorique par l'axiome des parallèles. À cette fin, on définit par exemple que dans une bande à bords parallèles sur un plan (dont les deux extrémités sont indiscernables), toutes les distances doivent être identiques. Cette définition signifie en même temps la détermination de ce qu'on appelle les corps indéformables. En effet, dans les fabriques de mécanique de précision, la fabrication d'un corps indéformable est toujours vérifiée par ces critères.

Voici donc la géométrie. En effet, on peut obtenir par ces définitions les axiomes connus de la géométrie et, naturellement, en déduire la géométrie tout entière. Seuls les axiomes de continuité ne sont contenus ici que de manière implicite. Et ce qui en résulte est ce que l'on appelle la géométrie euclidienne. Elle est en effet la seule qui puisse être définie de manière purement qualitative et sans employer de mesure.

La procédure logique consiste en ceci que, dans cette dérivation, les concepts qui interviennent dans les définitions sont progressivement éliminés en formant les concepts géométriques habituels. En fin de compte ne sont encore en usage que les axiomes connus, de sorte que la géométrie en résulte.

Ce que nous avons fait ici est la chose suivante : nous avons pour ainsi dire esquissé la structure de la géométrie technique, c'est-à-dire de cette géométrie qui est effectivement utilisée dans la mécanique de précision comme elle est pratiquée dans les ateliers et dans les fabriques. Voici donc la géométrie de la réalité. Une analyse exacte des actions qui conduisent à la fabrication des appareils de précision montre que cette géométrie technique « est contenue partout ou s'y cache ».

Il s'agit en même temps de la seule façon dont, dans la réalité, la géométrie peut émerger en lien avec l'idée qui lui est associée. En effet, les seules occasions en sont les circonstances géométriques que nous avons nous-mêmes produites. Toutes les circonstances qui sont trouvées naturellement, et où ce lien semble effectif, ne sont pas sûres, car nous ne savons pas avec certitude quelle forme géométrique est « visée ». Ce savoir ne peut provenir que de nous.

Les procédés techniques que j'ai exposés sont complètement déterminés par leur simplicité et leur symétrie, de sorte que l'on ne peut pas les abandonner, quand bien même on le voudrait, tant qu'on vise une géométrie univoque sur une base qualitative. Il est évident que l'on peut construire la géométrie seulement sur une base qualitative, puisqu'il n'existe pas de possibilité de mesure avant sa construction. Mais ceci est accompli exclusivement par la géométrie euclidienne. On ne peut imaginer aucune occasion par laquelle on serait forcé de faire intervenir une modification dans ces procédés ; et en effet, depuis que l'on produit des outils de précision, l'application technique n'a jamais dévié sa démarche.

Sur la base de ce constat, nous sommes en mesure de pénétrer un peu plus avant dans la nature de l'expérience mesurant.

Nous avons vu que le point décisif consistait en la reproductibilité des circonstances. Dans la réalité de la nature, il n'existe toutefois nulle part une constance [*Konstanz*] garantie. Il existe certes assez de constances pratiques, mais il n'existe aucune certitude quant à l'exactitude, il n'existe pas même un étalon pour une constance dans la nature. Mais lesquels, parmi les corps qui apparaissent dans notre perception comme constants, sont véritablement constants ? La nature ne peut nous apporter de réponse car notre perception et notre mémoire ne sont pas assez précises.

C'est à cet endroit que nous saisissons le sens de la géométrie technique qui est fondée sur des idées. Car c'est elle qui nous livre un étalon de la constance de toute figure et de toute forme.

Une sentence de Helmholtz est fort appropriée ici. Dans son article « Über die Tatsachen, die der Geometrie zugrunde liegen » (*Göttinger Nachrichten* 1868), il dit :

Qu'est-ce qui dépend [dans la géométrie] [...] seulement de la définition, de la conséquence de la définition, ou encore de la forme de présentation ? Il n'est à mon avis pas simple de répondre à cette question, étant donné qu'en géométrie, nous avons affaire à des formes idéales, dont les représentations sensibles sont toujours des approximations aux exigences conceptuelles, et étant donné que nous ne pouvons décider si un corps est solide, si ses surfaces sont planes, si ses arêtes sont droites qu'au moyen des mêmes théorèmes dont la validité effective doit être amenée par la démonstration.

Mais ni Helmholtz ni personne n'a tiré les conséquences de ce constat.

Quand nous réalisons des corps qui, entre eux, obéissent aux lois de la géométrie, et si nous les mettons constamment à l'épreuve, nous avons affaire à des corps spatiaux, invariables par rapport à leur forme et indéformables. Plus ces corps obéissent aux lois de la géométrie, plus leur indéformabilité est réalisée.

La géométrie technique est la réalisation d'idées, mais non pas le résultat de mesures ou d'expériences. Nous le reconnaissons à partir de leurs définitions. Il est évident que pour effectuer une mesure de ce genre, je dois avoir plus ou moins consciemment pris une décision quant à la définition du corps indéformable, car celle-ci m'est nécessaire pour la mesure. On peut donc procéder dans un domaine exact seulement si l'on réalise le corps indéformable par la géométrie, c'est-à-dire par la réalisation de son idée. Avec ce corps indéformable, on mesure alors les autres phénomènes naturels.

Il en découle la compréhensibilité du fait que toute géométrie qui se cache dans nos instruments de mesure est, pour tous les temps, la géométrie technique. Mais les idées dominent cette géométrie non seulement dans le présent, mais encore pour tout avenir. En tant qu'idées, elles sont conçues avec une exactitude infinie, et ne peuvent jamais perdre leur rôle régulateur, c'est-à-dire pas même dans le cas d'une avancée dans l'exactitude technique. Les réalisations ne sont certes que d'une exactitude finie, mais celle-ci croît, dans son ensemble, dans la direction d'une exactitude plus grande. Les rapports présentement effectifs sont évidemment, dans le détail, d'une grande complexité. Là est peut-être la raison pour laquelle ils ont été négligés du point de vue théorique.

C'est intentionnellement que j'ai traité de la géométrie avec un peu plus d'ampleur, et en particulier en choisissant une direction telle qu'elle entre en ligne de compte pour tout expérience. Mais c'est pratiquement la seule manière pour la géométrie de devenir actuelle pour nous, à savoir de manière constructive. C'est d'elle que vit toute la technique. Car c'est seulement par le moyen de nos dispositifs techniques que la géométrie exacte est introduite dans la réalité.

S'il y a quelque part le devoir de fixer, dans la réalité, certaines circonstances avec la plus grande précision, ou de les reproduire, il est évident que cela ne peut se faire qu'au moyen de la géométrie technique. Ce devoir est au commencement de tout expérience précis et mesurant. Et nous reconnaissons ainsi que ce que nous avons nommé géométrie technique est une condition préalable de tout expérience mesurant.

Et en même temps, nous avons atteint un autre point historique décisif, à savoir celui où ce que l'on appelle technique de précision moderne a son point d'origine. Nous avons vu plus haut comment, les premiers, les mécaniciens anglais se sont impliqués de manière décisive. Maudslay et Whitworth ont été les premiers à avoir développé des procédés qui rendaient possible la production en masse d'objets identiques avec une précision et une exactitude garanties de l'ordre du centième de millimètre. Si nous considérons la façon dont étaient produits auparavant les instruments de précision, si toutefois on en

construisait, nous remarquons qu'il s'agissait toujours de pièces uniques, manufacturées avec une habileté technique particulière. Beaucoup d'astronomes ont construit leurs instruments eux-mêmes jusqu'au début du XIX^e siècle, ou les ont fait construire individuellement par un mécanicien très habile, ce qui se produit dans des cas exceptionnels encore aujourd'hui.

Le Musée allemand de Munich offre assez d'exemples de ce qui vient d'être dit et conserve dans beaucoup de cas des appareils originaux. Ce n'est qu'à partir de l'époque de Maudslay et Whitworth que nous tombons sur la fabrication en série. Chaque technique peut être utilisée à des fins bonnes ou à des fins mauvaises. En tant que conséquence néfaste, cette percée a rendu possible la production en masse d'armes automatiques, chose irréalisable avant cette époque. D'autre part, ce n'est qu'à présent qu'il est devenu possible de produire des moteurs de précision, des appareils de photographie modernes avec obturation automatique, un appareil de radio en tant qu'objet populaire. On reconnaît là l'influence extraordinaire de cette révolution sur l'ensemble de notre culture matérielle moderne. Il serait d'un extrême intérêt historique d'étudier en détail le développement de la technique de précision moderne de ce point de vue. L'emploi d'étalons capables de vérifier une fraction de millimètres avec précision est une marque de la technique de précision contemporaine dont nous avons tenté de rendre l'origine transparente à partir d'à peu près 1840.

Je fais cette remarque importante sur la technique de la précision dès à présent, puisque celle-ci repose en première ligne sur la géométrie technique, mais nous aurons bientôt à mentionner d'autres éléments.

À l'aide des moyens ainsi obtenus, on peut déjà entreprendre des expériences faisant appel à des opérations de mesure, qui ne consistent précisément qu'en des mesures spatiales. On peut, par exemple, constater les lois de la corde vibrante, c'est-à-dire des sons, en mesurant les longueurs. C'est ce qu'ont déjà fait les pythagoriciens, en reprenant de l'artisanat les instruments pour la mesure des longueurs. Ceux-ci furent développés sans connaissance des définitions de la géométrie, mais cependant dans l'emploi pour ainsi dire inconscient de celles-ci.

Un autre instrument de mesure à s'être développé sur la base d'idées inconscientes, est la balance romaine. Celle-ci avait atteint une grande finesse chez les Arabes. Al-Khāzinī composa en 1121 le *Livre de la balance de la sagesse*, dans lequel il indique, entre autres choses, le poids spécifique pour cinquante substances, avec une précision atteignant la deuxième décimale, l'équivalent de celle de nos déterminations.

Roger Bacon (1210-1294) a mis en exergue dans son œuvre la *scientia experimentalis* et la *scientia ponderum*. L'importance de la « perception sensible » (*manifestum secundum sensum*) avait en particulier été relevée à plusieurs reprises (Dietrich de Freiberg, Pierre de Maricourt, etc.).

Dans son *De staticis experimentis dialogus*, un dialogue entre un mécanicien et un philosophe, Nicolas de Cusa (1401-1464) présente un programme d'exploration expérimentale du monde à travers la mesure de tous les poids spécifiques. Le programme est partiellement théorique, dans la mesure

où beaucoup de ces poids ne pouvaient pas être mesurés à l'époque. Le poids spécifique était la première voie d'accès, au moyen de la mesure, aux propriétés de la matière.

D'autres expériences recourant à la mesure sur une base exacte n'étaient alors pas encore acquis. Dans la mesure où seule la géométrie de déterminations idéelles était possible, on devait emprunter d'autres déterminations à l'expérience. Ainsi, au ^{xvii}^e siècle, par exemple, le thermomètre et le baromètre étaient disponibles en pièces uniques (Accademia del Cimento, Florence, 1657-1667). Une mesure du temps plus exacte devient possible par la pendule (Huygens 1657). Toutefois le développement ultérieur des montres exactes mord déjà dans la dynamique [*Dynamik*] dont nous allons parler tout de suite.

Enfin, il faut mentionner également le grand propagandiste de la recherche empirique, Francis Bacon (1561-1626), bien que par ses méthodes il s'apparente principalement encore au Moyen Âge.

Où en sommes-nous ? Nous nous sommes rendu compte du rôle de ce que nous pourrions appeler la « géométrie technique » et nous avons trouvé que celle-ci doit jouer un rôle décisif partout où il s'agit de mesures spatiales les plus exactes et les plus univoquement déterminées possible. Nous pouvons dire d'ores et déjà qu'il est clair que ce sera le cas partout où il s'agit d'atteindre une détermination parfaitement univoque et répétable des circonstances. Mais ceci n'est que la première pré-condition de toute expérience faisant appel à la mesure.

En fait, les Grecs en savaient à peu près autant avec Euclide, sauf qu'ils étaient dans l'incapacité d'expliquer comment tout cela se tenait.

Mais une circonstance est d'une grande importance. Pour Platon, le monde des Idées était caractérisé par le fait qu'il possédait la propriété divine de l'immutabilité et donc, de l'éternité. C'est pourquoi il ne pouvait y avoir ni transformation, ni mouvement dans les Idées. Les concepts fondamentaux de la géométrie étaient cependant des Idées. L'unicité, que Platon avait trouvée dans les autres Idées, leur faisait en revanche défaut (il existait par exemple des droites innombrables) et ainsi ces concepts se trouvaient pris entre les Idées et les objets sensibles. Mais il s'agissait d'Idées, qui pour cette raison étaient immuables. Euclide tenta par conséquent dans sa Géométrie de réduire autant que possible la portée du mouvement. Ce n'est qu'à Hilbert que revint l'élimination totale.

On comprend donc tout de suite pourquoi les Grecs ne parvinrent pas à développer une théorie idéelle du mouvement, c'est-à-dire une théorie qui contienne les formes idéelles du mouvement. Car elle n'existait pas encore pour les Grecs. Déjà ce point désamorce beaucoup de reproches superficiels que l'on a faits aux Grecs, par exemple de ne pas avoir découvert la dynamique. Car on ne peut trouver ce qui est impensable.

Naturellement, les Grecs ont également tenté de traiter du mouvement. Aristote nous dit qu'il n'y a pas de concept du mouable. Quand il veut traiter du mouvement, il doit alors le traiter comme s'il n'y en avait pas, comme s'il était quelque chose de statique. De manière étonnante cela lui réussit également. Il

ne le détermine pas en effet de manière directe, mais indirecte, en indiquant son but, son *télos*. La fin, cependant, est une idée statique. Le mouvement devient ainsi une entéléchie, un quelque chose « qui a sa fin en soi ».

C'est seulement dans le Moyen Âge tardif que l'on est parvenu à briser le carcan qui emprisonnait les Grecs. L'ockhamiste Nicolas Oresme, mort en 1381 comme évêque de Lisieux, fut l'homme qui accomplit cela. Avant lui, un mouvement selon Aristote devait être conçu comme un *fluxus formarum*. Ainsi, les formes demeuraient elles-mêmes inchangées de sorte que le mouvement échappait encore à une saisie conceptuelle. Pour parvenir à celle-ci, il aurait fallu saisir le mouvement lui-même au travers des formes. Il fallait ainsi créer des *formae fluentes*. C'est Oresme qui a montré le chemin (voir mon *Histoire de la philosophie naturelle*, Berlin, 1932).

Il dessine un axe temporel horizontal et porte la mesure de la propriété variable, ce qu'il appelle les *intensiones*, par exemple en tant que verticale. La ligne de l'extrémité donne alors la courbe caractéristique de cette variation. Ainsi l'image du mouvement uniforme devient une droite oblique sur l'axe du temps. Oresme donne un grand nombre d'exemples.

Cette courbe est finalement la *forma fluens* que l'on cherchait. C'est une idée, et bel et bien l'idée d'un mode de mouvement déterminé univoquement. Ce qui pour les Grecs était impensable, était ainsi atteint. Enfin la voie était ouverte qui permit une mécanique idéelle, qui n'allait pas tarder à apparaître. Pierre Duhem a su montrer les cheminements par lesquels cette forme de pensée allait mener à Galilée, qui les convertit en fondements formels de sa loi de la chute des corps.

On a souvent pensé (Duhem également, et notre inoubliable Wieleitner) que la contribution d'Oresme devait être conçue comme un premier pas en direction de la géométrie analytique de Descartes. Ce n'est assurément pas le cas. Oresme, par exemple, n'utilise pas le point d'origine des coordonnées. Ce dont il s'agit peut être présenté précisément comme suit : ce fut une percée au-delà de l'interdit qui limitait les Grecs ; ce fut en définitive la création des *formae fluentes*. Aujourd'hui, on pourrait parler d'une sorte de théorie graphique des fonctions.

Mais ce pas puissant n'était pas encore le dernier, ce n'était pas encore la dynamique idéelle elle-même. D'une manière ou d'une autre il devait y avoir quelque chose d'analogue à ce que représente le plan dans la géométrie. On ne trouve encore rien de tel chez Oresme. Il devait y avoir une forme élémentaire – naturellement pas une forme statique comme le plan – mais une forme dynamique. Et de même que le plan réalisé de manière toujours plus exacte devint la base de toutes les constructions spatiales univoques, il fallait que l'analogue se produise avec cette forme dynamique élémentaire que nous nommerons *X*.

Il fallait donc chercher à déterminer la forme *X* de manière idéalement exacte et parfaitement sans ambiguïté. Pour ces déterminations sans ambiguïté, dans la démarche de pensée de l'époque, parallèle à celle de l'histoire, on ne disposait que de la géométrie (sans parler des nombres et du temps).

Il fallait donc déterminer un processus dynamique primitif à l'aide de moyens exclusivement géométriques. Il fallait qu'une configuration déterminée de manière purement géométrique provoque un mouvement primitif. Mais comme les figures géométriques ne peuvent produire aucun mouvement, il fallait attribuer à cette configuration une propriété particulière que nous nommons m (la masse).

Si, d'après ces règles, on envisage les possibilités qui se présentent ici, on trouve quelque chose de très surprenant : la forme X n'est rien d'autre que la forme de la loi de la gravitation de Newton.

On pouvait trouver la forme X grossièrement réalisée dans la chute des corps. C'est une des raisons intrinsèques pour lesquelles, de là, ont suivi d'autres avancées. Ce n'est qu'en 1798 que Cavendish réalisa X de manière directe. Toutefois cette dernière forme directe de X était dans la pratique peu utilisable. En revanche quelques formes déduites de la forme X ont eu des applications extrêmement diverses ; le plan incliné, le pendule, la balance sous sa forme statique, mais surtout les concepts fondamentaux de la dynamique : masse, force, travail, etc. Ce n'est qu'à partir de ce moment que celles-ci ont pu recevoir une définition conséquente.

Newton, dans sa *Philosophia naturalis principia mathematica* de 1686, a entrepris de donner pour la première fois une structure axiomatique à la mécanique, structure qui, assurément, souleva par la suite maintes difficultés. Ainsi, sa définition de la masse a été revue (par exemple par Ernst Mach). La définition de la force comme étant « masse par accélération » fut même considérée à plusieurs reprises comme une loi empirique, ce qui est incompatible avec son statut de définition. Le principe d'inertie fut considéré comme empirique, bien qu'il constitue une conséquence logique immédiate de la définition du concept de force. C'est notamment aussi la question de la base d'orientation [*Orientierungsbasis*] ; c'est-à-dire de ce qui est censé déterminer les mouvements, qui a suscité beaucoup de confusion, une confusion telle qu'on a même tenté de se passer purement et simplement d'une telle base (voir le chapitre à ce sujet dans ma *Methode der Physik*, Munich, 1938).

Si en revanche on part de la forme X elle-même, ce qui correspond à l'ordre logique naturel, on est alors dans la bonne voie. On obtient ainsi aussitôt le concept de force, avec le principe d'inertie et en outre, surtout, le principe de la conservation de l'énergie et la loi de conservation de la quantité de mouvement. Encore un mot à ce sujet.

Une fois posée la définition de la force, de la vitesse et de la trajectoire d'un mouvement uniformément accéléré (conformément au schéma d'Oresme), on obtient les trois équations suivantes :

$$P = ma \quad (1)$$

$$v = at \quad (2)$$

$$s = \frac{1}{2}at^2 \quad (3)$$

où a désigne l'accélération, m la masse et t le temps. Si l'on multiplie les équations (1) et (3) et en introduisant (2), on obtient :

$$sP = \frac{1}{2} m a^2 t^2 = \frac{1}{2} m v^2 \text{ (équation des forces vives).} \quad (4)$$

Considérons le mouvement accompli entre les temps t_1 et t_2 . Soient v_1 et v_2 , s_1 et s_2 les grandeurs correspondantes, et deux constantes a et P . Alors il résulte de (2) et de (3) ceci :

$$\begin{aligned} v_2 - v_1 &= a(t_2 - t_1) \\ s_2 - s_1 &= \frac{1}{2} a(t_2^2 - t_1^2) \end{aligned}$$

et de (4) :

$$P(s_2 - s_1) = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2). \quad (5)$$

En (5) on trouve à gauche les distances parcourues, à droite la différence des carrés des vitesses. Si dans un cas concret les grandeurs s_1 et s_2 , v_1 et v_2 , d'un tel mouvement entre t_1 et t_2 , alors il peut facilement arriver dans la réalité que l'équation (5) ne soit pas satisfaite. v_1 et s_1 sont les données de base qui ne peuvent être fausses. Considérons également s_2 comme réellement donné, alors seule v_2 peut expliquer que (5) ne soit pas vérifiée. Supposons que l'on ait mesuré une vitesse v_x strictement plus petite que la vitesse v_2 qui satisfait l'équation. On obtient alors :

$$P(s_2 - s_1) = \frac{1}{2} [(v_2^2 - v_x^2) + (v_x^2 - v_1^2)] = \frac{1}{2} m(B + A).$$

On dispose ainsi d' $\frac{1}{2}$ de mA pour la mesure, mais pas d' $\frac{1}{2}$ de mB . L'équation (5) n'est donc pas vérifiée. Toutefois, (5) n'est qu'une simple conséquence logique à partir de pures définitions. Il faut donc qu'elle soit vérifiée si nous voulons conserver nos définitions. Nous devons par conséquent forcer leur validité. Ce qui se fait simplement en disant que la part $\frac{1}{2}mB$ (énergie perdue) n'est perdue qu'en apparence.

Nous aurons à considérer les variations qui dans l'environnement de notre processus ont lieu en parallèle avec lui, comme des effets de ce processus, et nous allons assimiler l'énergie qu'elles produisent à l'énergie manquante. Autrement dit, nous allons évaluer cette énergie à partir de la quantité d'énergie manquante. Il est évident que, de cette manière, on dispose d'une capacité de mesure pour tous les phénomènes physiques possibles, dont on ne disposait pas auparavant. Ainsi, les différents phénomènes sont rattachés à nos mesures exactes et, pour ainsi dire, étalonnés. Si on étudie par exemple un frottement glissant, on observe quelle diminution d'un effet mécanique précisément défini le frottement engendre. Puisque l'énergie du processus mécanique non-perturbé est calculable de façon exacte à l'aide des lois fondamentales, on peut déterminer, à partir de la différence entre cette énergie et la grandeur effectivement observée, la quantité de chaleur dissipée.

Il ressort de nos explications que les relations fondamentales de la mécanique, à l'instar de ce qui se passe en géométrie, sont des conséquences de nos définitions idéales, et ne sont donc pas des lois de la nature au sens métaphysique du terme. Il en va naturellement de même pour toutes les déductions logiques tirées de ces relations fondamentales, comme par exemple pour le principe de conservation de l'énergie. À partir de ce dernier, on peut obtenir les lois de la conservation de la quantité de mouvement, auxquelles cette analyse s'applique également (voir *Die Methode der Physik*, Munich, 1938, 158 q.).

Ce que nous disons ici de la mécanique correspond donc exactement à ce que nous obtenions concernant la « géométrie technique » citée précédemment. Cette « mécanique technique », elle aussi, est la conséquence de nos définitions idéelles, et ne contient encore aucune loi de la nature au sens métaphysique du terme.

Toutefois, nous avons préparé le matériel pour nous mettre au clair sur la nature essentielle de tous les expériences exacts de mesure (que j'appelle expériences *M*).

Tous ces expériences pris dans le sens précité, sont de nature technique, car ils se servent nécessairement d'appareils de mesure. Cet état de fait a des conséquences importantes.

Nous avons vu que la géométrie technique et la mécanique technique (au sens où nous l'entendons) ne sont pas des sciences empiriques de la nature, mais des réalisations reposant sur des définitions idéelles. Leurs formulations conceptuelles ont par conséquent la propriété de ne pouvoir jamais être fausses, et de valoir exactement de la même manière pour tous les temps à venir, à l'instar de l'arithmétique. Elles règnent par conséquent de façon illimitée dans toutes les entreprises techniques.

Je voudrais souligner expressément que cela n'empêche bien entendu pas de calculer occasionnellement en mathématiques formelles à l'aide de systèmes formels tout autres, par exemple des systèmes non-euclidiens ou newtoniens. Nos analyses concernent la géométrie et la mécanique techniques, et celles-ci ne sont possibles manuellement que sous leurs formes techniques (car celles-ci seules déterminent sans ambiguïté et d'une manière purement quantitative les opérations de réalisation). Si nous désirons exprimer quelque chose de valable quant à la physique des expériences de mesure exacts, nous devons naturellement prendre en compte la géométrie et la mécanique techniques. Si nous voulons seulement dire quelque chose sur les résultats de mesure, sans prendre en compte les appareils, nous pouvons alors naturellement utiliser des formules non-euclidiennes et non-newtoniennes. Il nous faut toutefois prendre en compte le fait suivant :

Les énoncés qui sont déduits de sciences techniques idéales (pour le dire brièvement) ont pour propriété de valoir pour toutes les réalisations techniques futures, et avec une précision croissante, qui correspond à la précision qu'on atteint chaque fois dans le domaine technique. Cette précision est saisie dans une croissance constante, et pour ainsi dire convergente (voir *Die Methode der Physik*), dans la mesure où les constatations s'approchent toujours plus des

idées sans bien sûr jamais les atteindre. De tels énoncés sont donc des énoncés pérennes, qui dans la réalité assurent la précision du moment. Il s'agit en ce sens de lois idéelles de la nature.

Jetons encore un œil sur ces sciences techniques idéales, dont font partie la géométrie technique et la mécanique technique.

D'où ces sciences procèdent-elles et d'où tiennent-elles leur signification ? C'est ce que l'on parvient à comprendre si l'on s'occupe une bonne fois de la formation des concepts en général. On s'aperçoit facilement que les concepts du langage quotidien ne peuvent jamais être définis de manière parfaitement univoque. Ces concepts ont, certes, une sorte de domaine central où ils s'appliquent *grosso modo* de manière univoque. Prenons des concepts comme table, arbre, chien et eau, etc. « À la marge », ils sont tous équivoques, et plus l'on cherche à les définir, plus l'on doit utiliser de concepts qui sont, de même, équivoques dans certains cas-limites. Ceci conduit à la question : existe-t-il, de manière générale, des concepts parfaitement univoques ? Et comment peut-on les trouver ?

Si l'on veut trouver des concepts parfaitement univoques, il faut alors que leurs déterminations, leurs propriétés le soient à leur tour. Les termes usuels désignant des propriétés dans le langage courant sont inappropriés pour former des concepts univoques. Il ne nous reste que les relations. Mais ici également, on ne peut prendre en considération que celles qui ne dépendent pas des termes désignant les propriétés dans le langage habituel. Or, on trouve une seule relation de ce type, qui vaut pour toutes les propriétés qu'on veut, et qui est donc indépendante de ces dernières. C'est la relation de « différence » (avec ses variantes : la similitude et l'égalité). En outre, un concept absolument univoque ne doit avoir qu'un nombre fini de déterminations, dont chacune a été consciemment ajoutée. Nous reconnaissons ceci : nous n'obtenons des concepts absolument univoques que quand nous utilisons comme unique détermination la différence et cela seulement un nombre fini de fois et de manière consciente.

Il existe dans le langage quotidien un seul concept qui coûte que coûte est univoque, étant donné qu'il est entièrement incapable, compte tenu de sa totale vacuité, de contenir la moindre incertitude. C'est le concept de « quelque chose », c'est-à-dire « quelque chose différencié en général ». Et ceci est en même temps l'idée la plus simple.

Le quelque chose peut être considéré à présent ou bien eu égard à lui-même ou bien eu égard à sa limite. Dans les deux cas, il peut être constant ou variable. (Ce sont les seules positions que je puisse énoncer sur ce quelque chose eu égard à lui-même sans utiliser certaines propriétés sensibles, et sans lui attribuer des propriétés particulières qui ne sont pas encore contenues dans le concept de quelque chose. Ainsi, il est caractérisé en tant que « quelque chose extérieur ».) Il en résulte quatre possibilités : le quelque chose 1. constant, 2. variable ; sa limite 3. constante, 4. variable. De ces quatre possibilités, on peut dériver ce qui suit dans cet ordre – ce qu'il n'est pas nécessaire de commenter plus amplement ici si l'on n'utilise que la différence en tant que détermination :

1. l'arithmétique, 2. la théorie du temps, 3. la géométrie, 4. la mécanique.

Ces quatre sciences sont, dans la forme ainsi obtenue, provisoirement des schématismes purs. Elles n'entrent en contact avec la réalité effective que si les formes idéelles particulières en lesquelles elles consistent se « réalisent ». On reconnaît que ces réalisations sont, quant à leur intention, totalement indépendantes de la nature spécifique des choses réelles dans lesquelles elles se réalisent.

Nous appelons ces quatre sciences « les quatre sciences idéales » (S.I.). Il résulte de notre déduction qu'elles sont les seules possibles, c'est-à-dire les seules « à être existantes ». En effet, elles ont toujours historiquement eu une position à part, qui n'a été provisoirement éclipsée que dans la période du pur empirisme.

Ces quatre S.I. ont en outre la propriété que leurs formes peuvent être réalisées dans tous les objets réels; elles ne présupposent rien d'autre que des différences réelles, c'est-à-dire perceptibles.

Mais nous possédons grâce à elles le réservoir de tous les concepts parfaitement univoques. Leurs concepts ne comportent pas de déterminations que nous ne leur aurions point attribuées intentionnellement et individuellement. Ceci est la raison pour laquelle nous pouvons garantir leur univocité. Il n'existe pas d'autres concepts entièrement univoques que ceux que présentent les autres S.I. C'est pourquoi ils sont réalisables avec la plus grande précision atteignable et sont ainsi relativement univoques dans le réel également.

Mais nous voulons à présent revenir à l'histoire de l'expériment qui nous a occupés implicitement tout le temps de nos réflexions méthodologiques générales.

Il devrait être devenu clair que le développement de l'expériment mesurant dépend précisément du développement des quatre S.I. précitées. Ce n'est que lorsque les concepts fondamentaux se sont développés en elles, que les appareils de mesure exacte sont possibles, appareils qui sont construits à partir de ces concepts. La possibilité de les construire a toujours existé. Mais cette possibilité n'est pas encore suffisante. Ces réalisations n'attendent pas leur découverte dans la nature comme les statues antiques que l'on peut mettre à jour. Et si ces réalisations se cachaient quelque part dans la nature, ce qui arrive dans des cas très rares, elles ne comporteraient pas d'indice qui nous apprendrait qu'il s'agit des représentants des concepts véritablement fondamentaux. En outre, elles ne peuvent être invoquées que dans la mesure où elles représentent la réalisation avec un certain degré d'exactitude. C'est pourquoi, elles ne peuvent jamais transmettre l'idée comme telle, mais tout au plus une suggestion dont la position devrait être examinée à partir de l'idéal seulement. Toute réalisation empirique de cette sorte n'est qu'une étape particulière contingente au sein d'un processus de raffinement illimité. Ce dernier, dans son essence, n'est toujours qu'une idée, et une idée de cette sorte ne peut pas être exhumée. Personne toutefois ne saurait nous dire de l'extérieur quelle est l'idée « juste ».

Seule notre propre construction intellectuelle et méthodique-synthétique, effectuée suivant des principes méthodiques exacts, peut nous le dire.

Une fois ce parcours devenu intelligible, on trouve au cours de l'histoire une foule de circonstances qui ne deviennent compréhensibles que sur cette base. Dans l'histoire de la mécanique, par exemple, deux questions trouvent leur réponse : pourquoi est-ce avec Galilée que la mécanique a acquis son indéniable visibilité ? Pourquoi ne maîtrise-t-il le principe d'inertie que pour le plan horizontal ? (Ce principe dans sa généralité n'a été formulé que par Torricelli.) Pourquoi est-ce seulement avec la loi de la conservation de l'énergie que les mesures de précision en électricité ont pris un tel essor, etc. ?

Ainsi, quelque chose de fondamental s'est produit pour la perspective méthodique générale ou philosophique. La géométrie était depuis Platon et Euclide une construction qui pour ainsi dire planait dans le pur éther de l'Idée. Nous ne savons malheureusement rien quant à la question de savoir dans quelle mesure ceci fut également le cas dans les représentations des savants, ou bien s'il y avait encore des liens à l'artisanat et à la technique. Assurément ceux-ci se sont ensuite de plus en plus perdus. Aux *xix^e* et *xx^e* siècles s'est développée la tendance à en faire de purs schématismes de calcul.

Cette géométrie, nous l'avons, par nos réflexions, remise sur terre, et rapatriée sur le terrain de nos opérations techniques, et de notre maîtrise pratique de la nature. Ce que, ce faisant, elle perd en mystère métaphysique, elle le gagne en transparence totale de sa nature. Quelque chose d'exactement analogue vaut pour la science idéale du mouvement, de la dynamique, dont la constitution est en effet comparativement plus jeune.

Le sens de tous les expériences mesurants nous est maintenant devenu également clair. Par la réalisation des concepts des sciences idéales, nous parvenons à introduire des constantes univoques dans la nature par ailleurs fluante, réalisation qui a rendu possible la reproduction d'arrangements réels de manière exactement prédéterminée avec une précision toujours croissante. Par ce moyen sont toutefois créées les lois de la nature absolument valables. À côté de celles-ci, il y en a encore d'autres qui se servent de certaines circonstances réelles, qui dans notre entourage montrent pour ainsi dire de manière contingente une constance forte. Ce sont les lois de la nature empiriques ou mesurées. Mais celles-ci n'appartiennent pas à la nature pure, car chaque mesure exacte n'est possible que par l'application des formes exactement reproductibles et univoques que nous livrent les sciences idéales. Celles-ci toutefois ont leur origine en nous.

Et ce ne sont pas seulement les instruments de mesure qui ont été construits d'après les formes idéales des sciences idéales ; ce qui est mesuré également est soumis à ce procédé. Dans les faits, nous n'aurons de reproductibilité de lois que là où nous parvenons à reproduire ce qui est mesuré avec une précision toujours croissante. Mais comme les concepts des sciences idéales sont les seuls auxquels s'attache une parfaite univocité, ne seront univoquement reproductibles que les arrangements qui sont construits à partir d'éléments, autant que possible, qui sont formés selon les concepts des sciences idéales. Il nous suffit de jeter

un coup d'œil dans un laboratoire de physique pour trouver confirmation de ces circonstances.

La découverte de la loi de conservation de l'énergie par Robert Mayer en 1842 a porté à son accomplissement la partie idéale de la mécanique technique. Ainsi, les fondements des sciences idéales furent parachevés, et leur application à la création de réalisations univoquement déterminées fut parfaitement exploitable. Nous avons vu plus haut que cette loi servait à introduire des conceptualisations univoques à partir de là dans toutes les parties restantes de la physique. De fait, c'est de là que date l'essor ininterrompu de la physique expérimentale que nous connaissons tous, de même que l'essor de la technique de précision dont nous venons de parler.

À présent, les concepts d'électricité peuvent être saisis avec précision, étant donné qu'ils sont créés par rattachement aux concepts fondamentaux de la mécanique. Toutes les forces de l'électricité sont mesurées et simultanément définies dans une comparaison avec des forces qui sont exactement définissables et mesurables dans le contexte de la mécanique. Cette circonstance se manifeste aussi dans l'existence d'un système métrique général dans lequel toutes les mesures sont réductibles au centimètre, au gramme et à la seconde. Mais aussi dans chaque électromètre et chaque boussole à tangente.

Les circonstances que nous avons présentées jusqu'ici n'étaient pas explicitement présentes à l'esprit des chercheurs qui ont contribué à ces progrès. Si, en revanche, nous étudions les travaux fondamentaux dans lesquels se sont constitués les nouveaux concepts, nous pouvons, à la lumière de réflexions exactes, toujours et encore reconnaître l'efficacité de ces circonstances.

Ce que j'ai tenté de vous expliciter était la « construction interne » des expériences que j'ai évoquée au début, leur structure ou, si l'on veut, leur logique. Nous avons reconnu que ce n'est que par la pénétration de cette structure interne, et seulement par elle, que l'histoire de l'expérience est devenue plus transparente. Nous avons reconnu que toute mesure exacte repose sur la formation de concepts idéels qui seuls rendent possible une univocité absolue. En outre, elle repose sur la réalisation de ces concepts qui s'opère avec une précision toujours croissante. La fixation des concepts des sciences idéales ou des s-concepts n'advient pas seulement par des expériences quelconques, mais par des « consignes » tacites.

Je voudrais dire un mot encore sur leur logique. Nombre de personnes ayant un penchant logistique seront d'avis que cette conception doit être d'abord reformulée de manière logistique, avant que l'on puisse la considérer comme établie. Seulement, se présente ici cette circonstance importante que cela n'est pas possible. Toute logistique consiste au fond en un calcul propositionnel à deux valeurs, dont les concepts « vrai et faux » représentent les valeurs fondamentales. Toutefois il s'agit ici de consignes, de propositions opératoires ou impératives. Mais de telles propositions transcendent le domaine du calcul propositionnel, dans la mesure où les propositions opératoires ne sont ni vraies ni fausses. On trouve, certes, des propositions impératives dans toutes les langues, mais les logisticiens ont cru pouvoir les ignorer, les traiter comme

accessoires. Nos réflexions ont montré que leur domaine, toutefois, est bien plus grand et important qu'on ne l'a jamais cru. Il appert donc que la logistique du calcul propositionnel se cantonne à un domaine relativement étroit, auquel les énoncés impératifs n'appartiennent pas. Toutefois, ce sont précisément ces derniers qui assurent le lien entre la langue et la vie effective.

Naturellement, je n'ai pu présenter toutes les étapes de la pensée une par une en détail. Il y faudrait un cours d'un semestre. J'espère toutefois que vous avez pu entrevoir la structure d'ensemble de l'essence de la science exacte, et je crois que vous m'accorderez que ce coup d'œil a ouvert un monde porteur des plus hautes conséquences, et nous a révélé un monde de beauté. Ce monde en effet n'est rien d'autre que le « monde du rationnel », qui se présente ici comme un tout clos en lui-même, et qui révèle sa position dominante également pour l'histoire de l'expériment.

Dans ce qui précède, j'ai souligné la contribution anglaise à ce développement, car celle-ci a été effectivement d'une importance toute particulière. Seulement, il semble que jusqu'à présent, ceux partageant une attitude plus théorique, n'aient pas encore pris conscience de ces mérites. Qu'il me soit permis de donner ici les références suivantes :

- *Die Grundlagen der angewandten Geometrie* [Dingler 1911]
- *Das Experiment, sein Wesen und seine Geschichte* [Dingler 1928]
- *Die Methode der Physik* [Dingler 1938]
- *Grundriß der methodischen Philosophie* [Dingler 1949]

Bibliographie

AL-KHĀZINĪ, Abd al-Rahman [1121], *Livre de la balance de la sagesse*.

DIELS, Hermann [1900], *Fragmente der Vorsokratiker*, trad. fr. par J.-D. Dumont, *Les Présocratiques*, Paris : Gallimard, 1988.

DINGLER, Hugo [1911], *Die Grundlagen der angewandten Geometrie; eine Untersuchung über den Zusammenhang zwischen Theorie und Erfahrung in den exakten Wissenschaften*, Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft.

— [1928], *Das Experiment. Sein Wesen und seine Geschichte*, Munich : E. Reinhardt, 2. Auflage, 1930.

— [1932a], *Geschichte der Naturphilosophie*, Berlin : Junker und Dünhaupt.

— [1938], *Die Methode der Physik*, Munich : E. Reinhardt.

— [1949], *Grundriß der methodischen Philosophie. Die Lösung der philosophischen Hauptprobleme*, Füssen : C. F. Winter.

— [1952], *Über die Geschichte und das Wesen des Experiments*, Munich : Eidos Verlag.

HELMHOLTZ, Hermann von [1868], Über die Tatsachen, die der Geometrie zugrunde liegen, *Nachrichten von der königlichen Gesellschaft der Wissenschaft zu Göttingen*, 9.

LALANDE, André [1929], *Les Théories de l'induction et de l'expérimentation*, Paris : Boivin.

NEWTON, Isaac [1686], *Philosophia naturalis principia mathematica*, Londres : Joseph Streater.

POGGENDORFF, Johan Christian [1863], Dollond, John, dans *Biographisch-Literarisches Handwörterbuch zur Geschichte der exacten Wissenschaften, enthaltend Nachweisungen über Lebensverhältnisse und Leistungen von Mathematikern, Astronomen, Physikern, Chemikern, Mineralogen, Geologen usw. aller Völker und Zeiten*, Leipzig : Johann Ambrosius Barth, t. 1, A-L, 586.

REPSOLD, Joahnn Adolf [1908], *Zur Geschichte der astronomischen Meßwerkzeuge*, Leipzig : Engelmann.

SENN, Gustav [1929], Über Herkunft und Stil der Beschreibungen von Experimenten im Corpus Hippocraticum, *Sudhoffs Archiv für Geschichte der Medizin*, 22, 217–289.

— [1933], *Die Entwicklung der biologischen Forschungsmethode in der Antike und ihre grundsätzliche Förderung durch Theophrast von Eresos, Veröffentlichungen der Schweizerischen Gesellschaft für Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften*, t. 8, Aarau : Sauerländer.

STRATON DE LAMPSAQUE [s. d.], *Du vide*.

WHITWORTH, Joseph [1841], On the metallic surfaces and the proper mode of preparing them, *The Mechanics Magazine*, 34, 39–42.