



HAL
open science

Les conditions de possibilité de la mesure

Anouk Barberousse

► **To cite this version:**

Anouk Barberousse. Les conditions de possibilité de la mesure. Cahiers philosophiques, 2013, 135, pp.7-22. halshs-01058664

HAL Id: halshs-01058664

<https://shs.hal.science/halshs-01058664>

Submitted on 28 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les conditions de possibilité de la mesure

Anouk Barberousse

anouk.barberousse@univ-lille1.fr

Université Lille 1 & UMR STL

Tout le monde s'accorde pour affirmer la grande importance des opérations de mesure dans les sciences empiriques, en raison de leur caractère fondamental. Tout le monde s'accorde également pour affirmer qu'il est nécessaire que les règles fixant le déroulement de ces opérations satisfassent deux exigences : elles doivent être bien définies et standardisées afin que les opérations de mesure remplissent leurs fonctions. Dans son dernier ouvrage, intitulé *Scientific Representation: Paradox of Perspective*¹, Bas van Fraassen revient en détails sur ces exigences et fait le point sur les évolutions de la philosophie des sciences du siècle dernier à leur propos. Son analyse approfondie des conditions de possibilité de la mesure rend explicite les raisons pour lesquelles la mesure est au centre de l'activité scientifique et des relations entre théories et expériences.

Le but de cet article est de présenter succinctement quelques résultats de l'analyse de van Fraassen, qui me semble être l'une des plus abouties aujourd'hui sur les conditions de possibilité de la mesure. Je commencerai par rappeler le rôle que jouent les opérations de mesure dans la relation fondamentale entre théories et phénomènes. Ensuite, je montrerai à quelles conditions, à la fois principielles et historiques, elles peuvent jouer ce rôle, toujours en m'appuyant sur les analyses de van Fraassen.

¹ Van Fraassen (2008).

1. Les opérations de mesure, entre théories et phénomènes

Qu'est-ce qu'une opération de mesure ?

Avant de présenter la fonction des opérations de mesure au sein des relations entre théories et phénomènes, il est nécessaire de définir ce qu'est une opération de mesure. Plusieurs types de définition sont envisageables ; passons-les rapidement en revue afin de dégager quelques éléments d'analyse.

On conçoit souvent l'opération de mesure comme l'attribution d'une valeur numérique (associée à une unité) à une quantité physique, ou biologique, ou psychologique, ou sociale -- en tout cas, une propriété dont on pense qu'elle est instanciée dans le phénomène étudié, et dont on cherche à connaître la valeur. Par exemple, on attribue la valeur de 39 degrés celsius à la température du corps de cet enfant, ou la valeur de 4907 m à l'altitude en haut du Mont Blanc. Définir l'opération de mesure comme l'assignation d'une valeur numérique (associée à une unité) à une propriété n'est pas foncièrement incorrect, mais ce n'est pas suffisant. Une telle définition réduit la complexité des hypothèses et des conventions qui sont au fondement de l'association entre une propriété et une valeur numérique. Ainsi, avant de pouvoir effectuer, de façon fiable, une telle association, il faut avoir *identifié*, dans le phénomène concerné, la propriété à mesurer, c'est-à-dire qu'il faut déjà avoir pu analyser le phénomène de sorte à être capable de reconnaître l'occurrence de la propriété en question dans la plupart de ses réalisations. Souvent, on n'identifie pas une propriété de façon isolée, mais on reconnaît bien plutôt le rôle qu'elle joue au sein d'un ensemble de propriétés. Nous oublions fréquemment ces circonstances, car nous nous rapportons à des exemples simples, comme ceux des mesures de longueur ou de masse. Dans ces cas, il nous semble qu'il ne faille faire aucun effort particulier pour prendre conscience qu'il s'agit de propriétés importantes, jouant une multitude

de rôles aussi bien dans la vie scientifique que dans la vie quotidienne. Mais la mesure du spin d'un électron (qui est une quantité spécifique à l'échelle quantique), ou celle du Produit Intérieur Brut, soulèvent à l'évidence les difficultés qui viennent d'être signalées : pour mesurer le spin d'un électron, il faut avoir identifié cette propriété comme importante et avoir compris, au moins grossièrement, les relations entre cette propriété et d'autres, relations qui permettent d'effectuer la mesure. Il en va de même pour le PIB, exemple qui suggère également que ces actes d'identification et de jugement n'ont parfois rien d'évident ni d'immédiat, contrairement à ce que les exemples de la longueur et de la masse laissent penser.

Comme on vient de le voir, la définition d'une opération de mesure par l'attribution d'un nombre à une propriété n'est pas satisfaisante. Changeons donc de perspective, et passons à présent à une tout autre façon de définir une opération de mesure. Celle-ci repose sur la mise en contact physique d'un instrument avec le phénomène étudié -- à condition de préciser en quoi consiste ce contact, et dans quelles circonstances il donne un résultat satisfaisant. Par exemple, on pourra faire appel à la notion de congruence pour les mesures de longueur à l'aide d'une règle, ou encore à la condition de stabilité des résultats lorsque l'opération de mesure est répétée dans des circonstances semblables. Et en effet, cet aspect des opérations de mesure est bien ce que l'on valorise lorsque l'on fait de ces opérations celles qui permettent de mettre en relation les théories avec les phénomènes. Dans cette approche, l'instrument de mesure apparaît comme ce qui rend cette relation possible au premier chef. De même que précédemment, on remarquera cependant que cette façon de définir les opérations de mesure est incomplète. Lorsque c'est la règle graduée qui sert de modèle à l'ensemble des opérations de mesure, on oublie que le contact entre l'instrument et le phénomène est souvent plus complexe qu'une simple mise en congruence. Pensons par exemple à la nécessité d'attendre que la hauteur de la colonne mercure se stabilise dans un thermomètre après qu'on l'a mis en

contact avec ce dont on veut connaître la température. On peut encore penser au fait que le fonctionnement d'un thermomètre repose lui aussi sur une mise en congruence (entre la hauteur de la colonne de mercure et une échelle graduée), ce qui indique que pour les autres propriétés que la longueur, une opération de mesure est généralement *composée* d'autres opérations de mesure, dont le plus souvent une mesure de longueur. En outre, pour de nombreuses opérations de mesure, la notion d'instrument de mesure doit être élargie par rapport à celle qui s'applique à la règle et au thermomètre : ainsi, pour mesurer le PIB, on n'utilise pas d'instrument dont le fonctionnement reposerait sur un contact physique avec le phénomène étudié.

Les considérations qui précèdent invitent à proposer une approche plus générale permettant de définir les opérations de mesure. C'est à partir du rôle que jouent les résultats de mesure dans la relation entre théories et phénomènes que l'on peut envisager cette approche plus générale. La relation entre théories et phénomènes peut être considérée de deux points de vue, « par le haut » ou « par le bas », selon les expressions de van Fraassen. Considérer cette relation « par le haut », c'est se placer à un moment où une théorie est constituée et bien acceptée par la communauté scientifique concernée. La théorie est jugée suffisamment bien confirmée pour pouvoir être utilisée sans état d'âme dans des tâches de prédiction ou pour servir de fondement ou de point d'ancrage à d'autres théories. Cela a été le cas de la mécanique de Newton dès que ses contemporains ont pu s'approprier ses différents aspects : elle a immédiatement été utilisée par d'autres que Newton lui-même pour de nombreuses prédictions, dont des prédictions astronomiques, et par la suite comme point d'ancrage pour de nouvelles hypothèses, par exemple à propos des phénomènes électriques. Envisager la relation entre théories et phénomènes « par le bas », c'est en revanche se placer à un moment où une théorie est encore en cours d'élaboration, et qu'on ne peut pas s'appuyer sur ses énoncés pour définir des relations entre propriétés, comme celles qui gouvernent les

opérations de mesure. C'est le cas par exemple au moment où on tentait d'associer les sensations de chaleur à des grandeurs, sans connaître les régularités gouvernant les rapports entre chaleur et comportement des fluides et des solides.

Lorsque l'on envisage la relation entre théories et phénomènes « par le haut », l'opération de mesure est bien le moyen privilégié par lequel les phénomènes sont pris en considération dans les théories. L'observation constitue une autre façon pour les phénomènes d'entrer en contact, pour ainsi dire, avec les théories. Cependant, dans sa forme traditionnelle, l'observation n'est pas quantifiée, et c'est la raison pour laquelle ce sont les résultats de mesure qui sont les points de contact privilégiés entre théories et phénomènes (l'article de Vincent Israel-Jost dans ce numéro fait le point sur les rapports entre les pratiques actuelles d'observation et de mesure). Dans le cas des théories constituées et bien acceptées, les propriétés à mesurer sont clairement définies, leurs rapports avec les autres propriétés jugées importantes par la théorie sont également univoques. Les résultats de mesure jouent donc bien le rôle d'arrimer, pour ainsi dire, les énoncés généraux de la théorie aux situations particulières dans lesquelles les phénomènes se produisent *hic et nunc*, là et au moment où les instruments de mesure sont utilisés.

Lorsque l'on a affaire à des théories en cours de constitution, on ne peut s'appuyer sur un ensemble de propriétés qui seraient données comme étant à mesurer. Au contraire, l'élaboration d'une théorie passe précisément par la mise au jour, d'abord hypothétique, de telles propriétés : il s'agit d'identifier, dans la diversité des phénomènes, quels aspects sont pertinents, c'est-à-dire suffisamment stables pour être reconnus dans diverses situations, et en relation régulière avec d'autres aspects bien identifiés. Dans ce processus, qui peut être long, les opérations de mesure peuvent jouer un rôle différent de celui qui les caractérise lorsqu'on les considère « par le haut ». Puisque les propriétés à mesurer ne sont pas d'ores et déjà fixées, certaines opérations de mesure ont précisément pour but de déterminer lesquelles sont dignes

de devenir des propriétés importantes dans la théorie. De façon complémentaire, elles ont également pour but de déterminer, souvent par tâtonnement, dans une situation épistémique d'incertitude, quels moyens sont les plus satisfaisants pour opérer ces mesures. Ce processus de recherche au cours duquel les propriétés importantes et les détails des opérations de mesure sont progressivement déterminés a fait l'objet de plusieurs études historiques dans le cas de la température. On peut en particulier citer l'exemple ancien d'Ernst Mach (1896), et celui d'Hasok Chang (2004), plus contemporain, et qui a considérablement renouvelé l'approche « par le bas » en mettant au jour la complexité de l'identification des processus permettant de mesurer de façon fiable, répétable et universelle la température, aux époques où les théories physiques qui ont pris en charge ces processus par la suite (la thermodynamique et la mécanique statistique) n'étaient pas encore constituées. Mach et Chang analysent par exemple la question de savoir à quelles conditions on peut utiliser la variation de la hauteur d'un petit échantillon de mercure dans un tube en verre clos pour mesurer la température, comment on détermine que le mercure est plus fiable que l'alcool, mais aussi comment ces questions pratiques influent sur la constitution de la thermodynamique. Chang est particulièrement attentif aux étapes temporelles de la diffusion des techniques de mesure de la température, ainsi qu'à la diffusion et à la discussion publique des arguments donnés en leur faveur aux époques où l'on ne pouvait pas les appuyer sur une théorie stabilisée et communément acceptée. S'appuyant sur ces enquêtes à la fois historiques et épistémologiques, van Fraassen élargit et radicalise l'analyse des conditions de possibilité de la mesure en s'efforçant de tenir ensemble les deux points de vue « par le haut » et « par le bas », car le premier est celui le plus souvent adoptés par les scientifiques en activité, et le second celui qui permet de pallier l'oubli systématique que l'activité scientifique engendre à propos de ses propres procédures de constitution, une fois les résultats atteints.

Si l'on fait l'effort d'envisager le rôle des opérations de mesure au sein des relations entre théories et phénomènes aussi bien « par le bas » que « par le haut », on voit que la définition d'une opération de mesure par l'attribution d'une valeur numérique à une propriété des phénomènes est réductrice : en effet, une telle définition manque un élément qui est essentiel à la signification même que l'on peut attribuer aux résultats de mesure, à savoir celui qui provient de la façon dont l'opération de mesure considérée a été élaborée historiquement. Le point de vue « par le haut » néglige délibérément cet élément historique. Cependant, l'analyse de la nature des opérations de mesure exige de le prendre en compte, sous peine de méconnaître les raisons de leurs usages scientifiques. De la même façon, la définition des opérations de mesure qui privilégie le contact entre un instrument et un phénomène fait silence sur les raisons qui font que *cet* instrument mesure correctement *cette* propriété.

Face à ce double écueil, la proposition de van Fraassen est de définir une opération de mesure de façon beaucoup plus générale, comme la « localisation » d'un phénomène dans un espace logique de possibilités qui est défini par une théorie (constituée ou à venir). Selon cette définition, une théorie (parfois sous la forme en devenir d'un ensemble d'hypothèses provisoires) fixe un espace logique en identifiant certaines propriétés comme importantes, et en indiquant quels rapports ces propriétés entretiennent entre elles. Un espace logique est la représentation géométrique des états ou des trajectoires possibles pour un système naturel décrit par une théorie. Ainsi les rapports entre propriétés peuvent-ils être statiques, lorsque l'on énonce des équations d'état, comme celle qui affirme la proportionnalité entre la température et le produit du volume et de la pression d'un gaz parfait, ou encore dynamiques, comme dans la deuxième loi de Newton, qui énonce la proportionnalité de la force totale qui s'exerce sur un corps avec l'accélération qu'il subit. Effectuer une opération de mesure, c'est selon van Fraassen situer un phénomène dans l'espace des possibilités qui est défini par ces relations.

Dans la suite de cet article, je me propose de présenter les implications de la proposition de van Fraassen en approfondissant tout d'abord le point de vue « par le haut » dans la section 2, puis le point de vue « par le bas » dans la section 3. Il s'agira pour moi de montrer la fécondité de l'approche de van Fraassen ainsi que les clarifications qu'apporte la prise en compte concomitante des deux points de vue.

2. Le point de vue « par le haut »

Prendre les choses « par le haut », pour ce qui concerne les opérations de mesure, consiste à se placer au sein d'une théorie bien en place, c'est-à-dire dont on connaît avec précision le domaine de validité. De nombreuses théories remplissent cette condition, à commencer, pour le cas de la physique², par la mécanique newtonienne, la thermodynamique, la mécanique quantique, et d'autres encore. Pour chacune de ces théories, on peut facilement identifier un domaine de phénomènes dont on est sûr qu'elles les décrivent correctement : par exemple, l'ensemble des phénomènes du mouvement à l'échelle humaine (ni trop grande, ni trop petite) pour la mécanique classique. Que signifie « être sûr » dans ce contexte ? Il ne s'agit pas, bien entendu, d'une certitude *a priori*, mais d'une « certitude pratique », selon l'expression de Borel (1913, c'est-à-dire d'une certitude valant pour tout but pratique. Une telle certitude naît de l'utilisation répétée de ces théories dans des buts de prédiction et de contrôle ; le fait que ces buts sont souvent atteints de façon satisfaisante, depuis de nombreuses générations, rend raison de cette certitude pratique. Pour le dire autrement, lorsque l'on a affaire à une théorie bien installée, on ne s'interroge plus sur la question de

² Les exemples qui suivent sont pris en physique, mais la discussion a une portée plus générale ; elle vaut pour toutes les disciplines dans lesquelles ont été énoncées des théories quantitatives.

savoir s'il est raisonnable de l'accepter et de l'utiliser. Les raisons que l'on a de le faire se sont stabilisées il y a suffisamment longtemps pour que cette question ne fasse plus partie des questions scientifiques ouvertes. Par contraste, la théorie des cordes ne peut être considérée comme une théorie bien installée, puisque les raisons avancées par certains pour l'accepter ne sont pas partagées par tous les physiciens concernés.

Effectuer une mesure dans le cadre d'une théorie bien installée, c'est chercher à construire une représentation numérique partielle d'un système ou d'un phénomène. Cette représentation sera correcte si les règles présidant aux opérations de mesure sont respectées. Grâce au succès de cet effort de représentation, on parvient à acquérir l'information scientifiquement utile sur le système ou le phénomène, celle que l'on espérait obtenir en effectuant la mesure. Ainsi, dire que le résultat de la mesure est une représentation correcte signifie que lorsque tout s'est passé comme prévu, on a réussi à obtenir l'information que l'on recherchait sur le système ou le phénomène en question. Considérer un résultat de mesure comme une représentation, c'est prendre au sérieux le caractère relationnel qu'est cet objet, le résultat de mesure. Une représentation entretient en effet des relations non seulement avec l'objet représenté (système physique, phénomène), mais aussi avec son utilisateur. Dans le cas du résultat de mesure, l'utilisateur est en outre en possession d'un certain nombre de concepts et d'hypothèses (ou encore d'un cadre théorique) qui lui permet de situer le résultat de mesure dans un ensemble doué de sens : ainsi le résultat de mesure représente-t-il le système, dans le cadre théorique de l'utilisateur, *comme* doté de telle propriété numérique. Ignorer ces deux relations, vers l'objet étudié d'une part, et vers l'utilisateur de l'autre, c'est s'interdire de saisir la richesse des implications des opérations de mesure pour l'activité scientifique dans son ensemble. On peut ajouter à cette caractérisation des opérations de mesure qu'elles sont en outre *intentionnelles*, c'est-à-dire qu'elles sont effectuées *dans le but* de se procurer de l'information sur un système ou un phénomène. En insistant sur ces différentes

caractéristiques, van Fraassen enrichit les approches représentationnalistes classiques de la mesure qui se sont développées en philosophie des sciences au cours de la seconde moitié du XXe siècle, en particulier sous la plume de Patrick Suppes (voir Suppes et al. 1998).

Si l'on prend en considération le fait que le résultat d'une opération de mesure est une représentation, on est amené à approfondir sous plusieurs aspects l'affirmation selon laquelle effectuer une mesure, c'est utiliser un instrument permettant d'associer une valeur numérique à une propriété identifiée par cette théorie comme importante pour les buts que l'on se fixe en s'appuyant sur elle. En effet, chaque élément de cette description mérite d'être analysé en détail.

Commençons par le résultat de l'opération de mesure : parler de valeur numérique est une idéalisation, puisque l'instrument de mesure ne délivre en général pas seulement une valeur, mais une valeur accompagnée d'un intervalle d'erreur. La question suivante est de savoir à quelles conditions l'instrument de mesure délivre bien la valeur, ou l'intervalle, recherchés. Une première série de conditions relève de l'usage correct de l'instrument ; ce sont des conditions pratiques. Les conditions théoriques sont plus difficiles à analyser. Pour amorcer cet examen, prenons l'exemple des mesures de longueur. Il s'agit en effet de l'exemple le plus simple au sens où les autres opérations de mesure incluent souvent une mesure de longueur. Pour que la mise en congruence d'une règle graduée et d'un objet puisse délivrer l'intervalle numérique attendu, il est nécessaire de faire plusieurs hypothèses : par exemple, il faut supposer que la règle ne change pas elle-même de longueur lorsqu'on la déplace pour l'aligner avec l'objet à mesurer. Cet exemple montre que les hypothèses qui soutiennent les mesures de longueur ne reposent pas seulement sur ce que l'on sait ou croit savoir de la quantité appelée « longueur », mais aussi sur d'autres corpus de connaissance, ici la théorie physique décrivant le comportement du matériau qui a servi à façonner la règle. De façon plus générale, les opérations de mesure s'appuient sur des hypothèses empiriques, le

plus souvent des hypothèses concernant le caractère régulier du comportement des composants des instruments de mesure. On devine ici l'importance des normes de standardisation pour la fabrication des instruments de mesure : en effet, pour que les opérations de mesure puissent délivrer les résultats attendus, il faut que les matériaux des instruments aient un comportement uniforme, au moins dans des conditions de température et de pression normales.

La poursuite de l'examen des conditions théoriques de possibilité de la mesure conduit à prendre en compte les nouveautés introduites par la découverte des lois quantiques. En effet, les opérations de mesure ne peuvent être définies exactement de la même façon pour les quantités quantiques et pour les quantités classiques, celles qui valent à notre échelle et aux échelles plus grandes. On commencera par remarquer que pour les phénomènes qui tombent sous la portée des théories classiques, deux postulats sont couramment adoptés, que van Fraassen appelle le « postulat de la valeur bien définie » d'une part, et le « postulat de la véracité de la mesure » d'autre part. Selon le premier postulat, chaque paramètre physique possède toujours la même valeur dans les mêmes circonstances, qu'il soit mesuré ou qu'il ne le soit pas, et l'opération de mesure permet de découvrir cette valeur, au moins de façon approchée. Selon le second postulat, la mesure d'un paramètre révèle de façon fidèle (si elle est effectuée correctement, selon les critères définis par la théorie concernée) la valeur qu'il possède. Les phénomènes quantiques mettent à mal chacun de ces postulats.

Si, dans le cadre des théories classiques, la thèse selon laquelle l'opération de mesure « révèle » la valeur d'une propriété est une idéalisation bénigne, pour ce qui concerne les phénomènes quantiques, cette idéalisation est tout simplement intenable puisque les opérations de mesure interfèrent avec les phénomènes quantiques ou les détruisent. Face aux deux postulats énoncés ci-dessus, on se trouve donc devant deux possibilités : ou bien on construit deux théories différentes des opérations de mesure, l'une pour les phénomènes

classiques et l'autre pour les phénomènes quantiques, on bien on considère l'hypothèse selon laquelle une théorie générale de la mesure doit valoir pour les phénomènes quantiques aussi bien que pour les phénomènes classiques. Si l'on choisit la seconde option, il est nécessaire d'abandonner les postulats de la valeur bien définie et de la véracité de la mesure et d'envisager la forme suivante pour cette théorie générale.

Esquisse d'une théorie générale de la mesure selon van Fraassen

- On commence par identifier un ensemble M d'observables, c'est-à-dire de propriétés susceptibles d'être représentées par des valeurs numériques grâce à des opérations de mesure ; il faut également préciser quel ensemble E de valeurs est possible pour chaque observable.
- Ensuite on doit spécifier un ensemble S d'états possibles du système étudié *et* de l'appareil de mesure.
- Il faut enfin définir une fonction stochastique P_s^m pour tout observable m de l'ensemble M et tout état s de l'ensemble S . P_s^m est une mesure de probabilité sur toutes les valeurs que m peut prendre. Cette fonction est interprétée comme la probabilité qu'une mesure de l'observable m donne une valeur au sein de E , si on l'effectue lorsque le système est dans l'état s . P_s^m permet donc de définir une probabilité *conditionnelle*, qui n'a de sens *que* si une mesure a été effectuée.

Dans ce cadre, la condition pour que l'opération de mesure produise bien la valeur escomptée est que $P_{final}^B(E) = P_{initial}^A(E)$, où B représente la valeur lue sur l'instrument de mesure, et A est la propriété à mesurer. Cette condition signifie que pour que l'opération de mesure remplisse son rôle, il faut que la probabilité que la grandeur A ait telle ou telle valeur au moment du *début* de l'interaction de mesure soit égale à la probabilité que l'appareil de mesure indique la *même* valeur à la *fin* de l'interaction de mesure. C'est pour éviter l'idéalisation selon laquelle l'opération de mesure révélerait instantanément la valeur d'une

grandeur qu'il est nécessaire d'utiliser le formalisme probabiliste d'une part, et les indices temporels de l'autre. En effet, l'étude des phénomènes quantiques a fait prendre conscience aux physiciens qu'il est nécessaire de tenir compte de la durée des interactions de mesure, sous peine d'idéalisations trompeuses, ainsi que du fait que la connaissance obtenue n'est pas affaire de tout ou rien, mais de probabilités.

Le problème de la coordination

Dans le cadre d'une réflexion sur les conditions de possibilité de la mesure, la prise en compte des mesures quantiques posait un problème redoutable parce qu'elle obligeait à réviser les fondements classiques de la mesure, exprimés par van Fraassen par les deux postulats de la valeur bien définie et de la véracité de la mesure. Comme nous venons de le voir, cet obstacle peut être surmonté en abandonnant l'idéalisation qui consiste à représenter une quantité par une valeur ou un intervalle bien délimités, et à la remplacer par une représentation probabiliste. Un autre obstacle, bien plus difficile, reste cependant à examiner. Il a fait l'objet d'intenses recherches épistémologiques à la charnière des XIX^e et XX^e siècles sous la plume de Mach, Poincaré et Reichenbach, entre autres. Il s'agit du « problème de la coordination », qui a pour objet l'ancrage problématique de quantités définies au sein de théories dans les phénomènes. On peut l'exprimer de la façon suivante : comment garantir que le résultat d'une mesure, qui permet de représenter numériquement une propriété qui est avant tout définie au sein d'une théorie, ait un contenu empirique ? Pour le dire autrement, il s'agit de déterminer à quelles conditions l'opération de mesure, dont les critères de validité sont définis au sein d'une théorie, permet bien d'acquérir de l'information *empirique* sur les phénomènes.

On peut prendre conscience de l'acuité du problème de la coordination en commençant par réfléchir aux difficultés qui affectent la construction d'une échelle de mesure. Le problème

de la coordination sous sa forme plus générale sera discuté ensuite. Pour construire une échelle de mesure, le plus souvent une échelle linéaire, le point de départ nécessaire est que soit établie, ou au moins supposée de façon raisonnable, une régularité empirique contingente. Si l'on veut construire une échelle de température, par exemple, on supposera que le volume du mercure enfermé dans un tube de verre augmente bien proportionnellement à la température, au moins au sein de certaines gammes de température. Une autre condition est requise : que l'on puisse s'appuyer sur un critère d'égalité, qui renvoie à une propriété physique des instruments de mesure. Par exemple, pour que l'on puisse mesurer des longueurs à partir d'une échelle qui reste identique pour chaque nouvelle opération de mesure, il faut bien présupposer que l'espace entre deux graduations sur la règle que l'on utilise reste constant, c'est-à-dire que le nombre qui le représente ne varie pas. Comment un tel critère d'égalité³ est-il établi ? Comme le montre Poincaré à propos de la mesure du temps (1898), il est impossible de l'établir de façon strictement empirique, car cela nécessiterait de disposer *déjà* d'un instrument de mesure fiable. Il faut donc prendre la *décision* d'accepter l'hypothèse selon laquelle la règle ne change pas de propriétés physiques lorsqu'on la déplace dans l'espace. Si l'on ne prend pas cette décision, les mesures de longueur seront tout simplement impossibles à effectuer.

L'exemple de la construction d'une échelle de mesure indique que pour répondre à la question de savoir comment ancrer dans les phénomènes une grandeur définie théoriquement, il est nécessairement que soient *préalablement* reconnues certaines régularités empiriques. Cela signifie qu'il faut qu'on les ait déjà identifiées, et qu'on les ait intégrées dans la théorie considérée. Il faut en outre qu'au sein de cette théorie (ou ensemble de théories), elles soient analysées comme étant susceptibles de servir de fondement à d'autres relations théoriques,

³ Dans son étude systématique du travail épistémologique de Helmholtz sur les fondements de la mesure, Olivier Darrigol (2003) appelle « égalité concrète » ce critère.

comme justement les relations entre un système ou un phénomène et un instrument de mesure. De l'autre côté, la coordination est requise pour que les nouvelles assertions théoriques produites au cours de l'enquête aient un quelconque contenu empirique : si le problème de la coordination n'est pas résolu, les énoncés théoriques ne peuvent avoir de contenu empirique.

La difficulté propre au problème de la coordination apparaît au grand jour lorsque l'on prend conscience que les deux questions suivantes ne peuvent pas recevoir de réponses indépendantes : « quelle interaction est admissible comme mesure de la quantité X ? » et « quelle quantité X est-elle ? ». Pour pouvoir répondre à la seconde question, il est nécessaire de savoir comment on mesure X : en effet, dans le cadre de la théorie qui considère X comme une propriété pertinente, c'est en dernier recours la mesure de X qui permet de répondre à la question de sa nature empirique (car la théorie répond parfaitement à la question de savoir quel rôle joue cette quantité en son sein). Inversement, si on ne sait pas quelle quantité est X , on ne peut savoir comment la mesurer. Ainsi est-il impossible de répondre à l'une de ces questions sans répondre à l'autre. Van Fraassen va jusqu'à parler de « cercle herméneutique » à propos de l'interdépendance entre ces deux questions. Afin de sortir de ce cercle, il faut donc résoudre le problème de la coordination.

Comme nous l'avons vu, la coordination est ce qui permet de déterminer de quelle façon une opération de mesure peut découvrir la valeur de ce qui est mesuré. Or, pour répondre à la question de savoir ce qui est mesuré, le point de vue « par le haut », qui est celui qui a été adopté dans cette section, est insuffisant. En effet, le point de vue « par le haut » est un point de vue rétrospectif, qui s'appuie sur une théorie déjà stabilisée et bien installée. La quantité considérée fait partie de celles qui sont prises en charge par la théorie. Lorsque l'on se place du point de vue « par le haut », on répond donc à la question de savoir ce qui est mesuré en s'appuyant sur les quantités *telles quelles sont définies par la théorie* -- qui précise

en outre quelles relations elles entretiennent les unes avec les autres, et en particulier quelles relations fondent les opérations de mesure. Ainsi apparaît-il clairement que le point de vue « par le haut » ne peut être adopté qu'à partir du moment où a émergé une théorie qui rend compte des quantités à mesurer aussi bien que des opérations de mesure, c'est-à-dire qui les intègre comme des quantités et des relations entretenant des liens bien établis avec les autres quantités qu'elle décrit. Mais qu'en est-il *auparavant* ? Comment répondre à la question de savoir ce qui est mesuré lorsqu'on n'a pas encore à disposition la théorie au sein de laquelle on trouve facilement des éléments de réponse, du moins lorsque l'on se place au point de vue « par le haut » ? Selon van Fraassen, l'examen des conditions de possibilité de la mesure ne peut se limiter à ce point de vue rétrospectif, sous peine de livrer une image grossièrement incomplète. C'est pour cela qu'il insiste sur la nécessité d'adopter également le point de vue « par le bas ».

L'examen des conditions de possibilité de la mesure appelle ainsi une enquête épistémologico-historique sur la constitution des procédures de mesure qui apparaissent comme stabilisées, et donc comme allant de soi, lorsque l'on adopte le point de vue « par le haut ». Cette enquête doit prendre pour objet des étapes antérieures du processus de stabilisation conjointe de la théorie et des procédures de mesure, au cours desquelles on avançait par tâtonnement pour définir correctement aussi bien les opérations de mesure que les quantités mesurées. Le but de l'enquête est d'étudier les relations de constitution à la fois théoriques et historiques entre quantités déjà bien définies et élaborations de procédures de mesure pour des quantités encore mal connues.

3. Le point de vue « par le bas »

Afin d'étudier comment co-émergent la théorie qui intègre les quantités à mesurer et les opérations de mesure dont elle rend également compte dans son propre vocabulaire, il est nécessaire, selon van Fraassen, de distinguer deux faits :

- un fait empirique, dont la découverte déclenche le processus de co-évolution entre théorie et opérations de mesure : ce fait est celui de la *stabilité* des interactions physiques qui constituent en partie les opérations de mesure telles qu'elles seront prises en charge par la théorie, une fois qu'elle sera bien installée. Cette stabilité est ce qui explique que les prédictions concernant ces opérations de mesure, ainsi que leurs relations avec d'autres opérations de mesure déjà bien établies au sein de la théorie en question, sont fiables.

- un fait historique : le fait que les *choix* qui ont été effectués au cours du développement de ces procédures de mesure ont été effectués en harmonie avec le développement de la théorie en question. Cela signifie qu'il est impossible d'identifier les aspects des phénomènes qui font l'objet des mesures si nous n'utilisons pas les concepts de la théorie. Pour le dire autrement, ce qui compte aujourd'hui comme une opération passive de mesure a été l'objet d'une rude bataille.

La mise au jour du fait historique est le moyen d'aller à l'encontre d'un processus bien connu à l'oeuvre dans le développement scientifique, celui du recouvrement des évolutions passées. En effet, l'enquête scientifique, en tant qu'elle est systématique, s'appuie toujours sur ce qui a été établi auparavant (à la fois dans la théorie et dans la technologie, dont celle des opérations de mesure), en oubliant au fur et à mesure les procédures par lesquelles cela a été établi. Ainsi les conditions sous lesquelles les interactions comptent comme des mesures, ou comme des mesures de telles ou telles quantités, subissent-elles des transformations continues, dont les scientifiques ne conservent pas la mémoire parce que leur activité de recherche les incite à s'appuyer sur ce qui est fermement établi, sans autre forme de réflexion

sur les étapes précédentes, marquées par l'incertitude. Une telle réflexion ne serait que perte de temps.

Prenons l'exemple de la mesure de la température pour rendre plus concret le point de vue « par le bas ». Il s'agit d'étudier schématiquement les différentes étapes qui conduisent à résoudre le problème de la coordination pour le cas de la chaleur, c'est-à-dire d'examiner quelles hypothèses peuvent être adoptées et quelles décisions peuvent être prises compte tenu des observations disponibles sur les rapports entre la chaleur et d'autres phénomènes, comme la dilatation des fluides. Dans cet exemple, on observe un va et vient permanent entre fondements perceptifs (concernant les sensations de chaud et de froid) et paris sur des régularités naturelles.

Les considérations qui suivent n'ont pas vocation à retracer le développement historique réel de la thermométrie, qui fait l'objet du livre de Hasok Chang mentionné ci-dessus. Elles ont simplement pour but d'éclairer certaines étapes épistémologiques particulièrement importantes et de souligner ce qui fait l'objet de décisions. Ainsi, une première décision a été de transformer les représentations communes de froid et de chaud en des *quantités* qui ont la même structure générale que les longueurs et les volumes, au sens où l'on peut les mettre en correspondance avec des nombres. A partir d'observations courantes, on a pu ensuite faire une hypothèse qui paraît assez naturelle, celle selon laquelle l'air se dilate *proportionnellement* à l'augmentation de chaleur et se contracte proportionnellement à la diminution de chaleur. C'est à partir de cette hypothèse qu'un premier dispositif de mesure a pu être envisagé et construit. Cependant, malgré son rôle de fondement des premiers dispositifs de mesure de la température, cette hypothèse est fragile, et s'avère d'ailleurs assez grossière, au sens où elle n'est approximativement vraie que dans une gamme assez étroite de températures. Cela indique qu'une deuxième décision est en jeu ici : on choisit, provisoirement, de faire comme si la proportionnalité était avérée, et on construit l'échelle des

températures sur le modèle de l'échelle la plus ancienne, et qui est déjà familière, l'échelle des longueurs.

On sait aujourd'hui que le dispositif reposant sur la dilatation de l'air est loin d'être optimal, car de nombreux facteurs brouillent la possibilité de mesurer la température de façon fiable avec un tel dispositif. Ainsi, le verre est lui aussi affecté par les changements de température ; or ces effets ne sont pas pris en compte dans le dispositif primitif. En outre, la température initiale du dispositif a également des effets sur les résultats ultérieurs : les variations de la température mesurée ne seront pas les mêmes pour toutes les températures initiales. Enfin, comme le montrera Pascal plus tard, la pression atmosphérique brouille elle aussi les résultats de mesure, puisque le dispositif est tout autant un thermomètre qu'un baromètre. Ce défaut conduit à une nouvelle décision, celle de fonder la mesure de la température sur une autre régularité supposée, celle de la proportionnalité entre variation de température et variation du volume de certains liquides bien choisis. Encore une fois, il s'agit d'un pari, celui de tabler sur l'équivalence entre les liquides. C'est donc le thermomètre à liquide qui vient au jour : le liquide est enfermé dans un tube entièrement clos, ce qui élimine les effets de la pression atmosphérique. Aujourd'hui, nous savons que la qualité des résultats de mesure dépend du choix du liquide, et que le comportement du verre est affecté par les variations de la température ; ce dispositif de mesure est donc également imparfait. Avec l'avènement de la théorie cinétique des gaz, une nouvelle étape est franchie, qui fait changer de cadre de référence à la mesure de la température. Jusqu'alors, elle reposait sur des régularités phénoménologiques ; elle peut ensuite s'appuyer sur la théorie qui était alors la mieux établie, la mécanique, à laquelle on attribuait en outre un fort pouvoir explicatif. De nouvelles justifications ont alors pu être apportées à l'efficacité des thermomètres, recouvrant les anciennes et les faisant oublier comme non pertinentes.

Ce bref cheminement dans l'histoire de la thermométrie permet d'apprécier sur quoi reposent les conditions de possibilité de cette coordination réussie que constitue la mesure de la température : elles reposent tout autant sur des régularités empiriques contingentes que sur des décisions. De quelle façon, en s'appuyant sur quels éléments, ces décisions sont-elles prises ? A propos de la mesure du temps, Poincaré (1898) a insisté sur le fait que ces décisions ne peuvent pas reposer sur une vérification empirique antérieure. Ainsi est-il nécessaire de s'appuyer, comme point de départ obligatoire des opérations de mesure des intervalles temporels, sur l'hypothèse selon laquelle deux intervalles de temps désignés sont égaux ; or on ne peut vérifier expérimentalement cette hypothèse sous peine de circularité. Poincaré analyse cette situation épistémique comme typique de celles où une *convention* est nécessaire. Van Fraassen, quant à lui, insiste sur l'historicité, ou la contextualité intrinsèque de ces décisions : les règles ou les principes sur lesquels on s'appuie pour résoudre le problème de la coordination, et qui sont introduits afin de définir certains types particuliers d'opérations de mesure, ne peuvent être formulés qu'au sein d'un contexte dans lequel certaines sortes d'opérations de mesure sont *déjà* acceptées et utilisées couramment. Il n'existe aucun point de départ qui serait dépourvu de tout présupposé pour résoudre le problème de la coordination. Pour le dire autrement, il n'est tout simplement pas possible d'avoir un accès indépendant aux paramètres à mesurer : le paramètre à mesurer est progressivement identifié au cours d'un processus historique au cours duquel on utilise, pour identifier le paramètre, la pratique-même de mesure dont on espère qu'à terme elle se stabilisera et permettra *effectivement* de le mesurer, c'est-à-dire qu'on fait le pari qu'elle deviendra suffisamment stable pour ce faire. C'est seulement une fois que la procédure de mesure est stabilisée que l'on peut se préoccuper de l'exactitude de l'instrument. Auparavant, on est encore dans un processus d'identification-définition du paramètre.

L'analyse de van Fraassen permet de revenir sur une notion souvent mise en avant lorsque l'on s'intéresse aux fondements de la mesure, celle de « corrélat physique » de la mesure, qui serait le point d'ancrage des théories physiques dans les phénomènes. Or on ne peut parler du « corrélat physique » de la mesure en tant que tel que si l'on se place au point de vue « par le haut », car c'est seulement au sein de la théorie bien acceptée que l'interaction physique en question est *identifiée* comme une opération de mesure. Cette notion ne peut donc conduire qu'à une solution partielle, nécessairement incomplète, au problème de la coordination. En effet, le critère permettant de décider quelles sortes d'interactions comptent comme des opérations de mesure est un critère de représentation, à savoir que le résultat doit représenter la propriété cible d'une certaine façon, c'est-à-dire qu'il doit ressembler sous certains aspects, et selon la théorie, au phénomène étudié. C'est sur le fond des classifications produites par la théorie que certaines interactions sont identifiées comme ayant le pouvoir de représenter les phénomènes étudiés. La fonction représentationnelle de la mesure est donc nécessairement chargée de théorie ; elle dépend fortement du contexte théorique, c'est-à-dire de l'état de stabilisation des différentes théories concernées. On peut remarquer que la thèse historiciste de van Fraassen s'oppose frontalement à d'autres thèses épistémologiques qui ont été défendues à propos de la nature et du rôle des résultats de mesure, comme celles associées aussi bien à l'opérationalisme (cf. Bridgman, 1916) qu'au positivisme logique (cf. Carnap, 1932). Ces positions considèrent les résultats des opérations de mesure comme étant absolument libres de tout présupposé théorique, et parfaitement détachés de toute hypothèse. Van Fraassen montre que ce ne saurait être le cas, et que l'idéal d'un « langage d'observation » qui ne contiendrait aucun élément en provenance de quelque théorie que de soit est bien impossible à réaliser dans le développement scientifique réel.

Conclusion

Après avoir présenté les deux approches identifiées par van Fraassen, l'approche « par le haut » et celle « par le bas », on peut voir combien son analyse enrichit les approches formelles classiques des fondements de la mesure qui se concentrent sur les conditions auxquelles un résultat de mesure représente correctement un système ou un phénomène. La prise en compte de l'historicité des raisons pour lesquelles les opérations de mesure courantes sont valides permet à van Fraassen de fournir une analyse plus complète de la signification des opérations de mesure et de leur rôle dans l'activité scientifique de construction et d'utilisation de théories. Tant que l'on considère ce qui se passe dans une opération de mesure en se plaçant du point de vue « par le haut », ses conditions de possibilité sont purement internes à la théorie qui prend en charge la propriété étudiée (sous l'angle de la mesure). C'est seulement une fois que l'on prend au sérieux la nécessité de résoudre le problème de la coordination que l'on sort du cadre théorique au sein duquel les opérations de mesure sont définies, et leurs résultats reçoivent un sens univoque, que la question de la portée empirique des résultats de mesure peut être posée.

Van Fraassen n'est pas le premier à se situer au point de vue « par le bas » ; ainsi Mach avait-il déjà posé le problème de la coordination dans cette perspective épistémologico-historique. Mais, en se penchant sur l'histoire de la thermométrie, il s'est d'emblée placé dans un contexte dans lequel certains paramètres physiques, comme les longueurs, étaient déjà donnés, et acceptés, comme mesurables. C'est Reichenbach (1928) qui a radicalisé le problème de la coordination en recherchant une coordination *générale* entre les espaces mathématiques accompagnés de leurs structures et des relations physiques. La réponse de van Fraassen est que cette question générale ne peut recevoir de réponse théorique, de réponse « par le haut » : selon lui, des définitions assurant la coordination ne peuvent être introduites

que dans un contexte historique dans lequel des coordinations antérieurement établies sont *déjà* acceptées et utilisées. Ainsi est-il impossible d'adopter le point de vue « de nulle part » pour résoudre le problème de la coordination : il faut nécessairement se placer ou bien à un point de vue où le problème est résolu théoriquement, ou bien au point de vue historique où la réponse est en train d'être construite, mais à partir de réponses *déjà données* à des problèmes semblables, pour d'autres quantités.

Remerciements

Cet article a bénéficié de la relecture attentive et des commentaires de Vincent Ardourel, Vincent Israel-Jost et Marion Vorms ; qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

Références

Borel, Emile, 1913, « La mécanique statistique et l'irréversibilité », *Journal de physique*, t 3, p. 189-196.

Bridgman, Percy William, 1916, « Tolman's principle of similitude », *Physical Review* 8: 423 – 31.

Carnap, Rudolf, 1932, « Über Protokollsätze », *Erkenntnis*, 3, p. 215-228.

Chang, Hasok, 2004, *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*, Oxford: Oxford University Press.

Darrigol, Olivier, 2003, « Number and measure: Hermann von Helmholtz at the crossroads of mathematics, physics, and philosophy », *Studies in the History and Philosophy of Science* 34: 515 – 73.

Mach, Ernst, 1896, *Die Prinzipien der Wärmelehre*, Leipzig: Barth.

Poincaré, Henri, 1898, « La mesure du temps », *Revue de métaphysique et de morale* 6, p. 1-13, reproduit dans *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902.

Reichenbach, Hans, 1928, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, Berlin/Leipzig: Walter de Gruyter 1928.

Suppes, Patrick, David M. Krantz, R. Duncan Luce et Amos Tversky, 1989, *Foundations of Measurement*, vol. i. New York: Academic Press.

van Fraassen, Bas, 2008, *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Oxford : Clarendon Press.