

PIERRE DUHEM, BIOGRAPHIE, BIBLIOGRAPHIE.

I-BIOGRAPHIE

Il sent le souffre ce Pierre Duhem qui fut d'extrême droite, royaliste, antidreyfusard, antirépublicain, intégriste catholique et nationaliste chauvin. C'est aussi un des plus brillants physiciens de son siècle, écarté des zones d'influence scientifiques justement pour les raisons que l'on vient d'évoquer.

Né à Paris le 10 juin 1861 et mort à Cabrespine, près de Carcassonne, le 14 septembre 1916. Etudes au collège Saint Stanislas de Paris; reçu 1^{er} à l'ENS, il publie son premier article scientifique en 1884 sur *Le potentiel thermodynamique des cellules électrochimiques*.

Il passe sa licence, son agrégation et présente, en 1886, son doctorat sur le concept de potentiel thermodynamique en chimie et physique. Il attaque le principe de Berthelot "du travail maximum" et s'en fait un ennemi irréconciliable et puissant. Sa thèse est rejetée; il doit en soutenir une autre, plus purement mathématisée sur la théorie du magnétisme (en 1888).

Cette opposition scientifique, ajoutée à des positions ultra (catholique, royaliste, antisémite et antidreyfusard) lui valent l'hostilité de ses pairs et des autorités universitaires. Il n'obtient pas la chaire parisienne que la qualité de ses travaux scientifiques justifie. Il enseigne la physique à Lille (87/93), à Rennes (93/94) et surtout à Bordeaux (94/1916).

Il refuse une chaire d'histoire des sciences au collège de France; il n'accepte pas d'y entrer "par une voie détournée" et veut y accéder en tant que physicien, ce qui n'advient pas. La reconnaissance et les honneurs seront cependant au rendez-vous de la fin de sa vie: membre associé de l'académie des sciences et d'autres académies étrangères.

PHILOSOPHIE DES SCIENCES:

Son principal ouvrage est *La Théorie physique, son objet, sa structure*, première édition en 1906. On verra qu'il oppose sa conception aux deux alternatives épistémologiques sérieuses qui peuvent être défendues.

1) Celle selon laquelle on considère les hypothèses de la Théorie Physique comme des moyens de révéler, de dévoiler la réalité des entités physiques sous-jacentes aux phénomènes considérés. Contre une conception explicative de la théorie physique. Il considère au fond que le rôle des théories physiques et de leur forme mathématique est de "sauver les phénomènes". On verra qu'il approuve plutôt le cardinal Bellarmine contre la confusion explicative de Galilée.

2) La seconde épistémologie physique qu'il rejette est celle qui donne pour tâche à la théorie de fournir des modèles, sous forme d'analogies mécaniques ou d'appareillages visant à sa représentation ou encore des modèles mathématiques trop aisément *adaptés* aux phénomènes au détriment de la logique. De façon plus ou moins justifiée, il vise là les physiciens anglais et notamment Lord Kelvin et Maxwell.

Sa conception -non explicative- de la théorie physique confère une réelle modestie ou tolérance à ses jugements. Ainsi n'a-t-il jamais prétendu que ses positions philosophiques impliquaient l'adoption du point de vue qui était le sien, à savoir énergétiste plutôt que mécaniste en physique. Le débat n'était au même niveau. Il défendait toutefois que son point de vue n'était pas moins légitime, philosophiquement que le mécaniste.

Tant que des faits ou expériences décisives ne se sont pas faites jour, des corps d'hypothèses contradictoires sont acceptables; à condition que ce ne soit pas un argumentaire métaphysique qui décide du choix.

L'objet de la Théorie physique est d'établir un système abstrait qui permet de résumer (nous reviendrons sur cette idée d'économie), et de classer un ensemble de lois expérimentales. C'est une fonction représentative et non explicative qui doit maintenir l'autonomie -la non pertinence scientifique- des théories explicatives, qui sont du ressort de la métaphysique.

La théorie physique est un système abstrait, construit par conventions et s'écarte de la notion d'induction, puisque plusieurs faits théoriques différents (c'est-à-dire de représentations symboliques) peuvent être pris pour traduction d'un même fait pratique et aussi de celle *d'experimentum crucis*; une expérience de physique ne

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

peut condamner une hypothèse isolée, mais un ensemble théorique. Les expériences ne sont pas la base de la théorie, mais son couronnement.

HISTOIRE DES SCIENCES

Bien entendu les plus considérables contributions de Duhem à l'histoire des sciences sont ses trois volumes *d'Etudes sur Léonard de Vinci* et ses dix volumes du *Système du monde*.

Il y défend l'idée majeure d'une tradition riche et continue en philosophie naturelle et en cosmologie dans toute la période qui va du XII^{ème} siècle à la "révolution scientifique". Duhem défend notamment que cette tradition est connue de Léonard puis de Galilée. Il est exact qu'il trouve une forte activité parisienne, au travers de Jean Buridan, Francis de Meyronne, Jordanus de Nemore, Albert de Saxe, Nicole Oresme.

Il est clair qu'il y a, dans ces travaux, un but apologétique: montrer que l'église n'a pas entravé, mais à l'inverse préparé et rendu possible le développement de la science moderne.

LES TRAVAUX SCIENTIFIQUES

A l'époque de sa formation (1880/90), la direction dominante des sciences physique et chimique consiste à ramener, à réduire l'ensemble des phénomènes au modèle mécanique issu de la mécanique classique-celle de Newton et du calcul intégral- si l'on préfère. Cette dernière fonctionne encore comme un cadre général unitaire d'exposition (d'explication) des lois naturelles.

Des grincements se font toutefois déjà sentir et des incompatibilités se font jour en particulier en chimie moléculaire et en physique atomique. Plutôt que de faire des suppositions ad hoc quant aux atomes et particules pour sauver le grand modèle mécaniste (tout se fait par mouvement et choc de particules), Duhem se convainc que la bonne voie est plutôt de penser la mécanique classique comme un cas particulier d'une théorie plus vaste.

Il pense que les soubassements d'une telle théorie descriptive, valable dans les différents domaines de la chimie et de la physique, sont à chercher dans une conception d'une *thermodynamique générale*, ou *Energétique* qui inclurait l'électricité, le magnétisme aussi bien que la mécanique. Cette recherche

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

culminera, en 1911 dans son *Traité d'énergétique* où il n'est question ni d'atomes, ni de molécules et dont sont aussi absentes l'électricité et le magnétisme.

Rappelons que la thermodynamique étudie plus particulièrement les transformations de chaleur en travail et réciproquement. Le premier principe de thermo. ou *principe d'équivalence* énonce l'équivalence du travail et de la chaleur, qui sont deux formes d'une même grandeur physique, l'énergie. Le second principe, ou *Principe de Carnot* exprime que la transformation de chaleur en travail est plus difficile que l'inverse. L'énergie se transforme et se dégrade.

Il se prononce pour une théorie physique abstraite où les changements d'état ne soient pas ramenés au mouvement local.

Il s'impose rapidement comme un des fondateurs de la chimie physique moderne. Il est très influencé par les travaux et théories de Gibbs et Helmholtz. Celui-ci a élargi les domaines de validité des principes de la thermodynamique et leur a donné une formulation mathématique rigoureuse. Énonçant (en 1847) le principe de *Conservation des énergies potentielles et des forces vives*, Helmholtz montre que l'on peut aussi appliquer ce principe -jusque là mécanique- aux phénomènes électriques et électromagnétiques, de même qu'aux chocs inélastiques et aux frottements qui semblaient alors lui échapper.

Sa méthode des potentiels thermodynamiques permet à Duhem de retrouver des résultats déjà approchés par des méthodes plus classiques et d'en obtenir de nouveaux. Sa théorie des états thermodynamiques quasi-stables lui permet de décrire de façon très détaillée les étapes menant du second principe de la thermodynamique jusqu'à la notion d'entropie et de potentiel thermodynamique.

Son second livre, *Hydrodynamique, élasticité, acoustique* (1891) eut une grande influence, sur les physiciens et mathématiciens, toujours en fonction de la rigueur axiomatique et déductive qu'il impose dans le domaine traité: ici sur les équations de propagation des ondes. Son collègue et ami, le mathématicien Jacques Hadamard s'en réclamera fréquemment. Ses résultats sur les quasi-ondes ont reçu des confirmations récentes (vers 1960).

Il critique "sans pitié" les travaux de Maxwell pour leurs contradictions et le flou de leur caractère déductif et présente ces résultats comme des cas particuliers de

la théorie d'Helmholtz. Les théories de Maxwell ont depuis triomphé quoique des physiciens aient montré depuis qu'elles dérivait mieux encore des théories d'Helmholtz-Duhem. Les lois de Maxwell décrivent, par un ensemble d'équations (vers 1860) les phénomènes électriques et électromagnétiques de la façon suivante:

-la matière peut porter des charges électriques de deux signes opposés, les charges de même signe se repoussent et celles de signe opposé s'attirent.

-les charges électriques sont soumises à deux types de force, électriques et magnétiques que l'on décrit par des champs.

-les champs électrique et magnétique sont liés l'un à l'autre par des lois simples, en particulier lorsqu'ils varient dans le temps.

Or ces lois, qui tendaient à homogénéiser les diverses manifestations de la matière et donc à unifier la physique sous le modèle classique mécaniste sont en crise dans la mesure où elles supposent une vitesse de la lumière dépendante du mouvement du repère de l'expérience. Les expériences décisives de Michelson, à partir de 87, montrent le contraire: et semblent autoriser la thèse : la vitesse de la lumière est constante.

Certaines propriétés difficilement compatibles de l'Ether affaiblissent la doctrine du « tout mécanique » : il devrait être solide pour assurer les vibrations transversales des ondes e.m., mais les calculs montrent qu'il ne peut être stable.

Son objection à la théorie de la relativité s'explique bien entendu par le fait qu'elle soit née d'une volonté de récupérer comme valides les équations de Maxwell et les théories atomiques des électrons, qu'elle se soit placée dans le cadre général d'une physique corpusculaire et donc mécaniste.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

La théorie physique, son objet, sa structure est un des creusets de l'épistémologie du XXe siècle. Il détermine le travail de Koyré, de Tannery, de Sarton, plus tard de Bachelard, de Kuhn, de Popper, de Dagognet.

Il résonne avec le(s) courant(s) positiviste(s).

Il est, en direct, dans la tourmente générale de la physique et de la chimie.

LA THEORIE PHYSIQUE, PREMIERE PARTIE. SON OBJET

La première édition de cette œuvre date de 1906 les articles furent écrits en 1904/5); la seconde, augmentée notamment du chapitre *La physique du croyant*, de 1914. C'est celle-ci qui est présentée aujourd'hui.

"Depuis (la première édition), nombre de débats, au sujet de la théorie physique, ont été agités entre philosophes, et nombre de théories nouvelles ont été proposées par les physiciens" (p XIII de la préface).

-1905, Einstein pose les principes de la relativité restreinte,

-1910, Jean Perrin établit l'existence des atomes en chimie et donne le nombre d'Avogadro

-Rutherford propose le modèle planétaire de l'atome (déjà imaginé par Perrin)

-1913, Bohr propose la quantification des orbites électroniques dans le modèle planétaire de Rutherford

Voici donc des "découvertes" qui, pour l'essentiel affermissent un modèle corpusculaire de la matière et donc une manière d'explication qui semblent à l'encontre des conceptions duhémiennes. En fait, loin d'en être troublé, Duhem ne pense pas que tout ceci remette en cause ses conceptions épistémologiques, au contraire : "*Ni ces discussions, ni ces inventions ne nous ont révélé de raison de mettre en doute les principes que nous avons posés*" (Préface 2^{de} édition)

Est-ce de l'obstination ? Non car les atomes qui font leur retour (irrésistible) sont extrêmement différents des atomes-masses de Gassendi, Boyle, Newton, Mendeleïev. Ils offrent des possibilités d'interprétation de ce qu'est la matière, fort éloignés du corpuscularisme classique.

Programme annoncé :

"Avant d'appliquer un instrument à l'étude d'un phénomène, l'expérimentateur, soucieux de certitude, démonte cet instrument, en examine chaque pièce, en étudie soigneusement l'agencement et le jeu, la soumet à des essais variés; il sait alors d'une manière exacte ce que valent les indications de l'instrument et de quelle précisions elles sont susceptibles; il peut en faire usage avec sécurité".(Introduction, p XV).

L'instrument dont il s'agit ici de faire usage avec sécurité n'est pas tel ou tel ensemble de lois naturelles ou physiques mais la théorie physique elle-même; c'est elle qu'il s'agit de démonter et d'évaluer.

Remarque. Dans le texte de 1913, *Examen logique de la théorie physique*, Duhem écrit cependant :

La physique n'est pas une machine qui se laisse démonter ; on ne peut pas essayer chaque pièce isolément et attendre, pour l'ajuster, que sa solidité en ait été minutieusement contrôlée ; la science physique c'est un organisme que l'on doit prendre tout entier...si quelque gêne, quelque malaise se révèle dans son fonctionnement, le physicien sera obligé de deviner quel est l'organe qui a besoin d'être redressé ou modifié, sans qu'il lui soit possible d'isoler cet organe et de l'examiner à part : l'horloger auquel on donne une montre qui ne marche pas, en sépare tous les rouages et les examine un à un jusqu'à ce qu'il ait trouvé celui qui est faussé ou brisé ; le médecin auquel on présente un malade ne peut le disséquer pour établir son diagnostic ; il doit deviner le siège du mal par la seule inspection des effets produits sur le corps entier ; c'est à celui-ci, non à celui-là que ressemble le physicien chargé de redresser une théorie boiteuse. (p. 110)

CHAPITRE PREMIER. THEORIE PHYSIQUE ET EXPLICATION METAPHYSIQUE.

§1. LA THEORIE PHYSIQUE CONSIDEREE COMME EXPLICATION.

On peut chercher à expliquer des phénomènes,

"Expliquer, c'est dépouiller la réalité de ses voiles, de ses apparences pour la voir nue, face à face" (pp.3/4)

Commentaires généraux possibles sur le concept d'explication¹.

Il convient de remarquer que la recherche de l'explication est une attitude héritée du réalisme cartésien. Il n'est pas certain qu'elle ait été hégémonique au cours du XIX^e. Le positivisme, en un sens, faisait barrage à la thèse de la vérité « selon la nature des choses ».

Duhem admet que certaines zones physiques très simples et très limitées puissent fournir des explications-dévoilement (c'est le cas de cordes vibrantes- chap.1, p4). Mais ceci est tout à fait exceptionnel. (voir plus loin)

Ceci advient lorsque « les moyens de connaître sont encore ceux du sens commun ...lorsque la science observe directement les faits» (*Examen logique...* 109)

Duhem donne deux cas : les théories acoustiques et les théories optiques.

Les théories acoustiques :

On a trois niveaux :

a. Les *faits acoustiques*, sensations auditives, émotions musicales : les sons affaiblis ou renforcés, montants, descendants etc.

b. Notre intellect élabore des notions abstraites : intensité, hauteur, octave, accords, timbre, etc. et les rapports entre ces notions. Ce sont les *lois expérimentales* (non opposées, mais équivalentes aux *notions abstraites*).

¹ Voir le très bon texte de Meyerson, *De l'explication dans les sciences*.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Ces notions abstraites ne sont pas la réalité, « elles font connaître le son tel qu'il est par rapport à nous, non tel qu'il est en lui-même, dans les corps sonores » (4-5).

c. La théorie acoustique qui montre que les faits acoustiques sont des mouvements vibratoires périodique. Voici *la réalité*, voici *l'explication*. Ici, le dévoilement a eu lieu car la réalité sous-jacente a été rendue accessible à nos sens. « Les théories acoustiques sont des explications etc. » (p.5)

Il y a un certain degré de perfection et de certitude. C'est l'exception et non la règle.

Second exemple, « l'ensemble des phénomènes observés par le sens de la vue » (p. 5)

On a les mêmes trois niveaux.

a. Ensemble des observations

b. Elaboration par analyse rationnelle des notions abstraites et générales et rapport entre elles. On obtient les *lois expérimentales de l'optique*.

c. Là, la situation est différente : il existe une théorie optique hypothétique, la théorie vibratoire avec l'Ether et ses propriétés supposées (p. 6) Cette théorie s'efforce d'offrir des propositions d'où se déduisent les lois et les phénomènes.

La théorie est loin de s'imposer directement à nos sens ; nous ne « voyons pas » l'éther (même avec des instruments sophistiqués).

§ 2. SELON L'OPINION EXPLICATIVE, LA PHYSIQUE THEORIQUE EST SUBORDONNEE A LA METAPHYSIQUE.

Vouloir expliquer, c'est mobiliser la métaphysique. Dans ce qui suit, Duhem va argumenter Contre l'explication de la nature.

Vouloir expliquer la nature c'est d'abord admettre deux choses comme vraies:

1)"Sous les apparences sensibles que nous révèlent nos perceptions, il y a une réalité, distincte de ces apparences" (p7). Thèse du réalisme faible que ne contestera pas Duhem.

2) On doit pouvoir répondre à la question suivante : «*Quelle est la nature des éléments qui constituent la réalité matérielle?*»(p7). Thèse du réalisme fort ou heuristique, ce à quoi il s'oppose radicalement.

Ces deux problèmes étant transcendants aux méthodes expérimentales, toute démarche qui les convoque, convoque du même coup la métaphysique.

Si donc une théorie physique doit expliquer, alors la physique théorique n'est pas une science autonome, elle est subordonnée à la métaphysique.(p.8)

§3. SELON CETTE OPINION, LE SYSTEME METAPHYSIQUE DONNE SA VALEUR A LA THEORIE.

La métaphysique est un champ d'oppositions, de convictions contraires bref tout sauf le

domaine du consentement général. Livrer la théorie physique à l'arbitrage ou à la dépendance de la métaphysique, c'est lui interdire l'accès au consentement universel (p.8).

Par contre, en mathématique, affirme Duhem :

"Les vérités qui composent les sciences purement mathématiques sont, au plus haut degré, des vérités de consentement universel; la précision du langage, la rigueur des procédés de démonstration ne laissent place à aucune divergence durable entre les divers géomètres; à travers les siècles, les doctrines se développent par un progrès continu, sans que les conquêtes nouvelles fassent rien perdre des domaines antérieurement conquis" (p8)

Quelle belle confiance! Duhem passe sous silence les oppositions existantes dans le champ mathématique. (Cet argument est repris presque identique au chapitre I de la seconde partie.)

A partir du cas de l'aimantation, Duhem présente Les quatre grandes cosmologies (p9-13)

Les métaphysiques candidates à valider le caractère explicatif de la connaissance physique sont, tout au long de la T.P. regroupées en quatre catégories. (Duhem les nomme aussi les quatre grandes écoles cosmologiques). On a là une "Tétralogie" très significative pour Duhem: elle est reprise dans le cours de la *Théorie Physique* et aussi en quatre chapitres de *l'Evolution de la mécanique*. On peut dire que cette classification est fournie par l'histoire des sciences et de la philosophie. Elle n'est pas vraiment *a priori*.

-Les péripatéticiens, avec leur substance matérielle résultant de l'union de sa matière elle-même (le substrat), permanente et inaltérable et de sa forme changeante (en devenir). Pour Duhem, lorsque la réduction des phénomènes jusqu'à ces notions de substances, qualités, puissance, mouvement et acte auront été réalisées, alors, *l'explication sera achevée*².

-Les newtoniens qui réduisent les secrets de la matière à des corpuscules massifs disposés dans des champs attractifs. Duhem reconnaît que tous les newtoniens ne se précipitent pas dans la conception explicative (Newton lui-même est prudent³, Laplace aussi).

Ainsi, Maupertuis, principal instigateur du newtonianisme en France écrit-il :

« Newton n'a jamais regardé l'attraction comme une explication de la pesanteur des corps les uns vers les autres : il a souvent averti qu'il n'employait ce terme que pour désigner un fait, et non point une cause ; (III) qu'il se pouvait même que cette dépendance fut causée par quelque matière subtile qui sortirait des corps. » (*Discours*, cité in Charrak, p.52)

Laplace aussi :

Le principe d'attraction universelle est-il une loi primordiale de la nature ? N'est-il qu'un effet général d'une cause inconnue ? Ici, l'ignorance où nous sommes

²L'Evolution de la mécanique, p11.

³ Newton a reconnu le pouvoir faiblement explicatif de la théorie de l'attraction et, au début de ses travaux, a « envisagé de réduire la gravitation à une action du milieu », (Meyerson, *Identité et réalité*, p. 77). Voir tout l'appendice I de ce livre notamment p. 521 sq. C'est Roger Cotes dans la préface à l'édition de 1713 qui subsume l'attraction, alors que Newton n'affirme pas que la gravitation est due à une véritable action à distance.

des propriétés intimes de la matière nous arrête et nous ôte tout espoir de répondre d'une manière satisfaisante à ces questions.⁴

-Les atomistes pour lesquels la physique doit se ramener à la mécanique des chocs de petits corps durs et rigides. Cette idée dit-il est "*souvent reprise depuis ce temps*". Duhem pense-t-il au déferlement atomique contemporain sur la physique? En tout cas à la chimie.

Il faut garder à l'esprit l'immense distance conceptuelle entre les atomes Epicuro-Gassendiens-mendeleeeviens et leurs successeurs promus par Bohr, Born et *al.*

-Mais, voici venir les cartésiens pour lesquels la matière est l'étendue, ou dit Duhem "une sorte de fluide immense, incompressible et absolument homogène, dont les parties peuvent être affectées de pressions et de tourbillons." On trouve, dans *l'Evolution de la mécanique* (pp13-19) une présentation critique du cartésianisme. De très classiques arguments contre la réduction de la matière à l'étendue y sont clairement exposés.

Les raisons, causes, lumières, données pour des explications par les uns sont systématiquement tenues pour des qualités occultes par les autres. Où les uns estiment avoir levé le dernier voile dont se couvrait la réalité matérielle et naturelle, les autres dénoncent la mystification et l'illusion.

Le chapitre de Meyerson sur « le mécanisme » est absolument remarquable sur cette analyse⁵.

§ 4. LES CAUSES OCCULTES

Duhem revient sur une idée : seuls les péripatéticiens seraient coupables de « faire appel à des causes occultes » (p.13). Non, dit Duhem, en réalité chacune accuse les autres de cette faute.

§5. LA METAPHYSIQUE EST INAPTE A EDIFIER UNE T.P.

Une autre raison condamne le couple Théorie physique et métaphysique: une même école métaphysique est incapable de fournir des enseignements assez précis et détaillés pour en déduire une théorie physique. Celle-ci serait donc sous une dépendance qui se révèle en même temps impuissante à la constituer. Exemples du cartésianisme et de la conservation de la quantité de mouvement qui eut aussi bien pu être celle de la force vive... (Leibniz). La T.P. se dote alors d'hypothèses qui ne sont pas nécessairement déduites ou déductibles des principes de la métaphysique⁶.

CHAPITRE II. THEORIE PHYSIQUE ET CLASSIFICATION NATURELLE

Duhem déduit de la critique de la théorie explicative deux questions; celle de la possibilité du découplage de la théorie physique et de la doctrine métaphysique et celle de la recherche d'une méthode qui soit autosuffisante.

Et d'abord, voici quelle est, pour Duhem la définition de la théorie physique:

⁴ Exposition du système du monde, livre IV, chap. XVII.

⁵ *Identité et réalité*, Chapitre II.

⁶ Voir le très bon texte de Belaval, *Leibniz critique de Descartes*. pp512/3. (Voir cours long, p 7-8)

Une *TP* n'est pas une explication, c'est un système de propositions mathématiques, déduites d'un petit nombre de principes, qui ont pour but de représenter aussi exactement que possible un ensemble de lois expérimentales (p. 24)

§I. LES QUATRE OPERATIONS

Duhem décrit alors les quatre opérations constitutives de la Théorie Physique:

1) La définition et la mesure des grandeurs physiques.

La première se passe *dans le champ des lois naturelles et d'une première traduction*: cette première opération est double et sera détaillée dans les deux premiers chapitres de la seconde partie:

-Choix d'un système de propriétés simples dont les autres sont des combinaisons (ce que Poincaré appellerait dans *Science et Méthode* des faits à haut rendement). Par exemple l'attraction, le champ électrique, les lois de l'optique, lois de la thermodynamique...

-Puis mise en relation univoque et formelle de ces propriétés avec des objets mathématiques (sans considérations à la nature des choses). Chaque "état" de la propriété physique est associée à une valeur de la fonction symbolique (la grandeur) exemples: F associé à la force, m à la masse, d à la distance, $\sin i$ à l'angle d'incidence, etc.

C'est très important. On verra les limites de ces protocoles de mesure.

2) Le choix des hypothèses.

Dans le champ des symboles: Mise en œuvre d'un système de propositions hypothétiques reliant les symboles ou fonctions mathématiques des grandeurs. Il s'agit bien d'hypothèses mathématiques (choix des opérations et des transformations autorisées ainsi que de leurs règles, choix des ensembles de définition) et donc, seule la contradiction logique peut l'invalider -à ce stade-Le caractère arbitraire de la théorie vient de ce qu'il est en lui-même détaché de toute référence aux phénomènes. « Ils ne prétendent en aucune façon énoncer des relations véritables entre les propriétés réelles des corps » (p.25). Ce sont les *principes* capables de produire des déductions. On les nomme aussi *hypothèses*.

Quelques exemples :

1. Un vecteur force peut être additionné avec un autre mais pas multiplié (ou alors il donnera autre chose qu'un vecteur force, chose dont ne connaît pas -à ce stade- la signification ou la correspondance physique.

Développons cet exemple. On décide (étape 1) de mesurer la vitesse par un vecteur ; ce fut une longue et difficile élaboration. Etape 2, on choisit de faire fonctionner sur cette grandeur, les opérations de l'espace vectoriel (add. et produit par un scalaire) ; on « voit » (plus ou moins) ce qui correspond physiquement à l'addition vectorielle (la composition des vitesses). Mais, dans l'étape 2, on peut laisser libre cours à la théorie mathématique et multiplier des vecteurs (sur le modèle du produit des complexes). Alors, on ne voit absolument plus ce qu'est, physiquement,

un produit de vecteurs.

Etape 3. Toutefois, l'opération mathématique produit des résultats ; les deux « vitesses multipliées » (ce que ça veut dire, ceci reste aveugle, du point de vue des phénomènes). Et, au final, on a bien un corps multiplicatif dans les vecteurs.

Voici que, étape 4, on est en mesure d'interpréter la multiplication vectorielle comme une rotation. C'est exactement ce qui s'est passé avec la *transformation de Lorentz* qui peut être interprétée comme une rotation dans R^4 .

2. Autre exemple : telle force agit sur un chemin ; je pose comme hypothèse de pouvoir en faire l'intégrale sur ce chemin. Ceci me produira une quantité : a-t-elle un correspondant dans les *propriétés réelles des corps*, ce n'est pas exigible.

Exemples fournis par P. Duhem dans son Analyse de l'ouvrage de Ernst Mach, « La mécanique » :

Au début, un petit nombre d'hypothèses ou d'équations sont *postulées* d'emblée dans toute leur généralité ; ainsi, à la base de la thermodynamique, on pose le principe de la conservation de l'énergie et le principe de Carnot-Clausius ; à la base de l'Electricité, on inscrit les six équations de Maxwell et l'expression de l'énergie électrique. L'Analyse mathématique tire alors des principes posés, une foule de conséquences... (première ed. 1903, réed. Par A. Brenner à la suite de *L'évolution de la mécanique, Mathesis, Vrin, 1992, p. 460*)

La seule chose qu'on réclame, mais elle est absolue : ne pas être contradictoires.

Je développe un peu car c'est le point le plus délicat. Un exemple très clair est fourni par Duhem lors de son long développement sur la double réfraction, au chapitre III.

Un phénomène complexe est connu depuis le XVII^e, la double réfraction. Il y a des cristaux biréfringents, et bientôt des liquides, et bientôt des cristaux biaxes, des situations (d'écoulement par exemple) qui provoquent la double réfraction ou la double réfraction bi axiale.

Que fait Augustin Fresnel ? Comment parvient-il à la théorie ?

Par une intuition de géomètre où aucune hypothèse sur la nature de la lumière ou sur la constitution des corps transparents n'avait de place

Il remarqua que toutes les surfaces d'onde que Huygens avait eu à considérer pouvaient se tirer, par une construction géométrique simple, d'une certaine surface du second degré ; cette surface était une sphère pour les milieux uniréfringents, un ellipsoïde de révolution pour les milieux biréfringents uniaxes ; il imagina qu'en appliquant la même construction à un ellipsoïde à trois axes inégaux, on obtiendrait la surface d'onde qui convient aux cristaux biaxes.

Cette audacieuse intuition a été couronnée du plus éclatant succès ; non seulement la théorie proposée par Fresnel s'est accordée minutieusement avec toutes les déterminations expérimentales ; mais encore elle a fait deviner et découvrir des faits imprévus et paradoxaux que l'expérimentateur, livré à lui-même, n'aurait jamais eu l'idée de rechercher ; telles sont les deux espèces de réfraction conique ; le grand mathématicien Hamilton a déduit, de la forme de la surface d'onde des cristaux biaxes, les lois de ces étranges phénomènes, que le physicien Lloyd a ensuite recherchés et découverts.

La théorie de la double réfraction bi axiale possède donc cette fécondité et ce pouvoir de divination où nous reconnaissons les marques d'une classification naturelle ; et cependant, elle n'est pas née d'un essai d'explication. (p.51-52)

3) Le développement mathématique de la théorie.

Toujours dans le champ des symboles: Calcul analytique et algébrique sur cet ensemble symbolique/fonctionnel; toujours sans considération de la réalité ou possible conception de transformations physiques correspondantes. On notera que cette étape de la constitution de la T.P. est cependant porteuse de prévisions possibles, d'inventions conceptuelles dans le champ des faits et des lois.

Par exemple, l'intégrale des chemins de la force ne dépend pas du chemin, mais des points de départ et d'arrivée : c'est un résultat important de la théorie.

Ou encore, soit un ensemble de charges électriques disposées dans l'espace. Le calcul conduit à produire des lignes ou des surfaces équipotentielles : que sont-elles ? Elles n'ont, à ce moment, qu'une existence mathématique.

Encore des exemples :

Les choix des formalismes quantiques : la voie Vecteurs-Matrice de Von Neuman, Max Born et Heisenberg. Le formalisme mathématique, dit *matriciel*, mis au point par Heisenberg est une superbe expression de cette *mécanique quantique* qui revendique son ignorance des réalités microphysiques, mais parvient, mieux que toute théorie physique avant elle, à décrire et prévoir les phénomènes à l'échelle atomique.

La voie de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, dès 1926, donne une très élégante formalisation mathématique à la mécanique ondulatoire et montre que le formalisme *habituel* du à Werner Heisenberg (selon un modèle discontinu) est une transposition tout-à-fait conforme du sien. En outre, en 1927, on sait donner une réalité expérimentale à l'onde accompagnant l'électron

4) La comparaison de la théorie avec l'expérience.

Seconde traduction vers le champ des faits et des lois. C'est l'étape du retour aux propriétés physiques. L'ensemble des conséquences du calcul 3) est confronté -sous forme de "*jugements portant sur les propriétés physiques des corps*" - aux lois expérimentales. De la concordance de ces jugements avec ces lois dépend la validation et l'extension de la théorie ou sa mise en cause -totale ou partielle.

« ces jugements, on les compare aux lois expérimentales que la théorie se propose de représenter ; s'ils concordent avec ces lois, au degré d'approximation ..., la théorie a atteint son but ; sinon, elle est mauvaise et doit être rejetée ou modifiée » (p.26)

En effet insiste Duhem "L'accord avec l'expérience est, pour une Théorie Physique, l'unique critérium de vérité".

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

On observera donc que l'expérience n'a pas de caractère fondateur, qu'elle ne présente pas de base à une méthode inductive; elle sert d'arbitre final, couronnement ou rejet des jugements théoriques. On y reviendra.

On observera aussi qu'il y a deux étapes de choix plus ou moins arbitraire dans le processus de constitution de la théorie, aux étapes respectives 1) et 2): choix du système de propriétés simples (Duhem y reviendra dans la seconde partie) et choix dans le champ symbolique des règles de fonctionnement de la théorie. C'est ce qu'exprime Jean Piaget en disant : "*Duhem a fort bien expliqué que la découverte d'une loi nouvelle n'impose pas, mais permet et suggère la formulation d'un postulat*"⁷

Ceci introduit un certain degré de contingence et en tout cas une réelle possibilité de variation dans l'élaboration d'une théorie physique. La porte est ouverte, en droit, à ce que plusieurs théories physiques concernent le même champ naturel, sans qu'en souffre la vérité.

Un point fort de la thèse est la non nécessité d'une adéquation entre un élément de la théorie et une chose physique réelle. Il tourne le dos à la thèse d'Einstein (son réalisme) que l'on voit bien, par exemple dans l'énoncé du paradoxe EPR :

1935 article Einstein, Podolsky, Rosen :

« Dans toute théorie complète, il y a un élément correspondant à chaque élément de réalité. Pour qu'une grandeur physique soit réelle, il suffit qu'il soit possible de la prédire avec certitude, sans perturber le système... »⁸

Ils poursuivent :

« Dans toute réflexion un peu sérieuse concernant une théorie physique, il importe de prendre en compte la distinction entre la réalité objective, laquelle est indépendante de toute théorie, et les concepts physiques avec lesquels la théorie opère [...] Ces concepts (de la théorie) sont faits pour correspondre à la réalité objective et c'est à l'aide ces concepts que nous représentons cette réalité» (*Id.* 29)

Dans sa réponse, Bohr écrira entre autre :

[l'interaction entre l'objet et les appareils de mesure] implique l'abandon de la notion traditionnelle de causalité et une révision radicale de notre attitude en ce qui concerne la réalité physique » (*id.*, p.30)

La première page du Chap. IV (77) est un résumé soigné de tout ceci.

Un exemple court et précis est donné au chap. III, §5 (p. 99-100). La constitution de la *Théorie des attractions et répulsions des corps électriques (électrodynamique)*.

§ II. L'ECONOMIE DE PENSEE

Ne craignant pas les formules frappantes, il indique qu'une telle théorie

"Touchant la nature même des choses qui se cachent sous les phénomènes dont nous faisons l'étude, la théorie ne nous apprend absolument rien et ne prétend

⁷J.Piaget: in Logique et Connaissance scientifique. Pléiade Gallimard, p729.

⁸ Cité par Chevaley in van Fraassen, *Lois et symétries*, Vrin, *Mathesis*, p.28)

rien nous apprendre" (p27) Mais la "condensation d'une foule de lois en un petit nombre de principes est un immense soulagement pour la raison humaine".

Il cite Ernst Mach et sa notion centrale d'économie de pensée, dont il est proche sur bien des points essentiels d'épistémologie (en particulier sur le rejet des théories explicatives sans que l'on doive prêter à Duhem un point de vue purement instrumentaliste de la théorie ni un refus aussi radical de l'existence même de lois de la nature). Nous verrons plus loin que Duhem se persuade qu'il existe bien une réalité ontologique cachée en deçà des phénomènes.

Le § p. 27 « Tout d'abord...chaque jour » est important car il présente la double réduction, double économie, condensation : des faits concrets aux lois (empiriques) puis, des lois aux théories, c'est-à-dire aux hypothèses.

Cette présentation est reprise très précisément début du Chapitre IV (p. 77-78) avec renvoi à ce passage-ci).

Le double travail d'abstraction et de généralisation par lequel une théorie se constitue réalise, avons-nous dit, une double économie intellectuelle ; il est économique lorsqu'il substitue une loi unique à une multitude de faits, il est encore économique lorsqu'il substitue un petit groupe d'hypothèses à un vaste ensemble de lois. (78)

Evocation très vivante de la loi de la réfraction comme *économie de pensée* chez Mach (p. 28).

Duhem sur l'*Economie de pensée* chez Mach.

Infos dans l'Analyse de l'ouvrage de Ernst Mach, *La mécanique. Etude historique et critique de son développement*.

Première parution. *Bulletin des sciences Mathématiques*, t. 27, pp.261-283, 1903

Mach soutient une doctrine philosophique qui lui fait « considérer la Science comme *économie de la pensée*. (444)

La raison principale est celle-ci :

L'immense multitude, l'infinie variété des objets proposés à la connaissance de l'homme excèderaient sans mesure...Il lui faut donc ...qu'il les condense, qu'il les concentre, qu'il en extraie le suc... Ce résumé, cette abstraction... est l'objet propre du travail scientifique... L'essence de ce progrès est une *économie* de plus en plus grande de la pensée. (445)

Selon Mach, « *dans la nature il n'y a que des faits*. Dans la nature, il n'y a ni causes, ni effets...Les répétitions de cas semblables ...n'existent que dans l'abstraction que nous employons afin de copier les faits dans la pensée. » (cité p. 445)

L'expérience ne donne pas la loi.

« Les procédés d'invention ne se codifient pas ; l'inventeur d'une loi se laissera suggérer l'énoncé de cette loi par les considérations les plus diverses ; l'induction, la généralisation, l'analogie seront, le plus souvent, ses guides préférés » (Duhem, expliquant Mach, p. 446)

L'exemple qui suit –et qui est repris dans *La théorie Physique*- concerne la loi de la réfraction

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

qui rassemble, et donc concentre, l'infinité des valeurs d'angle d'incidence pour en faire un énoncé : $\sin i = n \cdot \sin r$. On observe que la loi est donnée sous sa forme la moins explicative qui soit (au lieu du $r \cdot \sin i = i \cdot \sin r$ de Leibniz par exemple.)

Mach ajoutait –ce que ne ferait pas Duhem– que, « dans la nature, il n'existe pas de loi de la réfraction, mais seulement de multiples cas de ce phénomène » (*Histoire de la mécanique*).

Poincaré insiste sur cette *économie de pensée* :

La méthode, c'est précisément le choix des faits...L'importance d'un fait se mesure à son rendement, c'est-à-dire à la quantité de pensée qu'il nous permet de d'économiser (*Science et méthode*, p. 12 et p23)

Deux étages : Des *faits concrets* réduits à une *loi physique*.(loi expérimentale)

Des *lois expérimentales* (une foule de) à une théorie qui les condense

On ne perdra pas de vue que l'*Economie de pensée* dont se réclame Duhem, poussée au plus loin, a pour horizon l'*Energétique*. En effet, on lit dans *l'Analyse de la Mécanique de Mach* :

L'*économie de pensée*, dans laquelle M. Mach voit le but de la science, nous presse en effet, de substituer à l'ancienne mécanique, une science dont les principes, de plus en plus généraux, nous donne la représentation résumée d'un ensemble de faits de plus en plus vaste. Depuis quelques années nous voyons se multiplier les tentatives qui ont pour objet l'édification d'une telle *Energétique*. (p. 461)

Bref, selon une belle formule duhémienne: (p29)

"Le développement de la physique provoque une lutte continuelle entre la nature qui ne se lasse pas de fournir et la raison qui ne veut pas se laisser de concevoir". (Paraphrase de Pascal, dans le fragment *Disproportion de l'homme*).

§ III. LA THEORIE COMME CLASSIFICATION

La Théorie est pour le moment caractérisée par

- 1) un recours systématique au symbolisme
- 2) par une économie de pensée, elle n'est pas purement conventionnelle.

La question est alors légitime de se demander si Duhem n'a pas rejoint les rangs des positivistes logiques, si sa théorie physique n'est pas instrumentale, bref, si la *Théorie Physique* a quelque rapport avec la réalité des choses; si tant est qu'une telle réalité existât?

C'est la théorie qui devra mettre de l'ordre dans les lois empiriques, qui donnera les regroupements utiles et efficaces (là où l'observation empirique pouvait se tromper; ex. Newton, p.30); c'est-à-dire ceux qui permettront les prévisions; ceux qui relèvent du même instrument, du même outil symbolique mathématique.

Il y a phénomène de coloration dans la réfraction (arc-en-ciel, prisme), dans les interférences (les anneaux), dans la diffraction (franges de Grimaldi). L'unité *phénoménale newtonienne* est une fausse route, une unification stérile, celle de *l'observateur*. La répartition en des classes

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

distinctes est la réussite du *théoricien* : ce ne sont pas les mêmes principes symboliques qui décrivent efficacement les trois groupes de phénomènes.

Duhem ouvre alors grand la porte au thème du beau qui naît de l'ordre, de la séduction qu'il opère sur notre esprit. La théorie physique accède à l'harmonie de l'œuvre d'art.

Ce thème est aussi développé par Poincaré dans *Science et méthode* (1922) :

Le savant n'étudie pas la nature parce que cela est utile ; il l'étudie parce qu'il y prend plaisir et il y prend plaisir parce qu'elle est belle ... Je veux parler de cette beauté plus intime qui vient de l'ordre harmonieux des parties et qu'une intelligence pure peut saisir. (p. 15)

Cette "*émotion esthétique*", cette «*clarté éblouissante*» suggère, impose à notre esprit l'idée d'une classification naturelle. Il y a là un acte de foi (36): une limite, un horizon inconnaissable, inaccessible surgit dont il s'agit de préciser les fonctions.

Duhem aurait-il à ce moment rejoint les tenants des théories explicatives? Non car, au spectacle de l'ordre admirable que sa théorie lui dévoile il ne reconnaît toujours pas la réalité toute nue des choses, il reconnaît une image, une représentation; mais cette représentation a acquis un caractère fondamental et nouveau, elle est bien l'image et la représentation d'un ordre naturel ontologique, réellement existant qui reste et demeurera inconnu et voilé mais qui a manifesté sa présence.

En optique, nous n'affirmons pas que nous avons réellement affaire à des mouvements vibratoires, à un éther subtil; mais notre symbolique géométrique, si puissante à classer, prévoir les phénomènes lumineux nous persuade "*que cet ordre et cette organisation sont l'image d'un ordre et d'une organisation réels*".

"L'ordre logique dans lequel la théorie range les lois expérimentales est le reflet d'un ordre ontologique...un ordre transcendant à l'expérience" (p35)

C'est l'idée d'un ordre caché, des causes finales pourquoi pas, invoquées par Leibniz, mais, à l'inverse de ce dernier, pour qui elles pouvaient être source de connaissance (principe de minimum), elles sont ici muettes, hors de la physique ; seule leur image est concevable.

On ne s'étonne pas de la référence à Pascal :

"Nous avons une impuissance de prouver invincible à tout le dogmatisme; nous avons une idée de la vérité invincible à tout le Pyrrhonisme".

Remarque: En ce sens, on a pu défendre -légitimement- que Duhem était Phénoménaliste -défendant que nous ne pouvons connaître que les phénomènes et non les choses en soi, sans pour autant nier leur existence (voire p. 35-36).

Remarque : cette considération est « en dehors de la physique » (p. 35).

§V. LA THEORIE DEVAÑANT L'EXPERIENCE. CLASSIFICATION NATURELLE, PROBABLE ET POSSIBLE

Un puissant argument en faveur de cette ordre ontologique caché mais réel est développé par

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

une réflexion sur la prédictibilité des théories en physique (36-37).

La théorie se constitue dans un champ symbolique mathématique. Ce champ, à partir des traductions des qualités premières ou si l'on préfère, du système axiomatique minimal, obéit à la stricte nécessité logique. Autrement dit, il ouvre la voie à tous les possibles logiques, à toutes les conséquences non-contradictaires.

S'il n'était qu'artificiel, strictement formel, sans rapport avec un réel mystérieux que l'on peut nommer classification naturelle; c'est-à-dire si les faits traduits n'étaient que conventions, alors la théorie ne serait vraiment qu'une pure convention logique -comme les mathématiques- Alors les retombées, les traductions prédictives du symbolisme en des lois expérimentables nouvelles n'auraient que peu de chance de se conformer aux phénomènes.

Or la théorie physique remporte ses plus grands succès dans l'agencement fréquent et admirable de ses prédictions avec les faits. Ceci prouve que tout ne s'est pas passé dans le strict domaine de la convention logique, mais bien qu'à l'origine, ce champ a été limité, que les faits nourriciers exprimaient bien une réalité harmonieuse avec sa propre causalité, son ordre réel bien que secret.

Quoiqu'il en soit, la théorie physique, par ses succès de prévision, manifeste donc l'existence de cette classification naturelle, de cet ordre ontologique.

Exemples donnés en chimie : les prévisions du tableau périodique (38-39) ; on peut penser à la découverte de Neptune. Le célèbre « point lumineux au centre du disque » d'Arago de Fresnel et Poisson (39).

Duhem utilise beaucoup le terme de « valeur d'une théorie » ; est-ce sa « vérité » ? Non, mais il insiste et il s'agit tout de même de valeur, dans l'horizon de la classification naturelle (qui a à voir avec la vérité). Il y a progrès. On est loin de certains textes poppériens ou kuhniens.

Remarque sur le style absolument pascalien de la phrase « Or, au moment ...notre gage ? » (les paris, p.37 et Duhem poursuit dans le même style, p. 37).

La théorie n'est pas un artefact (37 fin). Duhem n'est pas un conventionnaliste, mais au fond, ça ne change pas la manière dont il convient de faire de la physique. « [La théorie physique] ne poursuit pas l'explication des phénomènes » (dernière phrase du chapitre).

Reprise plus tard, p.151 : « Ni le principe de contradiction... d'étouffer complètement »

CHAPITRE III. LES THEORIES REPRESENTATIVES ET L'HISTOIRE DE LA PHYSIQUE

§I. ROLE DES CLASSIFICATIONS NATURELLES ET DES EXPLICATIONS DANS L'EVOLUTION DES THEORIES PHYSIQUES.

L'adoption du concept *réaliste* de classification naturelle réactive une question :

Ne serait-il pas logique et de bonne méthode que de rechercher ces réalités, de « dévoiler ces

choses cachées » ?(41-42)

L'histoire de la physique fournit bien des exemples fertiles de cette manière de faire.

Duhem reconnaît que bien des découvertes et des progrès de la connaissance physique ont été réalisés "sous l'étendard de la conception explicative", par des auteurs qui croyaient aux causes finales, qui croyaient en connaître quelque chose et produisaient de la physique *a priori*. On songe ici aux doctrines de Descartes et de Leibniz. Aussi dit-il :

"Des espoirs chimériques ont pu provoquer d'admirables inventions sans que ces inventions donnent corps aux chimères qui les ont fait naître. D'audacieuses explorations, qui ont grandement contribué au progrès de la géographie, sont dues à des aventuriers qui cherchaient le pays doré; ce n'est pas une raison pour nous faire figurer *l'Eldorado* sur nos planisphères" (p42)

L'attrait puissant et réel qu'exerce l'idée d'explication –dont Duhem- se détourne, est à la base de la philosophie de Meyerson qui expose comment, à son avis, nul n'a réellement pu s'en détourner (voir *De l'explication dans les sciences*). Duhem dit vraiment le contraire de Meyerson :

1) Loin de constituer un fil d'Ariane de la recherche ou les racines des découvertes, la partie explicative d'une théorie est une boussole folle, un parasite, la source d'erreur.

2) Dans la transmission et la survie des théories physiques, la partie "saine", descriptive de la théorie se perpétue, alors que les chimères explicatives s'effondrent régulièrement, sous le coup des faits. La partie descriptive survit en général au naufrage de la théorie prise en défaut et viennent s'ajuster et contribuer à la nouvelle théorie.

"Cette continuité de la tradition est masquée aux yeux de l'observateur superficiel par le fracas incessant des explications qui ne surgissent que pour s'écrouler" (p44)

La distinction des deux couches, ou strates (la bonne transmissible et la fausse chimérique) est observable par exemple en théorie de l'optique ; excellente analyse de l'apport cartésien, puis de Huygens, de Newton, Laplace et de Fresnel. (p44/52)⁹.

Il ne trouve meilleure image du progrès scientifique que celle de la marée montante.

"Le va-et-vient des lames est l'image fidèle de ces tentatives d'explication qui ne s'élèvent que pour s'écrouler, qui ne s'avancent que pour reculer; au dessous se poursuit le progrès lent et constant de la classification naturelle dont le flux conquiert sans cesse de nouveaux territoires, et qui assure aux doctrines physiques la continuité d'une tradition" (p53)

Meyerson défend que, ce qui est durable et survit, c'est l'intuition explicative et pas les modèles successifs et que les cadres explicatifs s'écroulent, certes, mais pour systématiquement renaître.

⁹ Sur ce point, utiliser les pages 16-17 de mon cours long. Voir aussi le site http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/jacques_charrier/tp/polaro/prologue.html

Contrairement à ce qui peut sembler, la *Classification naturelle* s'oppose à l'*explication* :

Admirable lorsqu'elle se borne à *jouer le rôle* de classification naturelle, la théorie de Fresnel devient insoutenable dès là qu'elle *se donne pour* une explication.(Duhem 52)

On retiendra le point de vue fondamentalement continuiste de Duhem pour ce qui concerne l'histoire de la physique. Son travail d'historien (le système du monde) lui a fourni mille arguments pour reconnaître des filiations, des héritages, discrets, mais multiples, par exemple entre le moyen-âge et la "révolution galiléenne". Au fond il est tout disposé à révoquer l'idée de révolution scientifique du XVII^e. S'il fallait poser un acte de naissance à la physique moderne, ce pourrait tout aussi bien -mieux-même- être la condamnation des Thèses aristotéliennes par Etienne Tempier, évêque de Paris en 1277, qui inaugure l'exploration de concepts nouveaux: latitude des formes, Buridan, Nicole Oresme, Albert de Saxe...

C'est important ; nous avons ici une tentative qui associe le continuisme et ce que plus tard on pourrait nommer des changements de paradigmes (ou de conceptions générales ou *programme de recherche*...). En effet, le mécanisme sera nommé paradigme et Duhem le nomme Cosmologie ou métaphysique. Ce *cadre* est ruiné et laisse la place à tel autre : chez Duhem, ceci ne défait pas la continuité de la science, pour Kuhn, ça fait une révolution.

§II. LES OPINIONS DES PHYSICIENS SUR LA NATURE DES THEORIES PHYSIQUES

Rappel des thèses de *Sauvez les phénomènes*, incluant les commentaires médiévaux (Thomas) sur la question et aussi Copernic¹⁰.

p. 59 et 60, on a le fameux passage où Duhem semble plus proche de Bellarmin que de Galilée.

Analyse critique de l'association cartésienne entre Métaphysique et physique.

On pourra avoir un commentaire général de *Pr IV*, 204 (p. 61-63)

p.64, la caractérisation de la lecture pascalienne de Descartes est très discutable : « un sourire dédaigneux » (64), avec l'interprétation du fragment 24 qui est à commenter et à critiquer (voir cours long).

Solide défense du *Scholium generale* de la fin des *Principia*, largement cité, p. 66-67 ainsi que la XXXI^e question de l' *Opticks*, citée et commentée p.67-68.

Ainsi, du point de vue du statut épistémologique des théories, entre représentation et explication, Duhem reconnaît en Newton un *compagnon de lutte*.

Duhem complète avec la critique d'un cartésien contre Newton et la position « explicative » développée par des newtoniens, notamment Roger Cotes et Boscovich (68-69)

¹⁰ Reprendre ici les pages 17 à 20 de mon cours long.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Duhem considère d'ailleurs que le XVIII^e siècle a eu des conceptions plus représentatives que le XVII^e : il cite L.M. Ampère (p.70), Fourier (72) et Fresnel (72) ; de même le début du XIX^e avec Robert Mayer et Macqorn Rankine.

CHAPITRE IV. LES THEORIES ABSTRAITES ET LES MODELES MECANIQUES.

Long et curieux chapitre. Les quatre premiers paragraphes sur les deux sortes d'esprits sont de peu d'intérêt épistémologique. Les six suivants sont essentiels ; c'est peut-être le sommet de ce livre.

Toute la fin du chapitre IV plonge à nouveau dans une réflexion épistémologique profonde où est discutée la conception des modélisations des lois naturelles.

« On trouve à chaque instant, dans les traités de physique publiés en Angleterre, un élément qui étonne au plus haut degré l'étudiant français ; cet élément, qui accompagne presque invariablement l'exposé d'une théorie, c'est le modèle. Rien ne fait mieux saisir la façon, bien différente de la nôtre, dont procède l'esprit anglais dans la constitution de la Science, que cet usage du modèle. » (99)

§1. DEUX SORTES D'ESPRITS (79-81)

Abstrait à imagination faible. La définition duhémienne de la T.P. leur convient particulièrement. Ils tirent un bénéfice maximum de l'économie de pensée. D'autres sont dits esprits *imaginatifs* peu à l'aise dans l'abstraction. Ils seront hostiles à la TP de Duhem.

Référence à Pascal, esprit de justesse et esprit de géométrie. Cité p. 81, Pensées.

Les *abstrait*s de Duhem correspondent aux *de justesse* de Pascal + *force et droiture*

Les *imaginatifs* de Duhem correspondent aux *de géométrie* de Pascal+ *amplitude, finesse* (on y trouve Napoléon, César, Talleyrands, Balzac, Saint-Simon, Rabelais, Dickens, Elliot,

Duhem devra « combattre » les seconds.

Remarque : il y a accord et renversement entre Pascal et Duhem : là où P. met la géométrie du côté des *imaginatifs et amples*, Duhem y met les *abstrait*s et *forts*. Duhem l'assume, p. 89 et surtout fin de §3, p. 90.

§2. LE PORTRAIT DE NAPOLEON ? (81-86)

§3. L'AMPLITUDE D'ESPRIT, L'ESPRIT DE FINESSE ET L'ESPRIT GEOMETRIQUE.

§4. L'AMPLITUDE D'ESPRIT ET L'ESPRIT ANGLAIS. (91)

Utilisation de cette partition pour caractériser Anglais et français.

Un aspect utile de cette digression est d'associer l'analyse des qualités et défauts de l'intelligence appliquée aux sciences et/ou appliquées aux arts et lettres. Pas de « frontière intellectuelle » entre ces domaines. (92-98)

Corneille, Descartes vs Shakespeare, Bacon.

Descartes, archétype de l'esprit *fort et étroit*. Bacon, celui de l'esprit *ample et faible*.

Descartes/Bacon, archétype de esprit fort mais étroit/ esprit ample mais faible.(91-94)

Jeu de dames/jeu d'échec (110)

§5. LA PHYSIQUE ANGLAISE ET LE MODELE MECANIQUE. L'IMAGINATION CONTRE LA RAISON.

Il faudrait présenter toutes les pages, de p.99 à 153. Pages importantes pour constituer le concept de modèle.

Exemple précis : deux corps électrisés en interaction. Comment s'élabore la théorie électrodynamique ? On voit parfaitement les « quatre étapes », comme chez Poisson ou Gauss (p.99)

Les anglais sont vraiment loin de la TP de Duhem.

Long passage de description des ressorts, tubes, perles, poulies et tuyaux des anglais et des justifications par Thomson (100-105). Puis, p. 107-108-109, toujours Thomson et commentaire : la science anglaise rejette l'abstraction et aussi l'explication.

« Comprendre » une situation physique, ce n'est pas « l'expliquer », c'est s'en former une « image » concrète.

Examiner le passage sur le mécanisme version Descartes et le « mécanisme anglais » : p. 105.

Depuis « Sans doute... jusqu'à s'était assoupi » .

Le mécanisme cartésien a beaucoup à voir avec le rationalisme prôné par la TP de Duhem (p. 106).

§6. L'ECOLE ANGLAISE ET LA PHYSIQUE MATHEMATIQUE

La distinction des sortes d'esprit ne se fait pas entre ceux qui s'adonnent aux mathématiques et les autres, mais elle partage les mathématiques elles-mêmes. Il y a des maths qui conviennent aux esprits amples et faibles et des maths qui conviennent aux esprits forts et étroits.

Le « pur algébriste » est du côté *anglais, ample, faible, imagitatif* (p.109). Pour cette mathématique, « point n'est besoin de force d'esprit, une grande amplitude suffit ; l'habileté au calcul algébrique n'est pas un don de la raison, mais un apanage de la faculté imaginative » (p. 110)

La distinction traverse l'algèbre elle-même : la classique est pour les forts-étroits, la symbolique pour les amples-faibles.

Clarifier la p.110-111 sur l'algèbre symbolique qui convient aux anglais. Duhem cite à plusieurs reprises les quaternions et la *vector-analysis*.

p.112-113. Examen du rôle du calcul algébrique dans la TP. Pour un Français-allemand (un fort-étroit, un duhémien), un point essentiel est l'étape 1 de la TP : « la définition des grandeurs dont elle doit traiter » et l'étape 2 : « la justification des hypothèses qui porteront les déductions » (113). C'est le rôle des *préambules consacrés à la mise en équations* d'une TP.

A partir de là, la déduction logique se déploie. On observe bien que le calcul algébrique n'est pas un modèle.

Or, cette étape, ce préambule n'est pas chez les anglais (les amples-faibles).

Pour illustrer ceci, Duhem développe une critique de Maxwell (113-114). Un nouvel élément va être introduit dans la théorie électrodynamique, le *courant de déplacement*. Il correspond au fait qu'une certaine action électrique a lieu, même dans des corps non conducteurs, dans les diélectriques. C'est le futur champ électrique.

C'est de grande importance et conduit à la théorie électromagnétique : unification des phénomènes optiques, électriques et magnétiques. Des phénomènes imprévus, jamais vus sont annoncés (les ondes *em* de Hertz).

Cette grandeur nouvelle n'est pas introduite par Maxwell selon les normes proposées par Duhem, une définition précise, rationnelle, avec protocole de mesure etc. A la place, on a deux lignes vagues (citées p. 114).

Pourquoi ?

Parce que, là où la TP (le physicien franco allemand) met en équation pour que la logique se déploie avec rigueur, là où l'algèbre n'est qu'un auxiliaire, un aide-mémoire de la déduction logique, le physicien « anglais » fabrique un *modèle* : les équations algébriques jouent le rôle de représentation, d'image des phénomènes. L'algèbre est comme les ressorts et les tuyaux ; cette algèbre est un modèle. (p.115)

La mise en équation n'a pas besoin d'être une rigoureuse traduction logique (arbitraire en un certain sens) ; elle doit soutenir l'imagination, « imiter plus ou moins fidèlement les lois et les phénomènes. »

§7. L'ÉCOLE ANGLAISE ET LA COORDINATION LOGIQUE D'UNE THÉORIE

Les théories continentales sont de deux sortes, explicatives ou représentatives ; elles ont en commun une soumission à la stricte déduction logique (116).

Pour un esprit ample et faible, celui du physicien anglais, il en va autrement :

"La théorie n'est ni une explication, ni une classification rationnelle des lois physiques ; mais un modèle de ces lois ; elle n'est pas construite pour la satisfaction de la raison, mais pour le plaisir de l'imagination ; dès lors, elle échappe à la domination de la Logique" (p 117).

Pour un même groupe de lois, le modèle peut varier. Il cite en exemple W.Thomson, dans ses *Leçons sur la dynamique moléculaire* (1884). Traitant de l'élasticité dans un corps cristallisé, il propose un assemblage de huit boules massives, sommets d'un parallélépipède et reliées par des ressort. Passant à la dispersion de la lumière, il construit une molécule comme une série de sphères concentriques maintenues en place par des ressorts. S'agissant de la polarisation, voici des enveloppes rigides avec chacun deux gyrostats et articulations à billes etc. (cf. p120/1). Et il y en a encore bien d'autres dans "*cette collection d'engins et de mécanismes (qui) déconcerte le lecteur français*"(p122).

Ces modèles mécaniques ne font pas appel à la raison mais à l'imagination, ils *figurent* la matière réelle.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

La modélisation imaginative ne reçoit d'ailleurs pas qu'une expression "technologique" ou mécanique mais même algébrique.

Dans cette conception, les modèles (matériels ou mathématiques) sont comme des imitations (aussi des bricolages)

Il montre comment, chez Thomson, les modèles de l'éther sont contradictoires entre eux (p. 121-122)

« Le grand physicien a voulu seulement faire œuvre d'imagination » (123-124)

La même désinvolture par rapport à la cohérence et la rigueur d'ensemble se retrouve dans les travaux mathématiques de Maxwell (que dans les modèles mécaniques de Thomson) (voir son *Traité d'électricité*), travaux qui, pour cette raison ne sont pas de la *traduction symbolique abstraite* mais des modèles commodes, valables seulement localement. C'est précisément cet aspect de valeur "régionale" d'un groupe d'équations, sans considération pour ses effets ou interprétations dans des champs plus ou moins voisins et connexes, qui en fait de simples et vulgaires modèles :

Le *traité d'électricité et de magnétisme* de Maxwell a beau avoir revêtu la forme mathématique ; pas plus que les *Leçons sur la dynamique moléculaire* de W. Thomson, il n'est un système logique. (125)

Voir au paragraphe suivant, après la mention Gassendi.

§8. LA DIFFUSION DES METHODES ANGLAISES

La manière anglaise de traiter la physique s'est répandue partout avec une extrême rapidité » (126)

Duhem pense avoir trouvé un digne représentant français de l'école modéliste, en la personne de Gassendi:

"ce caractère concret, saisissable à l'imagination, de la physique de Gassendi se montre en pleine lumière dans le passage suivant, où le philosophe explique à sa manière les sympathies et les antipathies de l'Ecole: "Il faut comprendre que ces actions se produisent comme celles qui s'exercent d'une manière plus sensible entre les corps; la seule différence est que les mécanismes qui sont gros dans ce dernier cas sont très déliés dans le premier. Partout où la vue ordinaire nous montre une attraction et une union, nous voyons des crochets, des cordes, quelque chose qui saisit et quelque chose qui est saisi; partout où elle nous montre une répulsion et une séparation, nous voyons des aiguillons, des piques, un corps quelconque qui fait explosion, etc. De même pour expliquer les actions qui ne tombent pas sous le sens vulgaire, nous devons imaginer de petits crochets, de petites cordes, de petits aiguillons, de petites piques et autres organes de même sorte; ces organes sont insensibles et impalpables; il ne faut pas en conclure qu'ils n'existent pas" (pp128/9; Gassendi, *Syntagma Philosophicum*, II^e pars, I.VI, c.XIV).

Il ne faudrait surtout pas en conclure que Gassendi propose une théorie explicative dont le statut soit simple: de même qu'il y a une doctrine de l'âme double (matérielle et immatérielle), des deux mathématiques (divines et humaines), des deux lumières distinctes de la connaissance (de la révélation et de la démonstration), il y a aussi des lois dans la nature que l'on peut

constater (et expérimenter et modéliser) mais il y a aussi les lois de la nature, qui sont des idées géométriques propres à Dieu et que l'on ne peut connaître. (cf. *Syntagma* et travaux de S. Murr). Au fond, son atomisme est une approximation.

C'est cette modestie humaine qui ouvre la voie gassendienne à l'empirisme et la modélisation. Point ne nous est donné de savoir parfaitement (comme Dieu) ce que nous savons. Nous ne pouvons accéder qu'à des approximations adaptées à ce monde sensible. Aussi la faculté imaginative et les modèles sont-ils -à cette échelle- légitimes. La vérité concernant la nature est seulement connue de Dieu, le *Grand physicien*.

On trouve des esprits de ce genre parmi les grands contemporains : exemple français, J. Boussinesq qui, cependant ne va pas jusqu'à accepter de « réduire la théorie physique à une collection de modèles » (131).

L'importation du style anglais (surtout via Maxwell) s'est faite surtout, non par les modèles mécaniques matériels, mais par les modèles algébriques (131).

"Les raisonnements et les calculs par lesquels Maxwell s'est efforcé, à plusieurs reprises, de les justifier (les équations de l'électrodynamique), abondent en contradictions, en obscurités, en erreurs manifestes; quant à la confirmation que l'expérience leur peut apporter, elle ne saurait être que tout à fait partielle et limitée" (p132)

L'insistance mise par Duhem sur le cas de l'électromagnétisme de Maxwell (ou Hertz-Maxwell) s'explique notamment du fait que ce fut aussi un lieu d'intervention de Duhem. Lorsqu'il mentionne Helmholtz, il faut aussi entendre « Helmholtz-Duhem»¹¹.

En particulier, p. 132 : la « contradiction colossale » doit concerner la dissymétrie entre mouvement d'un aimant et d'un courant... La mention des travaux de Helmholtz renvoie aux propres travaux de Duhem.

Comme le note Louis Roy, il suffisait de peu de chose pour retrouver la cohérence perdue dans les travaux de Maxwell : admettre que la vitesse des ondes *em* était « presque la même » que celle de la lumière dans l'éther, mais pas tout-à-fait la même.

On est au voisinage des questions d'additivité des vitesses qui « se font mal en électromagnétisme » et seront au cœur de la relativité restreinte.

p.133. Voir l'intéressante citation de Poincaré, très positiviste au fond. Il enregistre que les théories de Maxwell sont divergentes. Il admet comme « non problématique » la coexistence de zones logiquement contradictoires dans la physique. C'est bien refuser que la théorie physique reflète une réalité objective.

¹¹ Voir le texte de Louis Roy, *L'électrodynamique de Helmholtz-Duhem*, Annales de la faculté des sciences de Toulouse, Sér. 3, 7 (1915).

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Voir le chapitre XII de *La science et l'hypothèse*, p. 215-225.

p. 134-137, étonnantes pages *externalistes* pour expliquer le succès des méthodes anglaises :

-elles sont à la mode

-elles correspondent à l'esprit et à la manière de l'industrie.

« La foule qui confond la science avec l'industrie ; qui, voyant passer la voiture automobile poudreuse, haletante et puante, la prend pour le char triomphal de la pensée humaine. »(136).

§9. FAIBLE FECONDITE DES MODELES (P.137)

Contrairement à une idée aujourd'hui (en 1905) admise, y compris par leurs auteurs, les modèles mécaniques où localement algébriques n'ont pas grande efficacité, ne produisent pas grand résultat. Loin d'inspirer d'importantes découvertes, ils ont en général été conçus, élaborés *a posteriori*, dans l'élan d'une découverte qui, toujours en général, est fondée sur une théorie abstraite cachée, ou tue.

« Le lecteur non prévenu, celui à qui manque le loisir de faire des recherches historiques et de remonter aux origines, peut être dupe de cette supercherie » (p.138)

Avant, en arrière plan du modèle, il y a la traduction symbolique.

Duhem accumule les exemples: Maxwell et ses "équations-modèles" sont en vérité juchés sur les épaules de Gibbs et de sa grande théorie physico-chimique. Le plus célèbre des physiciens tenants des modèles, Lord Kelvin inspire à Duhem ce jugement :

"Le physicien qui a le plus formellement identifié l'intelligence d'une théorie et la vision d'un modèle, lord Kelvin, s'est illustré par d'admirables découvertes; nous n'en voyons aucune qui lui ait été suggérée par la physique imaginative. Ses plus belles trouvailles, le transport électrique de la chaleur, les propriétés des courants variables, les lois de la décharge oscillante, et beaucoup d'autres qu'il serait trop long de citer, ont été faites au moyen des systèmes abstraits de la thermodynamique et de l'Electrodynamique classiques. Partout où il appelle à son aide les modèles mécaniques, il se borne à faire œuvre d'exposition, à représenter les résultats déjà obtenus; ce n'est point là qu'il fait œuvre d'invention" (p143).

« La part de butin qu'elle a versée à la masse de nos connaissances semble bien maigre lorsqu'on la compare aux opulentes conquêtes des théories abstraites » (p.145)

La théorie de Gibbs (1839, 1903). Surmontant la critique des énergétistes, la théorie cinétique de la matière (Boltzmann et Gibbs) prit la forme de la mécanique statistique, elle interpréta ainsi les lois des états gazeux et donna un sens profond au second principe de la thermodynamique ; elle rend compte du mouvement brownien, reflet, à notre échelle, de l'agitation chaotique des molécules et, au fond, de la structure discontinue de la matière.

Note sur Willard Gibbs et Ludwig Boltzmann (1844,1906). Gibbs a contribué à fonder la chimie physique en étendant la thermodynamique à la chimie. Il a perfectionné la mécanique statistique de Boltzmann. Celui-ci a fondé la théorie cinétique des gaz et plus généralement la mécanique statistique.

La **théorie cinétique des gaz** est une théorie par laquelle on cherche à expliquer le comportement macroscopique d'un gaz à partir des caractéristiques des mouvements des corpuscules qui le composent. Elle permet notamment de donner une interprétation microscopique aux notions de :

température : c'est une mesure de l'agitation des corpuscules, plus précisément de leur énergie cinétique ;

pression : la pression exercée par un gaz sur une paroi résulte des chocs des corpuscules sur cette dernière.

Elle a une expression complètement mathématisée.

Remarque, la théorie de Gibbs ne mobilise pas les atomes. Elle n'en a pas besoin, mais elle ne les réfute pas ni ne les combat. Voir, Meyerson, *I&R*, p. 481)

Bref, c'est la théorie abstraite qui est fertile, les modèles sont plutôt stériles pour inventer ; utiles pour exposer (et encore !).

- La valeur de l'analogie.

Autant le modèle est un bien faible outil, autant il convient de ne pas le confondre avec l'analogie qui n'est pas de même nature est dont l'utilité, l'efficacité est considérable :

"L'histoire de la physique nous montre que la recherche des analogies entre deux catégories distinctes de phénomènes a peut-être été, de tous les procédés mis en œuvre pour construire des théories physiques, la méthode la plus sûre et la plus féconde" (p140)

Son analogie est très précisément définie ou délimitée, sur le mode, soit d'une classe d'équivalence, soit celui d'un isomorphisme:

"deux catégories de phénomènes très distinctes, très dissemblables ayant été réduites en théories abstraites, il peut arriver que les équations où se formule l'une des théories soient algébriquement identiques aux équations qui expriment l'autre. Alors, bien que ces deux théories soient essentiellement hétérogènes par la nature des lois qu'elles coordonnent, l'algèbre établit entre elles une exacte correspondance; toute proposition de l'une des théories a son homologue dans l'autre; tout, problème résolu dans la première pose et résout un problème semblable dans la seconde". (p141)

L'exemple proposé est celui de l'équivalence algébrique des états d'équilibre des corps chauds et de l'électrostatique. Ohm et Fourier, sur électricité et chaleur (p.141)

"On ne saurait confondre (ces procédés analogiques) avec l'emploi de modèles. Elles consistent à rapprocher l'un de l'autre deux systèmes abstraits, soit que l'un d'eux, déjà connu, serve à deviner la forme de l'autre, qu'on ne connaît point encore; soit que, formulés tous deux, ils s'éclaircissent l'un l'autre. Il n'y a là rien qui puisse étonner le logicien le plus rigoureux; mais il n'y a rien non plus qui rappelle les procédés chers aux esprits amples mais faibles; rien qui substitue l'usage de l'imagination à l'usage de la raison, rien qui rejette l'intelligence, logiquement conduite, de notions abstraites et de jugements généraux pour la remplacer par la vision d'ensemble concrets".(pp142/3)

Ayant toutefois admis que l'emploi des modèles mécaniques a pu guider certains physiciens

"du moins est-il certain qu'il n'a point apporté aux progrès de la physique cette riche contribution qu'on nous vantait; la part de butin qu'il a versé à la masse de nos connaissances semble bien maigre lorsqu'on le compare aux opulentes conquêtes des théories abstraites".(p145)

Avec argument pour ne pas confondre « analogie et modèle » (p.142)v. L'analogie ne contrevient pas à la logique.

§ 10. COMMENT RESISTER AUX MODELES ?

La tolérance méthodologique devrait régner car

« le meilleur moyen de favoriser le développement de la science, c'est de permettre à chaque forme intellectuelle de se développer suivant ses propres lois et de réaliser pleinement son type » (p.146)

Mais, selon Duhem, la situation est plutôt une pression des *modélisateurs* contre la liberté ou la possibilité de pratiquer la science abstraite et représentative.

Contre les modèles imaginatifs, leur déferlement intolérant (voir p.147 : le danger est qu'ils interdisent la méthode *logique* et abstraite), la conception explicative est impuissante ; seule la conception représentative est efficace.

En effet, les « explicatifs » ne peuvent comprendre pourquoi les modèles disparates sont efficaces, puisque, étant disparates, ils contreviennent forcément à la vérité. En revanche, les « représentatif » admet sans difficulté (car la logique le lui autorise) que l'on emploie « des procédés de classification différents ».

La théorie explicative doit, de toute nécessité, éviter jusqu'à l'apparence d'une contradiction ». (la matière ne peut être une chose et son contraire). Elle **ne peut pas** admettre des hypothèses logiquement inconciliables. Elle ne peut pas reconnaître les performances des modèles.

Mais la conception représentative peut tout à fait admettre des *procédés de classification différents*.

"Si l'on s'astreint à n'invoquer que des raisons de logique pure...on ne peut condamner l'incohérence dans la théorie physique"(p148).

"Une pareille déclaration scandaliserait fort ceux qui regardent une théorie physique comme une explication des lois du monde inorganique...La théorie explicative doit, de toute nécessité, éviter jusqu'à l'apparence d'une contradiction; (la matière ne peut être réellement en même temps une chose et son contraire)

Mais si l'on admet qu'une théorie physique est simplement un système destiné à classer un ensemble de lois expérimentales, comment puiserait-on, dans le code de la logique, le droit de condamner un physicien qui emploie, pour ordonner des ensemble différents de lois, des procédés de classification différents ou qui propose, pour un même ensemble de lois, diverses classifications issues de méthodes différentes? (suit l'exemple des classifications diverses des naturalistes selon la morphologie ou selon l'appareil reproductif)...A condition de bien marquer les zones et leurs frontières.

Ainsi un physicien aura logiquement le droit de regarder, ici, la matière comme continue, et, là, de la considérer comme formée d'atomes séparés.(p.149)

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Mais, avec une garantie exprimée par Poincaré :

Deux théories contradictoires peuvent, en effet, **pourvu qu'on ne les mêle pas, et qu'on n'y cherche pas le fond des choses**, être toutes deux d'utiles instruments de recherche.(p.149)

Retour sur la « tendance irrépessible » à l'unité de la science et à la classification naturelle.
(p.151-154)

D'où tirons-nous argument en faveur de la coordination nécessaire de la théorie physique ? Pas de la seule logique, ni du principe de contradiction, ni de l'économie de pensée,

Cette opinion est légitime parce qu'elle résulte en nous d'un sentiment inné...qu'il n'est pas possible d'étouffer complètement. .. Tout physicien aspire naturellement à l'unité de la science (p.151)

La raison La raison n'a donc point d'argument logique pour arrêter une théorie physique qui voudrait briser les chaînes de la rigueur logique ; mais la " nature soutient la raison impuissante et l'empêche d'extravaguer jusqu'à ce point.
(Pascal, *Pensées*,8)

LA THEORIE PHYSIQUE - SECONDE PARTIE

LA STRUCTURE DE LA THEORIE PHYSIQUE.

CHAPITRE I. QUANTITE ET QUALITE.

§1. PHYSIQUE MATHEMATIQUE

"Une théorie physique sera donc un système de propositions logiquement enchaînées et non pas une suite incohérente de modèles mécaniques ou algébriques; ce système n'aura pas pour objet de fournir une explication, mais une représentation et une classification naturelle d'un ensemble de lois expérimentales"(p157)

En résumant de la sorte les conclusions de sa première partie, Duhem opère un glissement sensible dans la mesure où le but de représentation a été fixé comme but accessible de la théorie alors que la classification naturelle a été présentée comme un horizon dont on peut croire à l'existence sans que l'on puisse prétendre l'atteindre. La classification naturelle, soubassement de l'ordre des faits naturels relève de la réalité toujours voilée; Il semble ici mettre les buts de représentation et de classification naturelle sur un même plan d'accessibilité.

La tâche de symbolisation déductive "parfaite" n'est pas simple.

"L'expérience des siècles est là pour nous montrer combien le paralogisme se glisse aisément dans la suite de syllogismes la plus irréprochable en apparence" (p157)

Exemples:

-Kepler et la démonstration de la loi des aires.

-Galilée et sa "loi des nombres impairs": il y a des erreurs dans l'usage du calcul des proportions (Réponse de 1604 à Paolo Sarpi)

-Descartes dans l'analyse de la chute des corps qui mêle et rend confus les rôles du temps et de l'espace. (Lettre à Beekman en 1619)

-Newton dans sa démonstration du début des *Principia* sur l'attraction et la déviation parabolique.

LES MATHEMATIQUES INDISCUTABLES

La démarche duhémienne va dorénavant s'appuyer sur sa conviction en la quasi-perfection logique et méthodique des mathématiques (arithmétique et algèbre). Il affirme ainsi l'univocité parfaite qui y règne entre les idées et leurs signes et considère cette science comme abritée des "lutttes d'école" (p158). Le voici une fois encore pascalien.

C'est faire peu de cas de difficultés internes à cette science. Duhem passe donc sur tout cela et retient de l'algèbre (des mathématiques en général?) leur réelle puissance de déduction, l'automatisme parfaitement réglé de leurs procédures; le fait que si l'on est bien d'accord au

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

début, on ne peut que l'être à la fin.

LA PHYSIQUE DOIT PARLER LE LANGAGE DES GEOMETRE.

Répété 2 fois p. 158. La référence aux XVI^e et XVII^e siècles comme moment créateur de la physique mathématisée est évidemment valable et qui mieux que Duhem connaît les périodes qui ont précédé? Que cette invasion mathématique soit nécessaire, voilà qui est partagé par tous les théoriciens de la physique et Duhem le défend plus que tout autre.

§2. QUANTITE ET MESURE

Ce point étant acquis, reste à examiner les conditions de traduction des notions physiques en langage algébrique, selon le nombre et la grandeur.

Première réponse: il faut et il suffit que l'attribut considéré *relève de la catégorie de la quantité* (version Aristote) ou *soit une grandeur* (version moderne) et non pas une qualité.

Question qui en découle: "Quels sont les caractères essentiels d'une grandeur?". (p159)

Deux caractères essentiels : être susceptibles de la relation d'ordre (réflexive, antisymétrique et transitive). Ceci fonde la possibilité de la mesure (avec l'unité). Ceci est d'une importance considérable. Seconde caractéristique : être susceptible de l'opération additive (commutative, associative, élément neutre)

On peut établir une bijection entre une longueur réelle (une grandeur : surfaces, volumes, angles, temps etc.) et un nombre x , qui permet de remplacer l'addition symbolique (mise bout à bout) par l'addition arithmétique des nombres. Duhem prolonge la bijection à \mathbf{R} comme allant de soi alors même qu'elle fut un des plus difficiles problèmes des mathématiques. Et encore ne fait-il pas de distinction entre les irrationnels (racines, traités géométriquement par Descartes par exemple) et les transcendants qui eux, ne peuvent en général être exhibés que comme limite de suite convergentes. La construction correcte et rigoureuse de \mathbf{R} ne date que de Dedekind et Cauchy.

\mathbf{R} , et donc, les ensembles des grandeurs physiques symbolisées dans \mathbf{R} sont munis de la structure de corps.

Duhem admet alors que tous les attributs physiques qui sont des grandeurs présenteraient des caractères analogues (p162).

§3. QUANTITE ET QUALITE

Les pages 163 à 166 reprennent des conceptions aristotéliennes de la quantité et de la qualité (forme des figures, chaud, froid, clair, obscur, couleur, santé, vertu, être grammairien...). Il reprend la distinction selon laquelle la quantité est susceptible des axiomatiques de comparaison et des axiomatiques d'addition (commutativité et associativité) alors que les qualités sont en général susceptibles des premiers, ce qui leur confère une intensité, mais pas des seconds: elles ne sont pas constituées de parties.

Réunissez en un vaste congrès autant de géomètres médiocres que vous pourrez en rencontrer ; vous n'aurez pas l'équivalent d'un Archimède ou d'un Lagrange...(p.165)

"Sur la qualité, donc, la mesure, issue de la notion d'addition, ne saurait avoir prise" (p166). (cf. *L'évolution de la mécanique*, pp5-9. Les pages de ce texte sont très bonnes sur cette question)

§4. LA PHYSIQUE PUREMENT QUANTITATIVE

Chasser les qualités de la physique, tel est la caractéristique du programme cartésien. Longue explication de cette réduction cartésienne (p.166 -170)

Passage à remarquer (p. 167) sur la géométrie qui serait possiblement plus qualitative que l'algèbre. Argument « cartésien » qui me semble discutable. Les mathématiques cartésiennes ne sont pas « une algèbre ».

Descartes, après avoir chassé les qualités de la géométrie, les aurait chassées de la physique. (168). C'est toutefois discutable car le programme cartésien ne visait pas tant à exclure les qualités qu'à les réduire à la quantité : à chercher au-delà de la qualité (la couleur), une réalité quantitative, de type mécaniste. (Voir *Grand cours II*, p. 8)

Nous savons, depuis la première partie qu'il ne peut y avoir de Théorie Physique sans qu'elle soit *parlée algébriquement* selon la belle expression de Duhem. Etre parlé algébriquement sous-tend évidemment être susceptible des opérations additives. On semble alors se diriger vers une physique purement quantitative. C'est du moins, pour Duhem la réponse qu'a donné le XVII^e philosophique.

« La qualité n'aurait aucune place dans notre système. Or, à cette conclusion même, il n'y a point lieu de souscrire » (p.171)

§5. LES DIVERSES INTENSITES DE QUALITE. REPRISE DE L'INTENSIO

Toutes les propriétés réelles des corps ne sont pas quantitatives (du moins c'est présomptueux de le prétendre). Certaines (les qualitatives) échapperont-elles à la théorie physique ?

Le paragraphe argumente dans le sens opposé.

La représentation symbolique, a-t-il été établi, doit être algébrique. Notre image du monde est *numérisée*. Mais les grandeurs (à savoir, les attributs susceptibles des axiomes de comparaison et des axiomes d'addition) ne sont pas seules *numérisables*. (p171).

Les pages 170/4 reprennent des exemples d'attributs qualitatifs susceptibles des axiomes de comparaison: être géomètre, être rouge, être chaud (exemple excellemment détaillé p.172 à 174); ils peuvent être numérisés à partir d'une unité donnée et d'une échelle. Les voici donc susceptibles d'être symboliquement représentés, d'être traduits. Et voici en retour les symboles numériques de la représentation symboliques susceptibles d'être physiquement interprétés.

Duhem montre en détail qu'il ne s'agit pas seulement d'une étape abstraite (choix des

hypothèses), mais d'un protocole de mesure, protocole expérimental ; ici la construction d'un thermomètre.

Remarque : comme Einstein. Une quantité ne devient physique qu'à partir du moment où est élaboré un protocole de mesure.

Pour faire de la physique, comme le voulait Descartes, une Arithmétique universelle, il n'est pas besoin d'imiter le grand philosophe et de rejeter toute qualité, car le langage de l'algèbre permet tout aussi bien de raisonner sur les diverses intensités d'une qualité que sur les diverses grandeurs d'une quantité (p.178)

Le vocabulaire même de Duhem *Intention d'une qualité* est très exactement celui des maîtres de la physique du XIV^e siècle (pas forcément les plus orthodoxes), à savoir, les maîtres du Merton Collège d'Oxford (William Heytesbury), Nicole Oresme à Paris. Ceci n'est pas fortuit puisque Duhem est celui qui a établi l'influence des travaux d'Oresme sur Galilée (Voir *Le système du monde*, T III).

Reste que "dans le domaine de la qualité, la notion d'addition n'a point de place" (p175) où l'on retrouve l'écho des positions de ces physiciens de l'intentio :

"Il est indispensable de préciser que la grandeur intensive n'était pas obtenue en faisant la somme des degrés de l'intensio. En effet, cette opération n'avait pas de sens " (E.Festa, La notion d'agrégat d'indivisibles chez Galilée, Cavalieri, Torricelli).

Dans le domaine de la qualité, ceci n'a pas de sens et pourtant Duhem insiste (p175/177) sur le fait que dans le domaine symbolique dont elles ont été affectées, les opérations sont possibles. Qu'est-ce à dire? La sommation possible dans le champ symbolique-algébrique donne naissance à une nouvelle chose, elle aussi symbolique, qui n'est plus, qui ne représente plus la qualité de départ mais qui est générée par elle. Ainsi des exemples de la chaleur et de l'électrisation qui fournissent la quantité de chaleur et quantité d'électricité. Il convient de souligner un point important. Cette sommation, créatrice d'une nouvelle symbolisation de "faits physiques" relève du calcul intégral et en tant que telle était impossible à concevoir par les physiciens de la qualité et même par les premiers promoteurs de la physique quantitative. Ils étaient prisonniers des débats sur la composition du continu et des indivisibles; de plus l'outil mathématique intégral n'existait pas encore. Voir les exemples de l'espace parcouru, intégrale des vitesses instantanées ou le travail comme intégrale des forces le long d'un déplacement.

Alors conclut Duhem "Pour faire de la physique une arithmétique universelle, il n'est point nécessaire d'imiter le grand philosophe et de rejeter toute qualité..." p178).

CHAPITRE II. LES QUALITES PREMIERES

§1. DE LA MULTIPLICATION EXCESSIVE DES QP.

Du sein du monde physique que l'expérience nous fait connaître, nous dégagerons les propriétés qui nous paraissent devoir être regardées comme premières. Ces propriétés, nous n'essayerons pas de les expliquer, de les ramener

à d'autres attributs plus cachés ; nous les accepterons telles que nos moyens d'observation nous les font connaître, soit qu'ils nous les présentent sous forme de quantités, soit qu'ils nous les offrent sous l'aspect de qualités ; nous les regarderons comme des notions irréductibles, comme les éléments mêmes qui doivent composer nos théories. Mais à ces propriétés, qualitatives ou quantitatives, nous ferons correspondre des symboles mathématiques qui nous permettront, pour raisonner à leur sujet, d'emprunter le langage de l'Algèbre.

-comment les choisir, c'est l'objet de ce chapitre.

-on sait déjà que ces propriétés ne diront pas la réalité des faits

-et on sait aussi qu'elles seront *algébriquement parlées*, qu'elles apparaissent quantitatives ou qualitatives.

Il convient cependant d'éviter la multiplication des qualités (cf. p.180-183). Ce grief des fondateurs de la science moderne contre les docteurs de l'école est valide selon Duhem qui le décrit assez longuement (p. 180-183)

Duhem examine le défaut consistant, en théorie physique "*à se payer de mots et à en payer les autres*" (p181). (La citation polémique à l'encontre de la physique des qualités purement nominaliste, de Galilée (p180) est dans la bouche de Sagredo, p398, ed. Seuil).

La ligne de défense adoptée par Duhem consiste, non pas à acquitter les scholastiques, mais à retourner l'accusation aussi contre les procureurs: atomistes comme Gassendi, cartésiens comme le père Noël (nuancer).

L'abus de qualités, s'il peut être "normal" chez les scholastiques, qui au fond se doivent de donner des principes, est moins pardonnable chez les tenants de la physique quantitative: en lieu et place des qualités occultes, on trouve leur équivalent dans les *configurations particulières* de l'élément constitutif de la matière: si l'on est atomiste, comme Gassendi, on invoquera chaque fois que de besoin "*une certaine configuration de certains corpuscules*".

L'argument est un peu moins pertinent contre les cartésiens: il n'est fondé que sur l'exemple de la lumière, et encore version Noël (cf cit. p183). On pourra se rappeler que Descartes, traitant de l'optique, en géomètre, préfère s'abstenir de ne rien dire sur la réalité essentielle de la lumière et s'en tient à des analogies. Huygens serait sans doute une meilleure cible, qui est de ceux qui prêtent à la matière subtile tous les attributs utiles au maintien d'un strict mécanisme.

Duhem est habile : il y a un trait commun aux trois écoles ; elles sont explicatives.

C'est une conception représentative de la T.P. qui permet d'échapper à la surinterprétation des qualités.

§2. UNE QP EST IRREDUCTIBLE EN FAIT, NON EN DROIT. (183-190)

L'abus des qualités va à l'encontre des principes de la théorie physique, dont l'un des principaux est l'économie de pensée. Cette économie, si elle n'est pas respectée, recherchée détruirait le caractère déductif de la physique.

On observera, à partir de cet endroit un glissement de sens chez Duhem, du terme de qualité

première. Il n'a plus le sens scholastique et devient une propriété fondamentale à partir de laquelle d'autres propriétés seront déduites. Duhem oriente sa théorie physique vers l'axiomatique. L'économie de pensée, dans la théorie physique devient la recherche axiomatique de la base minimale de principes. (C'est presque cartésien, cf. présentation des *Principes de la philosophie*).

Or, explique Duhem, nous avons abandonné le critère de choix, le fil d'Ariane qui, dans les théories explicatives, permettaient l'analyse et la réduction des principes premiers. Nous ne disposons plus de la limite méta-physique (au sens strict) dont disposent ces systèmes: atomes, étendue et mouvement local, attraction... (p. 184)

Ainsi donc, les qualités premières (au sens duhémien) ne le sont pas de toute nécessité: elles sont marquées d'abord par l'impossibilité qu'il semble y avoir à les dériver d'autres principes et évidemment par le fait qu'elles ne disent pas le réel. Deux lignes directrices de choix demeurent: la multiplication des tentatives infructueuses pour les réduire et la pertinence, la fécondité de leur traduction symbolique.

Contrairement à l'algèbre (aux mathématiques), ce n'est pas la pure logique qui conduit la réduction, mais une sorte de tâtonnement répété (mille fois).

Remarque, La question s'est posée au sein des mathématiques, comme ne le souligne d'ailleurs pas Duhem. Voir la discussion Euclide-Descartes-Roberval-Leibniz sur $a-b=c-b$ à partir de $a=c$ et de $a+b=c+b$. (avec des arguments: homogénéité formelle contre hétérogénéité et antériorité notionnelle)

Bonne citation de Sainte-Claire Deville (1818-1881). Chimiste de grande valeur, inventeur de l'aluminium (in Jules Verne), par ailleurs anti-atomiste et énergétiste. En effet, l'énergétisme décrit les conditions de transformation d'une matière lors d'une réaction chimique sans faire d'hypothèses sur la constitution de la matière ; ce sont la pression, la température, le rapport entre les quantités de réactifs qui sont étudiées afin de montrer que la réaction est ou non possible ce qui correspond bien à une prise de position anti-atomiste.

Exemple d'introduction d'une nouvelle QP. Le *Courant électrique* par Ampère (pp186-188):

Coulomb et Poisson ouvrent une zone théorique

Coulomb (1736/1806), tout influencé par le triomphe des idées de Newton chercha des équivalents dans les phénomènes électrostatiques et magnétiques. Il les trouva sous la forme des équations: $F_e = K.q_1.q_2 / r^2$. et $F_m = K.m_1.m_2 / r^2$

Très représentatif de la "philosophie des physiciens" du XVIII^e, il déclarait d'ailleurs appliquer sa théorie en vue de présenter : "*avec le moins d'éléments possible, les résultats du calcul et de l'expérience, et non d'indiquer les véritables causes*" (cité in Enc. Univ. V, 631a).

La comparaison d'Ampère (1775, 1836) et de Newton n'est pas due à Duhem mais à Maxwell qui

voyait en lui *le Newton de l'électricité*. Pour avoir une idée des faits que va expliquer Ampère, pensons simplement à celui-ci: la déviation d'une aiguille aimantée par un courant électrique de voisinage. On peut faire tourner une roue, convenablement électrisée, verticalement posée entre les branches d'un aimant en fer à cheval (principe du moteur électrique- voir solénoïde et électroaimant). L'argument d'impossibilité d'explication par la simple distribution des charges statiques revient à celui de l'impossibilité du mouvement perpétuel. Les forces vives se conservent et ne sauraient créer de l'énergie nouvelle.

Il est donc tout à fait nécessaire de donner une nouvelle propriété à l'électricité, propriété qui ne soit pas statique. C'est la *courant électrique* avec sa direction, son intensité, son sens; partant on assiste à la naissance d'un nouveau champ théorique: celui de l'électromagnétisme.

Le concept de *simplicité* doit être modifié. Lavoisier (p190) et des corps simples contre les corps simples des péripatéticiens (remarque, la terre damnée, Parties terreuses et insipides d'un corps qui a été soumis à la distillation) . Au fond, les corps sont simples en fait, pas en droit, comme les qualités. *Eléments est un titre provisoire* (p191)

Il propose, dans son tableau de 1782, 58 corps simples, parmi lesquels la lumière, le calorique. Au début du siècle, on en dénombrait 27 puis bientôt 90. Voir tableau de Mendeleïev.

Ce qui importe, pour la suite du raisonnement est que la classification est provisoire, ce que la suite des progrès de la chimie prouve. La TP doit être *modeste* (p. 190).

§3. UNE QP NE L'EST QU'A TITRE PROVISOIRE

Exemple de disparition d'une *qualité première*: l'éclairement.

L'éclairement lumineux d'une surface est la densité superficielle du flux lumineux reçu par cette surface. Unité d'éclairement, le *lux* (celle du flux est le *lumen*). Cette qualité subit une traduction mathématique sous la forme d'une ligne dite *vibration lumineuse*. Cette notion s'est prêtée à une mise en équation qui ouvrait ainsi la voie à une théorie physique.

On observera donc ici que Duhem n'est en rien hostile à la théorie vibratoire de la lumière à condition de ne pas affirmer que la lumière *est* une vibration.

Polarisation diélectrique. Un diélectrique est un matériau qui ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique, de produire du courant (le vide, le verre, des plastiques). Malgré l'impossibilité des milieux diélectriques de conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet, les atomes qui constituent le matériau peuvent présenter des dipôles électrostatiques qui sont susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ électrique, au niveau microscopique, par une polarisabilité, et au niveau macroscopique, par la susceptibilité électrique.

Donc, ce matériau, soumis à un champ électrique induit en son sein des dipôles qui, à leur tour créent des champs qui ont tendance à s'opposer au champ extérieur. Ceci constitue la

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

polarisation diélectrique (très importante dans toute l'électronique). Là encore, il n'était pas possible de réduire le phénomène à d'autres déjà connus. De plus, cette polarisation reçut une traduction symbolique efficace : "*Un segment de droite fournit le symbole mathématique qui permet de parler de la polarisation diélectrique dans le langage des géomètres*" (p192).

Cette situation produit les étapes suivantes:

- 1) Dans une zone physique, on a une théorie locale issue d'une qualité première: l'éclairement et sa traduction symbolique, la vibration lumineuse.
- 2) Dans une zone extérieure, une autre théorie locale concernant les substances isolantes, les diélectriques, reçoit son interprétation symbolique: la polarisation diélectrique.
- 3) Les équations de l'une et de l'autre de ces traductions sont établies en toute indépendance.
- 4) Les équations de l'une et de l'autre de ces traductions se révèlent parfaitement conformes et équivalentes.
- 5) Conclusion, l'éclairement disparaît *en tant que* qualité première. La vibration lumineuse n'est autre que la polarisation diélectrique.
- 6) Une théorie unificatrice voit le jour: la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell.

On insistera sur le fait que c'est au niveau de la représentation que cette disparition/unification se réalise; au niveau symbolique, mais pas au niveau des faits sensibles.

La fin de ce chapitre reprend le thème développé dans la première partie:

La nature ne cesse de fournir des faits et la raison ne cesse de condenser les théories.

CHAPITRE III. LA DEDUCTION MATHÉMATIQUE ET LA THÉORIE PHYSIQUE

§1. A-PEU-PRES PHYSIQUE ET PRÉCISION MATHÉMATIQUE.

PP 197/8, Duhem fait le point sur les opérations constitutives de la Théorie Physique. Il en avait exposé *l'économie générale* dans la Première partie, pp25/6. Rappelons-les:

1. Choix des lois expérimentales *premières* et première traduction symbolique
2. Choix des propositions hypothétiques reliant les prop. premières
3. Développement algébrique-symbolique
4. Jugement des conséquences physiques

Les deux tâches-programme de la première étape ont été décrites dans les deux chapitres I et II de cette seconde partie.

La seconde opération annoncée -l'établissement des relations « algébriques, symboliques » - constitue précisément le *choix des hypothèses*; il a bien lieu dans le champ symbolique-algébrique, pas dans celui des faits et de l'expérience.

Ceci représente l'étape abstraite de l'édification de la Théorie Physique, comme le dessin du

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

plan et le choix des matériaux constitue l'étape abstraite d'une construction. Il faut, avant de réaliser cette tâche abstraite, en réaliser une autre qui la concerne directement, qui consiste à examiner les conséquences qu'elle entraînera: ces conséquences détermineront le choix des hypothèses.

Il faut donc étudier l'étape n°3 avant de revenir à l'étape n°2. (p. 198 haut)

Page 198: quelques caractéristiques de la déduction mathématique

-son caractère de causalité nécessaire: intermédiaire liant les conséquences aux circonstances (rappel du débat sur la causalité mathématique).

-elle est essentiellement distincte et hétérogène aux faits physiques: les appareils physiques ne sont pas des objets mathématiques (p.198).

LE THEME DE LA TRADUCTION:

-Le langage d'origine, celui dont la traduction est une *version* est celui de l'observation concrète, celui de l'expérience. Plus tard, il faudra faire un *thème*.

-La langue traduite est évidemment l'algèbre, le langage des nombres

Page 199: une version est une trahison. Pour le moment, Duhem examine un des aspects de la trahison : *traduttore, traditore*. Entre les faits (langage premier) et les nombres (langage symbolique et second), il y a plusieurs caractéristiques différentes. « La différence est extrême ».

Le rapport du langage mathématique et des faits physiques acquiert, avec Duhem, un niveau de complexité -ou de composition- supérieur par rapport à ce qu'il était dans le manifeste galiléen. Les mathématiques étaient le *langage de la nature*; elles sont ici la traduction du langage primitif de la nature.

Fait théorique = fait concret traduit.

Un fait théorique est un ensemble de données mathématiques qui remplace un fait concret.

Pages 199/200, reprise en un exemple moderne (une distribution calorique continue) du très ancien thème de l'exactitude mathématique face à l'approximation naturelle et sensible.

« Nous ne saurions déclarer, par exemple que telle température est rigoureusement égale à 10° ; nous pouvons seulement affirmer etc. » (p.200)

Thèse très importante pour Duhem :

« Une infinité de faits théoriques différents peuvent être pris pour traduction d'un même fait pratique » (201)

-D'Alembert, en exergue à $\Sigma\omicron\zeta\epsilon\iota\nu\ \tau\alpha\ \phi\alpha\iota\nu\omicron\mu\epsilon\nu\alpha$ de Duhem:

"Il faut avouer que les géomètres abusent quelquefois de cette application de l'algèbre à la physique. Au défaut d'expériences propres à servir de base à leur calcul, ils se permettent des hypothèses, les plus commodes à la vérité qu'il leur

est possible, mais souvent très éloignées de ce qui est réellement dans la nature"¹².

-Surtout voir la physique d'Aristote comme ηοο επι το πολυ (dans la plupart des cas).

Observons que Duhem fait un *passage en revue* fort précis des catégories selon lesquelles l'imprécision s'impose:

- 1) le rapport de la matière naturelle et de la forme géométrique abstraite ou idéale
- 2) de l'impossible figuration en géométrie: par exemple à cause de l'épaisseur de toute ligne représentée.
- 3) de l'impossibilité pratique de *viser* l'élément ultime du continu: le thermomètre ne peut viser un point.
- 4) de l'impossible perfection des appareillages eux-mêmes, qui ne donnent d'indications *qu'à* 10^{-n} près: le nombre théorique devient, traduit, un intervalle.

Page 201, Duhem désigne ce transport du nombre à un intervalle par l'idée de faisceau. La diminution du diamètre de cet intervalle, de ce voisinage est le critère "*vers la perfection*" de la traduction. Le diamètre est une limite qui dit l'erreur maximale de traduction.

De la cette conséquence : une infinité de faits théoriques différents peuvent être pris pour la traduction d'un même fait pratique. (p201)

La locution "*au point de s'évanouir*" est très XVII, XVIII^e siècles.

§2. DEDUCTIONS MATHÉMATIQUES PHYSIQUEMENT UTILES OU INUTILES

Les calculs du théoricien ne présageront pas le résultat de l'expérience sous forme d'un fait théorique unique, mais sous la forme d'une infinité de faits théoriques différents. (202)

Un exemple de risque d'inutilité est fourni par une formule de thermo p202. Elle lie la température de fusion d'un corps à la pression, par lecture et traduction -dans les deux sens-

La pression par exemple sera donnée à 10^{-1} atmosphères près et la température de fusion obtenue le sera à une incertitude près, elle aussi.

Si le ΔP proposé par le manomètre, fournit -par le thème correspondant à la seconde traduction- une lecture unique du thermomètre (due elle-même à une imprécision, puisque la mesure donne, en réalité un ΔT) , alors la déduction mathématique aura atteint son but. Les deux traductions n'auront pas créé de perte de sens ou d'information.

Si par contre, la mesure *thématique* -de retour aux faits est plus précise, la lecture deviendra incertaine. Duhem manie donc un paradoxe, à savoir que, par une trop grande précision de seconde traduction "*la déduction mathématique aura perdu de son utilité*".

Il faut donc, pour que la formule soit utile qu'il y ait correspondance, ou plutôt compatibilité des

¹²D'Alembert, Discours préliminaire de L'Encyclopédie.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

approximations, sinon, la lecture du résultat sera possible, mais comme non-sens.

L'inadéquation entre la prévision théorique et le fait pratique visé est souvent provisoire (amélioration des instruments de mesure des données de départ etc.)

En fait, la théorie associe un faisceau de faits pratiques (résultats) à un faisceau de faits pratiques (initiaux).

§3. EXEMPLE DE DEDUCTION MATHEMATIQUE A TOUT JAMAIS INUTILISABLE

L'argument général du début est le suivant: soit une déduction mathématique représentée par une fonction du type: $y = f(x)$.

x désigne un fait théorique donné, y un fait théorique déduit.

Si l'on tient compte des effets de traduction, la formule pratiquement interprétée sera du type $\Delta y = f(\Delta x)$.

Δx désigne un faisceau de faits théoriques (donc traduits en version)

Δy un faisceau de faits théoriques (à traduire en thème)

Supposons l'interprétation de y valable sous un Δy donné, il suffit d'imposer un Δx suffisant (suffisamment petit, ou précis) pour que la formule soit utile.

Si cette possibilité existe, alors la formule devient possiblement utile (au fur et à mesure de l'amélioration de l'approximation Δx . cependant souligne Duhem, cet objectif n'est pas toujours possible. Au fond il s'agit du problème mathématique fondamental de la continuité. Si la fonction f est continue, alors le problème est-en droit- soluble; mais ce n'est pas toujours le cas.

La continuité d'une fonction exprime exactement ceci: f est continue en x_0 ssi pour tout voisinage de y_0 , il existe un voisinage de x_0 dont l'image est dans le voisinage imposé de y_0 .

Duhem se réfère à J. Hadamard (1865-1963) qui a précisément abordé la question de la valeur de l'interprétation physique des développements mathématiques: il impose -pour qu'une interprétation soit possible- aux solutions de *dépendre continûment* des données :

"Si l'on modifie légèrement les données, la solution doit peu varier: autrement, nous n'avons pas une solution physique de notre problème, puisqu'en pratique, les données ne sont connues qu'avec une certaine approximation" (in Enc.univ. T9, 64 a).

C'est ce qu'il appelle alors un *problème correctement posé*. Il est remarquable que ces préoccupations donneront naissance aux singularités, calcul des variations etc. qui nourrissent aujourd'hui les travaux de Thom et autres "catastrophistes": l'infinie petitesse des variations causales entraînant des variations non infiniment petites des effets.

-Exemple des géodésiques de surfaces à courbures opposée.

Soit donc un voisinage aussi petit que l'on veut du point de départ, il n'existe pas de courbe sur la surface complexe considérée qui ait un voisinage dans lequel rentreront les géodésiques

générées par le voisinage de départ. (Ceci est très bien exprimé par Duhem page 211, en haut). C'est exactement un cas de discontinuité et donc d'impossible prédiction; si l'on veut, c'est un modèle mathématique non déterministe.

Une masse matérielle glisse sur une surface ; aucune pesanteur, aucune force ne la sollicite ; aucun frottement ne gêne son mouvement. Si la surface sur laquelle elle doit demeurer est un plan, elle décrit une ligne droite avec une vitesse uniforme ; si la surface est une sphère, elle décrit un arc de grand cercle, également avec une vitesse uniforme. Si notre point matériel se meut sur une surface quelconque, il décrit une ligne que les géomètres nomment une ligne géodésique de la surface considérée. Lorsqu'on se donne la position initiale de notre point matériel et la direction de sa vitesse initiale, la géodésique qu'il doit décrire est bien déterminée.

Imaginons le front d'un taureau, avec les éminences d'où partent les cornes et les oreilles, et les cols qui se creusent entre ces éminences ; mais allongeons sans limite ces cornes et ces oreilles, de telle façon qu'elles s'étendent à l'infini ; nous aurons une des surfaces que nous voulons étudier.

Il est, d'abord, des géodésiques qui se ferment sur elles-mêmes. Il en est aussi qui, sans jamais repasser exactement par leur point de départ, ne s'en éloignent jamais infiniment ; les unes tournent sans cesse autour de la corne droite, les autres autour de la corne gauche... d'autres, plus compliquées, font alterner suivant certaines règles les tours

qu'elles décrivent Enfin, il y aura des géodésiques qui s'en iront à l'infini, les unes en gravissant la corne droite, les autres en gravissant la corne gauche...

Malgré cette complication, si l'on connaît avec une entière exactitude la position initiale d'un point matériel et la direction de la vitesse initiale, la ligne géodésique que ce point suivra dans son mouvement sera déterminée sans aucune ambiguïté. On saura très certainement, en particulier, si le mobile doit demeurer toujours à distance finie ou s'il s'éloignera indéfiniment pour ne plus jamais revenir.

Il en sera tout autrement si les conditions initiales ne sont pas données mathématiquement, mais pratiquement ; la position initiale de notre point matériel ne sera plus un point déterminé sur la surface, mais un point quelconque pris à l'intérieur d'une petite tache ; la direction de la vitesse initiale ne sera plus une droite définie sans ambiguïté? mais une quelconque des droites que comprend un étroit faisceau dont le contour de la petite tache forme le lien ; à nos données initiales pratiquement déterminées correspondra, pour le géomètre, une infinie multiplicité de données initiales différentes.

Imaginons que certaines de ces données géométriques correspondent à une ligne géodésique qui ne s'éloigne pas à l'infini, par exemple, à une ligne géodésique qui tourne sans cesse autour de la corne droite. La Géométrie nous permet d'affirmer ceci : Parmi les données mathématiques innombrables qui correspondent aux mêmes données pratiques, il en est qui déterminent une géodésique s'éloignant indéfiniment de son point de départ ; après avoir tourné un certain nombre de fois autour de la corne droite, cette géodésique s'en ira à l'infini soit sur la corne droite, soit sur la corne gauche, soit sur l'oreille droite, soit sur l'oreille gauche. Il y a plus ; malgré les limites étroites qui resserrent les données géométriques capables de représenter nos données pratiques, on peut toujours prendre ces données géométriques de telle sorte que la géodésique s'éloigne sur celle des nappes infinies qu'on aura choisie d'avance.

On aura beau augmenter la précision avec laquelle sont déterminées les données pratiques, rendre plus petite la tache où se trouve la position initiale du point matériel, resserrer le faisceau qui comprend la direction initiale de la vitesse, jamais la géodésique qui demeure à distance finie en tournant sans cesse autour de la corne droite ne pourra être débarrassée de ces compagnes infidèles qui,

après avoir tournées comme elle autour de la même corne, s'écarteront indéfiniment...

Si donc un point matériel est lancé sur la surface étudiée à partir d'une position géométriquement donnée, avec une vitesse géométriquement donnée, la déduction mathématique peut déterminer la trajectoire de ce point et dire si cette trajectoire s'éloigne ou non à l'infini. Mais, pour le physicien, cette déduction est à tout jamais inutilisable. Lorsqu'en effet les données ne sont plus connues géométriquement, mais sont déterminées par des procédés physiques, si précis qu'on les suppose, la question posée demeure et demeurera toujours sans réponse. (p.208-211)

§4. LES MATHÉMATIQUES DE L'A-PEU-PRES

La prédiction de Duhem, p212 (en haut) est remarquable. La théorie des catastrophes est toute centrée sur cette impossibilité.

On lira l'hommage de René Thom à Pierre Duhem, précisément sur cette question, in *Paraboles et catastrophes*¹³

Le problème des trois corps: (p212) la formule newtonienne de base de l'attraction: $f = k.m.m'/d^2$ décide de la trajectoire respective de deux corps. Dès qu'ils sont trois, les trajectoires des corps posent de terribles problèmes aux mathématiciens. Il est ainsi révélateur de l'impossible identification des faits naturels à leurs symboles algébriques.

Voici son énoncé tel qu'il est donné dans *l'Encyclopédie méthodique* :

"trois corps étant lancés dans le vide avec des vitesses et suivant des directions quelconques, et s'attirant en raison inverse du carré de leurs distances, trouver les courbes décrites par chacun de ces trois corps" (TII, p665)

Le problème n'est toujours pas résolu dans sa généralité et par des séries autres que très lentement convergentes et l'on travaille en mécanique céleste sur des approximations et des cas particuliers. (voir p.213)

Mention des travaux sur les trajectoires de Poincaré : mémoire montrant la stabilité, petite erreur, grande conséquences : instabilité possible.

Trois corps et Chaos

Un exemple de réflexions nouvelles : le problème des trois corps et Poincaré. Bonne présentation in Galison *L'empire du temps*. page 80 sq. Avec le problème du cas « non élucidé » d'instabilité (correspondance avec Mittag-Leffler de 1889). C'est très intéressant : un article est rédigé, récompensé, couronné, qui démontre la stabilité du système solaire...or un grain de sable s'est glissé qui résiste et renverse toute la problématique pour déboucher sur la théorie du chaos comme règle cosmologique. (p.80 à 90).

Une déduction mathématique n'est pas utile au physicien tant qu'elle se borne à affirmer que telle proposition, rigoureusement vraie, a pour conséquence

¹³R.Thom, *paraboles et catastrophes*; Flammarion, 1983, Note 4, p163.

l'exactitude rigoureuse de telle autre proposition. Pour être utile au physicien, il lui faut encore prouver que la seconde proposition reste à peu près exacte lorsque la première est seulement à peu près vraie. Et cela ne suffit pas encore ; il lui faut délimiter l'amplitude de ces deux à-peu-près ; il lui faut fixer les bornes de l'erreur qui peut être commise sur le résultat, lorsque l'on connaît le degré de précision des méthodes qui ont servi à mesurer les données ; il lui faut définir le degré d'incertitude qu'on pourra accorder aux données lorsqu'on voudra connaître le résultat avec une approximation déterminée. Telles sont les conditions rigoureuses qu'on est tenu d'imposer à la déduction mathématique si l'on veut que cette langue, d'une précision absolue, puisse traduire, sans le trahir, le langage du physicien ; car les termes de ce dernier langage sont et seront toujours vagues et imprécis, comme les perceptions qu'ils doivent exprimer. À ces conditions, mais à ces conditions seulement, on aura une représentation mathématique de l'à-peu-près. (p.214)

CHAPITRE IV. L'EXPERIENCE DE PHYSIQUE

Sur les articles de Milhaud, Le Roy et Wilbois signalés par P. Duhem p217-8.

Note sur Edouard Le Roy (1870-1954), un positiviste chrétien: ENS, Agrégation, Thèse en mathématique. Découverte enthousiaste de la philosophie au travers Bergson et le bergsonisme. Assistant, puis successeur de Bergson au Collège de France. C'est un savant catholique, mais pas toujours en odeur de sainteté (*Le problème de Dieu* est mis à l'index en 1931; il est lié à Teilhard de Chardin).

En épistémologie, il est un phénoméniste radical: "Les faits sont moins établis qu'ils ne sont construits. Loin d'être passivement reçus par l'entendement, ils sont-dans une certaine mesure-créés par lui". Sur fond d'une restauration d'un finalisme théologique, il forge un concept d'invention créatrice, par lequel les choses sont dans la mesure où elles sont inventées.

Tout théoricien de la physique doit examiner le statut de l'expérience. Duhem le fait très précisément. Avant d'en examiner le statut proprement dit, il faut relever certaines de ses caractéristiques.

§1. DOUBLE CARACTERE DE L'EXPERIENCE DE PHYSIQUE: OBSERVATION ET INTERPRETATION.

Vérité et certitude ne concernent évidemment pas la réalité ultime des choses dont sont issues la théorie physique, mais "*la concordance entre les conclusions de la théorie et les règles établies par les observateurs*"(p217).

Nous sommes assez loin de la vérité comme « *adaequatio rei et intellectus* ».

Retenons que les conclusions existent dans le domaine symbolique. Elles sont rendues possibles par les énoncés produits au cours de la troisième étape décrite au chapitre II de la première partie, et elles deviennent véritablement conclusion, elles prennent sens lors de leur traduction en un langage qui permet de les confronter aux règles issues de l'observation des faits.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

L'expérience de physique n'est pas le moment constitutif de la langue théorique, elle ne concerne pas le choix des symboles. Elle est comme une sorte de conséquence de ces choix; elle est utilisation de ce langage.

Mais elle n'est pas -à ce stade- seulement le couronnement de la théorie. Elle semble contribuer au développement de la langue théorique, puisque "*cette interprétation substitue aux données concrètes réellement recueillies par l'observation des représentations abstraites et symboliques...*"(p222). Evidemment, elle a tout de même une fonction d'arbitrage dans la mesure où la possibilité ou impossibilité de cette substitution valide ou invalide la construction hypothétique-symbolique proposée.

Il montre comment une expérience (par exemple Regnault étudiant la compressibilité des gaz), n'est pas fondamentalement une observation de faits, mais la mobilisation de divers chapitres de la théorie physique. (p.219-221)

Suivent deux exemples où se manifeste le caractère double de l'expérience: le dispositif expérimental crée ou reproduit des faits bruts qui, par eux-mêmes, n'ont aucun sens; (à détailler, les expériences de mesure d'une résistance et de compressibilité des gaz). Donc, premier caractère, l'observation. Le second, l'interprétation.

Le premier exemple, celui de la mesure d'une résistance n'est pas clairement identifié. Il est clair qu'il fait intervenir un galvanomètre de précision (les spots servant à repérer les graduations le prouvent); il n'est pas impossible qu'il s'agisse d'une expérimentation de mesure de courant alternatif.

Le second fait apparaît un personnage sur lequel Duhem revient à plusieurs reprises: Henri Regnault (1810-1878).

Note sur H.Regnault: fils d'un officier napoléonien, orphelin très tôt, enfance difficile; entre à polytechnique; assistant, puis successeur de Gay Lussac; Académie des Sciences, Collège de France; mais fin de vie terrible (mort du fils, destruction de tous ses appareillages, raison vacillante...)

Il est remarquable que Regnault n'ait pas laissé le moindre écrit (publié ou en note) discutant de théorie physique.

C'est un expérimentateur presque légendaire. Il redéfinit toutes les constantes thermiques (entre 1840 et 1870) par des mesures et des appareillages d'une précision jamais atteinte alors. Il montre ainsi que les lois de Dulong et Petit (dérivant de la loi de Mariotte) ne sont que des approximations. En 1847, il montre la nature approximative (ou fautive dirait Duhem?) de la loi de Mariotte:

Si le volume V d'un gaz est divisé par 16 à température constante, la loi de Mariotte prévoit que sa pression est multipliée par 16.

Regnault montre que, pour l'Hydrogène, ce facteur est 16,162

Pour l'Azote, 15,860

Pour l'air 15,804

Pour le CO₂ 13,926

L'équation de Mariotte s'est transformée-complicquée; elle se présente aujourd'hui sous une forme du type:

$$PV = A + BP + CP^2 + DP^3 \dots$$

Attention : dans l'expérience de Regnault, il y a des faits concrets : une surface de mercure, des traits sur le support d'un thermomètre, mais ce ne sont pas eux qui sont mentionnés dans le compte-rendu de laboratoire : c'est la valeur d'un volume de gaz, de sa pression, de sa température.

Ce ne sont pas des objets concrets, ce sont des symboles abstraits. (220-221) qui réclament « une foule de chapitres de la Physique » souvent controversés. Ce que produit Regnault, c'est une substitution de symboles aux *documents concrets*. (La *version*)

Pages 221-2 est donnée la définition d'une expérience de physique: observation **précise** d'un groupe de phénomènes accompagnée de l'interprétation.

Il y a là pour une part conformité avec ce que nous savions et aussi élargissement du rôle de l'expérience de physique.

-conformité car l'expérience n'est rien tant qu'elle n'est pas traduite, parlée algébriquement; ce qui constitue bien la condition de sa prise de sens. On doit insister sur le fait que cette traduction-là n'est pas hypothétique: elle ne fixe pas un langage équivalent aux groupes de faits observés. Elle est rendue possible parce que ce langage a déjà été fixé et constitué dans la théorie, au cours des étapes 1 et 2.

L'expérience de physique n'est pas le moment constitutif de la langue théorique, elle ne concerne pas le choix des symboles. Elle est comme une sorte de conséquence de ces choix; elle est utilisation de ce langage.

-élargissement car il semble qu'elle ne soit pas -à ce stade- seulement le couronnement de théorie. Elle semble contribuer au développement de la langue théorique, puisque "*cette interprétation substitue aux données concrètes réellement recueillies par l'observation des représentations abstraites et symboliques...*"(p222). Evidemment, elle a tout de même une fonction d'arbitrage dans la mesure où la possibilité ou impossibilité de cette substitution valide ou invalide la construction hypothétique-symbolique proposée.

L'expérience de physique est , dit Duhem :

"Observation précise d'un groupe de phénomènes accompagnée de leur interprétation"(p221) et cette interprétation: "substitue aux données concrètes réellement recueillies par l'observation des représentations abstraites et symboliques."(p222).

§2. LE RESULTAT DE L'EXPERIENCE COMME JUGEMENT.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

L'expérience de physique diffère par nature, de l'expérience vulgaire. Remarque: l'exemple donné d'expérience vulgaire (p222) n'est pas innocent. C'est en effet dans les expériences de Galvani, vers 1790 sur des pattes de grenouille qu'est apparue la première production chimique de courant électrique. Ce fut Volta qui donna une interprétation chimique correcte du phénomène et mis fin à l'idée d'électricité animale de Galvani.

La traduction n'est pas la simple expression univoque des faits concrets en langage de spécialiste. Il conteste ici l'opinion de Poincaré "*Le fait scientifique n'est que le fait brut énoncé dans un langage commode*" (cité pp226-7).

Le même fait scientifique peut être mis en scène de multiples manières (faits concrets) différentes. Voir exemple p. 224-225.

Pour Duhem,

"Entre les phénomènes réellement constatés ...et le résultat de cette expérience, formulée par le physicien, s'intercale une élaboration intellectuelle très complexe qui, à un récit de faits concrets, substitue un jugement abstrait et symbolique" (p230)

Cette élaboration n'étant plus une simple traduction. Passage de l'étape 1 à la 2.

Les raisons de la distinction entre l'expérience vulgaire et l'expérience scientifique sont exposées à partir d'exemples précis. Elle est plus vraie mais moins riche.

Ces exemples ont pour fonction de montrer le processus d'emboîtement de faits théoriques complexes à partir d'un fait concret.

Page 223 on voit que la lecture d'une variation de Force électromotrice en raison d'une variation de la pression contient:

- la notion de pression: "un des symboles les plus subtils de la mécanique rationnelle"
- la notion de f.e.m. proprement dite qui en "*appelle à la théorie électrocinétique*". Dans un circuit, la fem est égale au produit des résistances par l'intensité du courant.
- la notion de Volt (unité de différence de potentiel électrique; c'est le travail d'une charge électrique) qui "*se tire des équations de l'électromagnétisme*".

De même, la proposition "*Le courant passe*" (p226) n'est pas un fait concret, même traduit en langage de spécialiste; c'est une interprétation théorique complexe qui correspond à une grande variété possible de faits concrets:

- déviation du spot d'un galvanomètre ou
- incandescence d'un fil
- ou échauffement ou
- production d'étincelles

Ces faits concrets peuvent ne pas être en accord; ainsi, le galvanomètre peut ne pas bouger et l'échauffement avoir lieu sans pour autant que l'interprétation théorique n'ait à être modifiée.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Un même fait théorique correspond ici à des faits concrets distincts.

L'interprétation théorique commence donc par la connaissance, ou re/connaissance de l'unité possible de ces faits distincts; connaissance qui ne peut être fondée que sur l'admission de principes théoriques hypothétiques. C'est d'ailleurs ce qu'admet Poincaré (cf. p.228).

Critique de Meyerson de cette discontinuité entre : fait grossier/fait scientifique ; langage commun/langage scientifique. La critique va contre E. Le Roy et P. Duhem. Voir dans *Identité et réalité*. Comme Duhem, Le Roy distingue radicalement entre fait brut et fait scientifique. Il ya deux éclipses (celle du sens commun et celle du savant, reconstruite). Meyerson argumente longuement contre ceci de la manière suivante. Il insiste sur la continuité entre les faits grossiers et les faits rationalisés.

« Fait brut et fait scientifique ne font qu'un. Il n'y a entre eux nulle solution de continuité. » (*I & R*, p. 434, belle page !)

Deux pages plus loin (p. 436-437), il reprend en la contestant la coupure entre la situation de l'officier sur le voilier (p. 224 de Duhem) et celle de H. Regnault.

« Nous ne sommes pas bien sûr d'avoir compris la différence que ce savant établit entre le sens commun et les théories scientifiques » (p. 436)

Il y a, chez Duhem, dans des chapitres particuliers comme celui-ci, comme dans les chapitres plus généraux de la première partie, la volonté de convaincre que le réel ne se donne pas au physicien; au fond, pas plus par l'expérience que par la métaphysique. Les faits objets d'expérience ne sont -à leur tour- que des voiles de la réalité. La physique théorique ne peut espérer les ôter; mais trouver un langage pour leur donner sens.

L'argument essentiel qui va être développé est celui de la non-univocité de la relation entre symbole abstrait et fait concret :

"Entre un symbole abstrait et un fait concret, il peut y avoir correspondance, il ne peut y avoir entière parité; le symbole abstrait ne peut être la représentation adéquate du fait concret, le fait concret ne peut être l'exacte réalisation du symbole abstrait; la formule abstraite et symbolique par laquelle un physicien exprime les faits concrets qu'il a constatés au cours d'une expérience ne peut être l'exact équivalent, la relation fidèle de ces constatations" (fin p228)

Rappelons que le but de la théorie physique est la représentation des faits et non leur explication. Voici qu'une distance supplémentaire est annoncée. Cette représentation elle-même est inexacte. Mais pouvait-il en être autrement: si la représentation symbolique pouvait être l'exacte image des faits, ne serions-nous pas revenus bien près de l'explication de ces faits?

L'inexacte correspondance entre faits et symboles est à double sens (p229):

-A un fait théorique correspond une infinité de faits pratiques distincts (voir exemple précédent

du courant)

-à un fait pratique correspond une infinité de faits théoriques. On se rappellera l'argumentation de l'imprécision de mesure, du voisinage, au chapitre III, 2^{de} partie.

§3. L'INSTRUMENT AUSSI EST "DE LA THEORIE"

L'idée dominante ici, sera de montrer en quoi, tout, dans l'activité du physicien est traduction, interprétation. Les instruments et les appareils d'abord doivent être traduits et interprétés. Ils ne sont rien pour le physicien tant qu'ils demeurent des objets concrets.

Ces objets concrets ne deviennent instruments physiques qu'en vertu de la ou des théories physiques.

Le premier exemple (p232) est celui de l'un des plus simples d'entre eux; la loupe, qui, découplée de la théorie de la réfraction et de la diffraction (de même que le microscope) n'est pas un instrument de physique.

La suite du paragraphe brode sur le même thème; il convient de prendre ici, le terme de broder, non au sens un peu vain de "variations plus ou moins répétitives ou fictives" mais dans celui de "constitution d'un réseau".

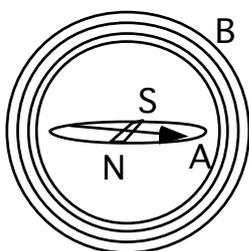
Le motif de l'interprétation, de la traduction nécessaire de l'instrument se multiplie, se complexifie, se noue et, avec des instruments plus complexes, nous entrons dans un réseau d'interprétations symboliques multiples; dont voici quelques unes des trames:

Interprétation de ce à quoi s'applique l'instrument, soit la zone de la physique qui réclame ou suggère cet instrument

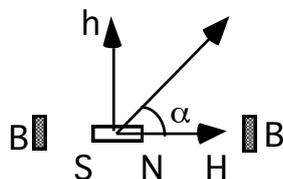
Interprétation de l'instrument lui-même et de ses parties

Interprétation des indications fournies.

Exemple de la *boussole des tangentes* (galvanomètre à aimant mobile pour les très petits courants). Duhem détaille ces *interprétations* :



Vue de face



Vue de dessus

L'usage physique de cet instrument exige 1. Une théorie électromagnétique ; 2.Plusieurs traductions symboliques (de N, de R, de H) 3. Une série d'idéalisation d'objets réels en objets géométriques : des spires en cercles, une torsion en une rotation 4. La substitution du laboratoire en une espace pur déterminé par un champ.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

En l'absence de courant, l'aimant NS est orienté selon le champ électromagnétique terrestre (vers H). Lorsqu'un courant passe dans B, il crée un champ magnétique h dirigé suivant l'axe de la bobine. L'aimant s'oriente alors dans une direction composée de H et de h. Il tourne d'un angle α donné par la formule:

$\tan \alpha = Ki/H$. (c'est la *certaine formule* p233).

Là dedans, K et H sont des constantes propres à la boussole, et Il est vrai que K dépend du nombre N de spires de la bobine et de son rayon R. H dépend du champ caractéristique de la boussole. (cf. pp233-4)

Il y a donc présence:

1) d'une théorie électromagnétique préalable

2) de plusieurs traductions symboliques:

-celle qui donne N

-celle qui donne R

-celle qui donne H

3) d'une série d'idéalisations ou d'abstractions d'objets réels en objets géométriques:

-les spires en cercles

-une pièce d'acier en un rectangle

-une torsion en une rotation sans frottement

4)une substitution générale du laboratoire en un espace pur déterminé par un champ.

C'est dans la considération de ces multiples traductions-interprétation que peut se réaliser le passage du fait concret au fait physique.

Voici donc qu'apparaît (p235) le thème des deux instruments :

"Lorsqu'un physicien fait une expérience, deux représentations bien distinctes de l'instrument sur lequel il opère occupent simultanément son esprit; l'une est l'image de l'instrument concret qu'il manipule en réalité; l'autre est un type schématique du même instrument, construit au moyens de symboles fournis par les théories; et c'est sur cet instrument, idéal et symbolique qu'il raisonne, c'est à lui qu'il applique les lois et les formules de la physique." (p235).

La mise en rapport nécessaire de ces deux instruments nourrit une activité essentielle du physicien: la correction; qui elle aussi se passe en terre théorique.

Le ϵ d'erreur définit, rappelons-le, dans le vocabulaire duhémien, "*un groupe de jugements abstraits*" (bas P235), soit l'infinité des faits théoriques associés ou image d'un fait concret. La réduction de ce groupe est évidemment une importante tâche du physicien; progrès qui peut se réaliser sous deux influences:

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

1) l'amélioration des instruments concrets

2) corrélativement, l'amélioration -et donc la complexification- des théories physiques.

Il convient d'interpréter des faits nouveaux, accessoires, issus de l'amélioration des instruments. Le prix à payer est donc une nouvelle densification du réseau d'interprétations-traductions.

- Le manomètre de Régnault

De p. 236 (milieu) jusqu'à 239, l'exemple proposé pour les *deux instruments*, est celui d'un manomètre à air libre dont la fonction est la mesure de la pression d'un gaz, enfermé dans un espace fermé.

Le cathétomètre est un appareil permettant de trouver avec précision la distance entre deux plans horizontaux parallèles. Il a été justement mis au point par Dulong et Petit, pour la détermination de la différence de niveaux entre deux surfaces de mercure. C'est un appareil assez complexe.

Les lois simples ne tiennent pas compte de la compressibilité du fluide, de l'influence de la hauteur sur le coefficient de dilatation du mercure et des matériaux utilisés (verre), etc.

Il y a donc, dans cette expérience:

-une hauteur et une hauteur corrigée

-un mercure et un "mercure normal"

on a par exemple une formule du type : $h_0 = h_t \mu_t / \mu_0 \cdot g / g_0$ pour obtenir cette hauteur corrigée. (μ étant le poids spécifique du mercure)

La loi théorique, la formule est donc infiniment plus complexe que tout ce qui pourrait être directement donné par un simple fait de lecture. Cette "lecture abstraite" ou théorique ne peut résulter que de considérations associées au manomètre idéal de Regnault.

Après Regnault, d'autres considérations théoriques (l'action de la pesanteur sur le gaz) viendront encore compliquer la formule, qui est donc toujours une représentation provisoire; et en ce sens, jamais vraiment réelle.

§4. DE LA CRITIQUE D'UNE EXPERIENCE PHYSIQUE.

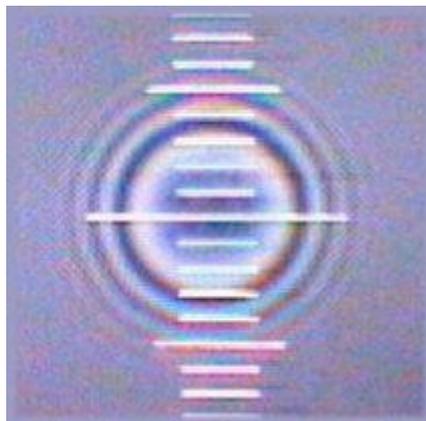
La confiance dans le récit-témoignage d'une expérience de physique n'est pas comme « j'ai vu un cheval blanc ». Pourtant, on ne cesse de recevoir ce genre de proposition : « j'ai vu des atomes » (film IBM), « j'ai vu le boson de Higgs », « j'ai vu un gène en action ».

La fiabilité, la créance réclamée au physicien inclut les critères de fiabilité du récit et elle suppose quelque chose en plus (p240, fin): elle suppose l'accord sur les théories préalables.

L'accord sur un résultat de physique n'est pas affaire de témoignage (p.240) et de convention (voir conceptions de Simon et Shaffer, ou Latour). Ce n'est là qu'une première étape qui ne peut faire l'économie de la « transposition des faits dans le monde idéal, abstrait, symbolique, créé par les théories » (240)

C'est ce que Duhem évoque à plusieurs reprises comme le critère de la langue commune. Cette exigence n'est pas toujours honorée, entre physiciens contemporains d'écoles différentes; et elle n'est jamais donnée au départ en histoire des sciences. Les théories anciennes (la langue de la physique) ne pouvant être celles d'aujourd'hui.

Il nous faut donc traduire la langue théorique ancienne dans notre langue théorique. Il nous



faut apprendre les langues (théoriques) anciennes.

L'exemple en question (p. 241-242) est celui de la *Théorie des accès* de Newton qui concerne la formation des anneaux de couleurs par des lames minces. (cf. détails autre cours, p.38)

Newton montre qu'un rayon traversant la lentille, puis atteignant la surface réfléchissante plane, à travers une "mince lame" d'air ou d'eau, forme des anneaux alternativement sombres et colorés (en lumière monochromatique). Il associe rigoureusement les conditions d'apparitions des rayons et leurs caractéristiques (diamètre, succession périodique) à l'épaisseur e séparant les deux surfaces.

Pour expliquer cet ensemble de phénomènes, Newton élabore une théorie dite des "accès". Cette théorie d'une part ne tient pas compte -ou plutôt évacue bien vite- du rôle des rayons réfractés par la première surface (celle de la lentille) et surtout, s'entend dans le cadre d'une conception assez strictement corpusculaire (discrète pourrait-on dire).

Young (1773-1829) et Fresnel(1788-1827) réinterprètent complètement la genèse des anneaux en abandonnant la théorie des accès et en suggérant la théorie des interférences et des longueurs d'onde. Leur théorie s'appuie notamment sur le rôle des rayons réfractés, négligés par Newton. Bien entendu, elle suppose une conception ondulatoire de la lumière.

Duhem nous suggère qu'il n'y a pas eu simplement négation d'une théorie, mais réinterprétation, traduction en une autre langue symbolique. La preuve, importante, qu'il y a bien traduction, et en fin de compte compréhension, est la possibilité d'établissement de correspondances numériques précises entre les faits, dits dans le premier langage et dans le second langage (le produit par 4 des nombres de Newton).

Ces remarques permettent à Duhem d'explicitier la thèse selon laquelle, les contradictions théoriques ne sont pas absolues; qu'elles peuvent coexister sans être signe irréfutable de l'erreur

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

et du faux. Un fait contre un fait ne signifie rien, n'informe de rien: un fait théorique contre un fait théorique réclame examen dans une langue théorique commune pour être jugé.

Des faits sans la langue interprétative sont des faits perdus (p. 242 fin) (p.243).

En conclusion, la certitude attachée au résultat d'une expérience de physique n'est pas de premier ordre: elle est soumise et subordonnée à l'adhésion à des théories.

Et même dans ce cas, l'entente ne se fera peut-être pas : il faut être d'accord sur l'ensemble de la démarche interprétative (faute de raisonnement, erreur de calcul, imperfection de l'appareil...).

Les arguments donnés p. 243-244 sont sérieux et valides.

Sans doute peut-on songer ici aux longues séries d'expériences de type Michelson-Morley ou encore des expériences difficiles de confirmation des expériences de Hertz et encore aux expériences sur la variation de masse des électrons.

Tous ces obstacles levés, il en reste d'autres : l'équation personnelle du physicien, l'erreur accidentelle. (p. 244, voir grand cours, p. 29)

Nouvelle référence à Pascal, p. 246.

§5. MOINS CERTAINE MAIS PLUS RICHE

Le dernier paragraphe entend faire le point sur les caractéristiques de l'expérience de physique face à l'observation vulgaire. Il ne présente aucune difficulté. remarquons simplement :

1)-le témoignage vulgaire est étroit (il concerne peu de paramètres et une échelle grossière) mais sûr.

-Le résultat d'expérience physique est lui ample (il pousse l'analyse et accumule les paramètres et la précision) mais sans certitude immédiate.

Ceci n'est pas sans rappeler la dichotomie entre esprits étroits mais forts et esprits amples mais faibles.

2)L'expérience de physique se doit d'être reproductible à l'identique ou dans une traduction théorique équivalente (PP247-8). C'est là un des principaux critères de validité des expériences physiques.

3)Le fait physique est si riche, si complexe qu'il ne peut être appréhendé sans un moyen d'économie de pensée. (P248) Il nécessite la Théorie comme économie (voir la *Théorie physique*, première partie). Plus précisément cette économie passe par la classification et l'expression dont le vecteur est la mathématique.

CHAPITRE V. LA LOI PHYSIQUE

§1. LES LOIS PHYSIQUES SONT DES RELATIONS SYMBOLIQUES

Objet du chapitre : préciser l'étape 4 de la TP, la *comparaison de la théorie avec l'expérience*.

La loi physique n'est ni vraie, ni fausse, elle est provisoire

Les lois, comme les expériences sont des relations symboliques qui ne prennent donc sens qu'en relation -en conséquence- avec une Théorie Physique.

Duhem nous soumet alors trois exemples de lois:

1) Une loi commune: "*tout homme est mortel*": son examen et son usage ne jouent que sur les relations générales de l'universel et du particulier.

2) Une loi de la physique non traduite symboliquement: "*Avant le tonnerre, il y a l'éclair*". Sous cette forme, elle est **immédiate**, elle est reçue sans médiation ni représentation intellectuelle abstraite.

3) La loi de Mariotte: à température et à masse constante, le rapport des pressions est inverse du rapport des volumes pour un gaz. $P_1/P_2 = V_2/V_1$.

Cette loi ainsi énoncée est "pleine de médiations" dont nous savons qu'elles sont toutes traductions symboliques:

-de la chose signifiée au signe qui la signifie (représente)

-de ce signe à ses traductions numériques avec tous les problèmes déjà examinés.

-de l'instrument concret à l'instrument idéal

-du choix d'une langue théorique plutôt qu'une autre.

Les deux premiers types de lois seront compris dans toutes leurs occurrences particulières par tous.

Le troisième type de loi ne le sera pas et mettra des faits "identiques" en contradiction éventuelles.

Ainsi dans l'énoncé de la loi de compression de gaz *unique*: cet énoncé est le même pour différentes écoles Théoriques. Le contenu et l'interprétation de faits identiques est cependant différent: une expérience (sur la vapeur d'iode -p253) confirme la loi pour les uns quand elle l'infirme pour les autres. Ceci parce que le dictionnaire de leur deux théories n'est pas le même: le terme de *gaz unique* n'est pas le même et renvoie à des images, des représentations à échelle microscopique, moléculaire distinctes.

§ 2. UNE LOI N'EST NI VRAIE, NI FAUSSE, MAIS APPROCÉE.

La question de la vérité ou de la fausseté d'une loi physique perd évidemment toute pertinence dès lors qu'on admet qu'elle est un énoncé symbolique. Son critère de vérité/fausseté est transporté dans le domaine logique ou il perd le sens qu'il peut avoir dans le domaine des faits simples.

Aux pages suivantes (p255-8), Duhem réexpose un thème connu.

-La symbolisation d'un fait (par exemple la course diurne du soleil) fournit une série

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

d'approximations, un voisinage infini de nombres (de coordonnées).

-Encore, cette symbolisation est-elle complexe et fourmille-t-elle de paramètres (aberration; réfraction lumineuse...)

-Surtout, plusieurs symbolisations (théorie; groupe d'équations) pourront-elles prétendre être un langage adapté.

Les modèles algébriques-géométriques distincts mais possibles sont bien connus (comme points méthodologiques) depuis les débats sur la cosmologie grecque. (cf. la conférence de Brenner sur les épicycles et excentriques).

Pour ces raisons: "Le physicien n'a pas le droit de dire d'aucune de ces lois qu'elle est vraie à l'exclusion des autres" (P258).

Abandonnant donc le dire vrai sur la nature et ses lois, le physicien choisit un ensemble, c'est-à-dire, une langue symbolique qu'il préfère à une autre sans nullifier celle-ci.

Et Duhem de critiquer l'antique principe finaliste de simplicité *"Il fut un temps où les physiciens...plus grande"* (pp258-9).

Duhem (*L'évolution de la mécanique*, p. 343 cité par Meyerson, *I&R*, p.478) : « La simplicité, si ardemment souhaitée, est une insaisissable chimère ». La classification naturelle n'est pas le système le plus simple.

On notera l'argument de "meilleure déductibilité" pour faire préférer, choisir une théorie plutôt qu'une autre (cf. chapitre sur les qualités premières): *"Le physicien préférera surtout...admet"* (p259).

§ 3. LES LOIS PHYSIQUES SONT PROVISOIRES, PARCE QU'ELLE EST APPROCHEE

1) Fondées sur des résultats d'expériences dont nous avons longuement vu la valeur inmanquablement approximative, les lois ne peuvent être que des approximations, même théoriques. Une part du "diamètre" de ce "groupe de jugement" constitué par une loi interprétée est bel est bien dû à l'approximation.

Les modifications (et donc la valeur relative) des mesures entraînent des modifications des traductions de ces mesures, des formules symboliques suggérées; bref une modification de l'interprétation et de l'énonciation des lois: *"Au fur et à mesure que devient plus étroite...rejetée par le second"* (p. 261-2).

L'exemple de la loi de Mariotte ($P.V = cte$) est simple. C'est une approximation symbolique convenable à des températures et pressions assez faibles qui devient fausse dans des conditions plus "limite" Elle doit alors être remplacée par des équations plus complexes.

Ces exemples pour insister sur le caractère relatif, provisoire (ou plutôt local) d'une loi physique. Elle n'est en-soi ni vraie ni fausse mais acceptable ou non.

§ 4. LA LOI PHYSIQUE EST PROVISOIRE, PARCE QU'ELLE EST SYMBOLIQUE

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

L'idée générale est audacieuse; elle revient à dire que la loi théorisée est provisoire parce qu'elle ne concerne jamais vraiment une réalité, une "vraie" chose de la nature; elle concerne des phénomènes idéalisés: des objets abstraits (au sens aristotélicien). Des objets dont la connaissance sensible nous a fourni l'occasion de les concevoir et de leur supposer des propriétés. Ainsi, la physique théorique ne concerne-t-elle pas un oxygène réel, mais un certain gaz représenté. Et cette représentation entraîne évidemment tout son cortège de traductions qui rendent possible le calcul et la théorie, mais aussi fixent et établissent la coupure ontologique entre les réalités naturelles et les objets de la science physique.

Que l'oxygène réel soit, Duhem ne le conteste pas, mais qu'il soit notre objet d'étude, non. Les connaissances expérimentales et les critiques théoriques entraînent toutefois, continuent des modifications de notre oxygène abstrait et donc des lois qui lui conviennent.

La loi de dilatation de l'oxygène -gaz parfait- est :

$$V = V_0 [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \text{ où } \alpha \text{ est une constante}$$

Placé dans un champ électrique, l'oxygène acquiert un pouvoir diélectrique qui l'éloigne de l'objet que la relation précédente décrivait.

Observons que les exemples de complexification des lois sont très souvent tirés d'introduction de phénomènes électromagnétiques (plutôt que mécaniques) que Duhem espérait fermement généraliser dans la théorie énergétique.

Cette loi linéaire simple acquiert alors des symboles mathématiques supplémentaires et si un champ magnétique vient à intervenir, tout change encore: notre oxygène idéal et aussi notre équation.

L'exemple de la capillarité (p267-268) est du même type: aux interactions gravitationnelles newtoniennes, il faut adjoindre des tensions superficielles qui résultent d'interactions à échelle faible; elles même pouvant être modifiées par l'application de courants électriques.

La symbolisation précédente est toujours appelée à devenir inacceptable. Duhem défend cette idée que la physique théorique n'est pas cumulative comme les mathématiques. La connaissance de plus de faits, la complication des équations symboliques qui en résulte dément les énonciations antérieures. Si les lois de la physique évoluent c'est par un jeu permanent d'entrée en contradiction avec des faits d'expérience, ce qui n'arrive pas en mathématique.

La physique ne progresse pas comme la géométrie, qui ajoute de nouvelles propositions définitives et indiscutables aux ... ; elle progresse parce que, sans cesse, l'expérience fait éclater de nouveaux désaccords entre les lois et les faits... (p .269)

§ 5. LES LOIS PHYSIQUES SONT PLUS DÉTAILLÉES

On trouve ici le thème de la distinction radicale du jugement de sens commun et du jugement scientifique (Bachelard oui, Meyerson non).

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

La conclusion du chapitre est à nouveau laissée à Pascal :

La vérité est une pointe si subtile que nos instruments sont trop émoussés pour y toucher exactement. S'ils y arrivent, ils en écachent la pointe, et appuient tout autour, plus sur le faux que sur le vrai » *Pensées*, 3)

CHAPITRE VI. LA LOI PHYSIQUE ET L'EXPERIENCE

§1. CONTROLE EXPERIMENTAL EN PHYSIQUE ET EN PHYSIOLOGIE

La théorie étant établie, il faut la juger, c'est-à-dire la considérer bonne ou mauvaise. Le moyen est de comparer ses conséquences avec les lois qu'elle doit figurer.

Dans ces pages, il faut examiner les caractéristiques de cette comparaison, de ce jugement d'adéquation qui confirmera ou infirmera une certaine théorie.

Les lignes fin de page 273 suggèrent l'idée -chez Duhem-, d'une sorte d'enfance des sciences; temps de la science où elle n'a pas encore été "prise en charge" par la symbolisation mathématique". On comprend immédiatement deux conséquences pour les sciences "qui en sont là":

1- N'ayant pas de langage représentatif symbolique, l'ensemble des problèmes liés au réseau de traduction que nous avons rencontrés dans les chapitres précédents disparaît.

2- Pour cette même raison, la précision, la richesse d'information et le niveau de classification auxquels peuvent prétendre ces sciences sont faibles. Elles ont à voir avec les connaissances banales.

Ce n'est pas qu'il n'y ait pas de théorie en chimie, en physiologie; la théorie a même quelques unes des prérogatives de la théorie physique: elle peut suggérer des expériences, elle peut être un cadre de généralisation (p274) mais il faut surtout reconnaître les différences très profondes entre cette théorie non symbolique et la théorie physique. Signalons en trois:

1-Les faits peuvent être recueillis, recensés sans théorie

Alors qu'en T.P., cela n'est pas possible: un fait non théorisé n'a tout bonnement pas de sens, n'est pas interprétable. C'est une conception discutable du fonctionnement de ces sciences. Voir les pages de Darwin sur une excursion de géologie, in *Une autobiographie*.

2-La relation des faits peut être scrupuleusement exacte (p275). On sait qu'en T.P. il n'y a pas d'exactitude possible, il n'y a que des faisceaux ou voisinages infinis de faits repérables et traduisibles.

3-L'expérience est neutre et objective de toute divergence théorique Au contraire de la physique théorique pour laquelle l'expérience "parle" différemment dans le cadre de telle ou telle théorie.

Au fond, en physiologie, en médecine, chaque expérience est une *experimentum crucis* (comme l'expérience de la moelle épinière décrite p276- Catégorie d'expérimentation très importante pour Claude Bernard). Ceci à condition qu'elle soit bien menée et bien observée, ce qui -Duhem

le concède- est fort difficile, pour des raisons pratiques (habileté, sens de l'observation) et pour des raisons plus profondes en vertu desquelles il est extraordinairement difficile de véritablement "laisser la théorie à la porte du laboratoire" (page 277) ou du lieu d'expérience; de ne pas privilégier tel ou tel fait, de ne pas négliger un autre qui viendrait à l'encontre des idées "théoriques" a priori.

Dans tout ceci, Duhem se rapporte à Claude Bernard (1813-1878) auteur de *L'introduction à l'étude de la médecine expérimentale* en 1865. Il convient d'avoir présent à l'esprit que C. Bernard a précisément été celui qui, en physiologie, a exprimé, analysé des Théories, on peut dire qu'il fut aussi un grand spéculatif: idée sur la digestion, le métabolisme. On remarquera, p276, une rapide référence à Bacon que l'on va retrouver, bien sur quelques pages plus loin, sur l'idée d' *experimentm crucis*.

P 277, Duhem rappelle en quoi laisser la Théorie à la porte, en physique équivaut à renoncer à l'expérience: parmi les nombreux arguments examinés et développés dans les chapitres précédents, celui qu'il reprend plus en détail ici, est l'argument des deux instruments (p277). Un instrument (de physique) n'est qu'un dispositif théorique. En conséquence, fin page 277/début 278, on trouve cette idée selon laquelle le physicien est en quelque sorte en amont de la chaîne des autres savants (chimistes, biologistes; physiologistes, médecins...) en raison précisément de leur recours inévitable à des instruments d'observation et de mesure; instruments qui ne sont rien d'autre que de la théorie physique mise en œuvre, c'est-à-dire admise: "*ils admettent implicitement l'exactitude des théories qui justifient l'emploi de ces appareils*".

§2. UNE EXPERIENCE DE PHYSIQUE NE CONDAMNE PAS ISOLEMENT.

Voici, jusqu'à la page 285 un important et dense paragraphe. Il est construit avec rigueur.

-premier principe: l'exécution d'une expérience mobilise un ensemble de théories (ceci a été longuement vu aux chapitres précédents).

-Deux définitions qui distinguent les expériences de physique:

1-Les expériences d'application (p279): exemple « vous voulez allumer une lampe électrique à incandescence » (tout simplement la lampe banale qui éclaire). On mesure que la *fem* ne soit pas incompatible avec la résistance. En fait tout ce que vise ici Duhem concerne la physique appliquée: c'est tous les appareils, instruments, technologies qui appliquent des principes physiques. Logiquement, il ne s'agit que de la reconnaissance de la compatibilité des dispositifs avec les théories qui les ont suggérés. Ces expériences ne "regardent pas au dehors" et ne prétendent pas développer la théorie.

2-Les expériences d'épreuve (p279): celles-ci vont nourrir la réflexion de l'épistémologue. Ce sont des actions déterminées dont la fonction explicite et délibérée est de soumettre une théorie physique à l'épreuve; ce sont donc des moments critiques du développement de la physique.

Ces expériences et leur usage obéissent à un schéma logique rigoureux; c'est le mode exact du

raisonnement apagogique.

Première remarque: dans ce chapitre sur la valeur de l'expérience, on insistera sur le fait que la prééminence de la théorie sur l'expérience interdit la preuve expérimentale directe. A savoir: soit une théorie T et une conséquence nécessaire C susceptible d'être "mise en expérience". Donc "T implique C". Il est bien clair que "C vrai" n'entraîne pas "T vrai". Duhem va y revenir dans sa critique de l'induction.

Seconde remarque: deux notions fonctionnent ici ensemble: celle de raisonnement apagogique et celle d'*experimentum crucis*. La discussion sur le statut logiquement apagogique de l'expérience décidera de la possibilité ou non de l' *experimentum crucis*.

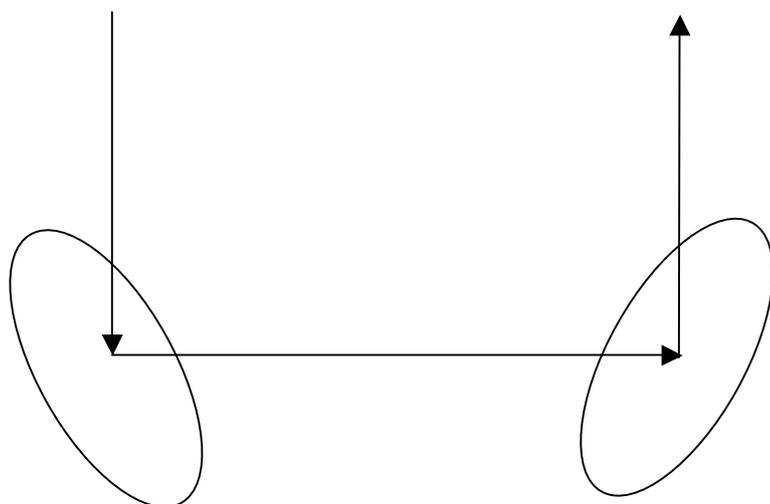
Un physicien conteste telle loi ; comment justifiera-t-il ses doutes?...De la proposition incriminée, il fera sortir la prévision d'un fait d'expérience...si le fait ne se produit pas (280).

Premier exemple : l'expérience-cadre (ou horizon, ou référence) de ces pages est celle de M.O.Wiener (1890) contre la théorie de la polarisation de F.E. Neumann.

Note sur la lumière polarisée:

Cette théorie se passe dans le cadre d'une représentation vibratoire de la lumière. Le rayon lumineux "naturel" vibre indifféremment dans tout le plan perpendiculaire au sens du déplacement; toutes les directions de ce plan sont équivalentes. La polarisation est une propriété des ondes vectorielles (lumineuses et électromagnétiques notamment ; cette propriété décrit l'orientation de leurs oscillations). On sait que la réflexion sur certains matériaux modifie sa polarisation (l'orientation de ses vibrations).





En lumière polarisée -après une certaine réflexion dans un plan polarisateur M- le rayon E reste parallèle à une certaine direction fixe: le rayon II' polarisé n'est plus indépendant de l'orientation du miroir. L'interprétation est que la réflexion arrête une composante de E et modifie l'intensité de l'autre composante.

L'hypothèse de Neumann est que la vibration du rayon polarisé est parallèle au plan de polarisation. Wiener a réalisé une expérience pour contredire cette hypothèse. Le raisonnement à la base de cette expérience est celui-ci: si l'hypothèse est valable, alors des franges d'un certain type se formeront après double polarisation. Si ces franges n'apparaissent pas, l'hypothèse est fautive (p280).

Les franges ne sont pas apparues, Wiener en a conclu que la théorie de Neumann était fautive.

Etait-il fondé à l'affirmer ? D'ailleurs, en 1891, Poincaré a indiqué une conclusion différente.

« Aussi, tout en contestant la valeur démonstrative absolue des arguments présentés à 'appui de la théorie de Fresnel, M. Poincaré reconnaît qu'elle est plus simple et plus satisfaisante ». (M.A. Potier, *Expériences de Wiener*, Archives du Journal de Physique, 1891).

Passage de grande importance de la *TP*.

Un pareil mode de démonstration ... sujette à caution.

Un physicien se propose de démontrer l'inexactitude d'une proposition ; pour déduire de cette proposition la prévision d'un phénomène, pour instituer l'expérience qui doit montrer si ce phénomène se produit ou ne se produit pas, pour interpréter les résultats de cette expérience et constater que le phénomène prévu ne s'est pas produit, il ne se borne pas à faire usage de la proposition en litige ; il emploie encore tout un ensemble de théories, admises par lui sans conteste ; la prévision du phénomène dont la non- production doit trancher le débat ne découle pas de la proposition litigieuse prise isolément, mais de la proposition litigieuse jointe à tout cet ensemble de théories ; si le phénomène prévu ne se produit pas, ce n'est pas la proposition litigieuse seule qui est mise en défaut, c'est tout l'échafaudage théorique dont le physicien a fait usage ; la seule chose que nous apprenne l'expérience, c'est que, parmi toutes les

propositions qui ont servi à prévoir ce phénomène et à constater qu'il ne se produisait pas, il y a au moins une erreur ; mais où gît cette erreur, c'est ce qu'elle ne nous dit pas. Le physicien déclare-t-il que cette erreur est précisément contenue dans la proposition qu'il voulait réfuter et non pas ailleurs ? C'est qu'il admet implicitement l'exactitude de toutes les autres propositions dont il a fait usage ; tant vaut cette confiance, tant vaut sa conclusion. ". (pp280-281).
(p.280-281)

En "géométrie", le schéma apagogique est formellement exact: "*la réduction à l'absurde est irréfutable et usuelle aux géomètres*" (p280).

Il faut montrer "non P"

Supposons "P"; soit "P implique Q" et soit "non Q" Conclusion: "non P".

En physique on ne met pas en œuvre seulement P, mais un ensemble de propriétés du type: $P \wedge \{p_i\}$ dans lequel, chaque p_i est une hypothèse annexe. Les p_i sont des propositions théoriques annexes associées aux instruments, aux hypothèses secondaires, aux traductions symboliques etc.

De ceci, $P \wedge \{p_i\}$, on déduit, non pas Q mais un ensemble de résultats du type $Q \wedge \{q_i\}$ et ce n'est pas Q qui est nié mais bien $Q \wedge \{q_i\}$. Or, pour que $Q \wedge \{q_i\}$ soit faux, il suffit qu'une seule des propositions qui le constitue le soit. Et surtout la fausseté de $Q \wedge \{q_i\}$ n'entraîne pas celle de P, mais celle de $P \wedge \{p_i\}$, c'est-à-dire, éventuellement celle de l'une seulement des hypothèses, soit P, soit l'un des p_i .

Soient donc :

H : la vibration polarisée parallèle au plan de polarisation et

h_1 lumière comme vibration périodique simple

h_2 vibrations normales au rayon

h_3 force vive moyenne de la vibration mesure l'intensité lumineuse

h_4 corrélation intensité et attaque de la pellicule

et bien d'autres...

On peut fort bien, comme l'a montré M. H. Poincaré, arracher l'hypothèse de Neumann aux prises de l'expérience de M. O. Wiener, mais à la condition de lui abandonner en échange l'hypothèse qui prend la force vive moyenne du mouvement vibratoire pour mesure de l'intensité lumineuse ; on peut, sans être contredit par l'expérience, laisser la vibration parallèle au plan de polarisation, pourvu qu'on mesure l'intensité lumineuse par l'énergie potentielle moyenne du milieu que déforme le mouvement vibratoire. (282)

Ceci est d'extrême importance car ces considérations justifient l'argument d'impossibilité de l'*experimentum crucis* qui va être développé plus loin.

Second exemple

Aux pages 282-4, un second exemple du même type logique est présenté; il va être l'occasion de remplacer la notion d'hypothèse isolée par celle de système constitué autour d'une hypothèse.

C'est très exactement le remplacement de P par $P \wedge \{p_i\}$.

Ici, P : hypothèse émissionniste de la lumière par Newton (p.282-284)

Q : l'indice de réfraction $n = \sin_i/\sin_r$ vérifie $n = v_r/v_i$ avec son corollaire:

lumière plus rapide dans l'eau que dans l'air.

Remarque, la déduction newtonienne est elle-même très discutable et très discutée par des auteurs contemporains (Fermat, Leibniz...).

Arago imagine une *experimentum crucis* permettant de comparer la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air. Foucault la réalise et obtient donc "non Q".

Alors dit Duhem, ce n'est pas P qui est réfuté, ce n'est pas l'hypothèse émissionniste prise isolément, mais le *système de l'émission* : voir détail pp283-5.

On sait que Newton imaginé une théorie des phénomènes optiques, la théorie de l'émission. La théorie de l'émission suppose la lumière formée de projectiles excessivement ténus, lancés avec une extrême vitesse par le Soleil et les autres sources lumineuses ; ces projectiles pénètrent tous les corps transparents de la part des diverses portions des milieux au sein desquels ils se meuvent, ils subissent des actions attractives ou répulsives ; très puissantes lorsque la distance qui sépare les particules agissantes est toute petite, ces actions s'évanouissent lorsque les masses entre lesquelles elles s'exercent s'écartent sensiblement. Ces hypothèses essentielles, jointes à plusieurs autres que nous passons sous silence, conduisent à formuler une théorie complète de la réflexion et de la réfraction de la lumière ; en particulier, elles entraînent cette conséquence : L'indice de réfraction de la lumière passant d'un milieu dans un autre est égal à la vitesse du projectile lumineux au sein du milieu où il pénètre, divisée par la vitesse du même projectile au sein du milieu qu'il abandonne. C'est cette conséquence qu'Arago a choisie pour mettre la théorie de l'émission en contradiction avec les faits ; de cette proposition, en effet, découle cette autre : la lumière marche plus vite dans l'eau que dans l'air ; or, Arago avait indiqué un procédé propre à comparer la vitesse de la lumière dans l'air à la vitesse de la lumière dans l'eau ; le procédé, il est vrai, était inapplicable, mais Foucault modifia l'expérience de telle manière qu'elle pût être exécutée, et il l'exécuta ; il trouva que la lumière se propageait moins vite dans l'eau que dans l'air ; on en peut conclure, avec Foucault, que le système de l'émission est incompatible avec les faits.

Je dis le système de l'émission et non l'hypothèse de l'émission ; en effet, ce que l'expérience déclare entaché d'erreur, c'est tout l'ensemble des propositions admises par Newton, et, après lui, par Laplace et par Biot ; c'est la théorie tout entière dont se déduit la relation entre l'indice de réfraction et la vitesse de la lumière dans les divers milieux ; mais en condamnant en bloc ce système, en déclarant qu'il est entaché d'erreur, l'expérience ne nous dit pas on gît cette erreur ; est-ce dans l'hypothèse fondamentale que la lumière consiste en

projectiles lancés avec une grande vitesse par les corps lumineux ? Est-ce en quelque autre supposition touchant les actions que les corpuscules lumineux subissent de la part des milieux au sein desquels ils se meuvent ? Nous n'en savons rien. Il serait téméraire de croire, comme Arago semble l'avoir pensé, que l'expérience de Foucault condamne sans retour l'hypothèse même de l'émission, l'assimilation d'un rayon de lumière à une rafale de projectiles ; si les physiciens eussent attaché quelque prix à ce labeur, ils fussent sans doute parvenus à fonder sur cette supposition un système optique qui s'accordât avec l'expérience de Foucault.

De tout ceci Duhem tire l'idée de la physique comme organique, comme ensemble de systèmes hypothétiques dépendants les uns des autres:

Voici une expression de la thèse dite holiste, ou « Duhem-Quine »

la Physique n'est pas une machine qui se laisse démonter ; on ne peut pas essayer chaque pièce isolément et attendre, pour l'ajuster, que la solidité en ait été minutieusement contrôlée ; la science physique, c'est un système que l'on doit prendre tout entier ; c'est un organisme dont on ne peut faire fonctionner une partie sans que les parties les plus éloignées de celle-là entrent en jeu, les unes plus, les autres moins, toutes à quelque degré ; si quelque gêne, quelque malaise se révèle, dans ce fonctionnement, c'est par l'effet produit sur le système tout entier que le physicien devra deviner l'organe qui a besoin d'être redressé ou modifié, sans qu'il lui soit possible d'isoler cet organe et de l'examiner à part. (pp284-5).

Autre exemple : celui des trajectoires de Locher.

§3. L'*EXPERIMENTUM CRUCIS* EST IMPOSSIBLE EN PHYSIQUE*

C'est un des acquis principaux de l'épistémologie duhémienne, en faveur duquel bien des arguments ont été donnés. Ces pages sont comme une conclusion nécessaire des arguments précédents.

Rendant à César, ce qui lui revient, Duhem cite Bacon et le *Novum Organum*: Bacon met au quatorzième rang des "faits privilégiés" les *exemples de la croix (instantia crucis)*. Il consiste, lorsque l'esprit est en suspend entre deux causes, à trouver un cas qui élimine l'une d'entre elles. "*par généralisation, dit le Lalande, toute expérience décisive pour ou contre une hypothèse: expérience de Pascal sur le Puy de Dôme; de Fresnel et Arago prouvant que la vibration de la lumière est transversale par le fait que les rayons polarisés à angle droit n'interfèrent pas, etc.*"

PP286-7, Duhem reprend et prolonge l'exemple de la doctrine newtonienne de l'émission. La voici en concurrence avec la doctrine vibratoire.

Nous avons donc:

A-Emission (Newton, Laplace, Biot)

B-Vibration (Huygens, Young, Fresnel)

Il semble que la vérité ne puisse que A ou B; le champ du possible P est ainsi structuré:

$$P = A \cup B, \text{ avec } A \cap B = \emptyset$$

A entraîne (selon un dispositif expérimental) $v_e > v_a$

B entraîne $v_a > v_e$

L'expérience de Foucault (vers 1850?) montre que $v_a > v_e$

donc "non A", soit B. Comme dit le Larousse: "*C'était le dernier coup porté à l'émission*".

Duhem mène ainsi la critique (p 288):

1-Ce n'est pas entre A et B qu'il y a alternative éventuelle mais entre $A \wedge \{a_i\}$ et $B \wedge \{b_i\}$, entre un ensemble de type A et un ensemble de type B, qui peuvent peut-être interférer. N'est-il pas concevable que certaines hypothèses auxiliaires de type a_i soient aussi des b_i ? Autrement dit a-t-on certainement $A \cup \{U_i a_i\} \cap B \cup \{U_i b_i\} = \emptyset$?

2-Mais surtout, le champ du possible est-il certainement constitué par $A \cup B$ ou même par $(A \cup \{U_i a_i\}) \cup (B \cup \{U_i b_i\})$?

Rien, en théorie physique ne permet de l'affirmer.

Deux hypothèses sont en présence touchant la nature de la lumière ; pour Newton, pour Laplace, pour Biot, la lumière consiste en projectiles lancés avec une extrême vitesse ; pour Huygens, pour Young, pour Fresnel, la lumière consiste en vibrations dont les ondes se propagent au sein d'un éther ; ces deux hypothèses sont les seules dont on entrevoit la possibilité ; ou bien le mouvement est emporté par le corps qu'il anime et auquel il demeure lié, ou bien il passe d'un corps à un autre. Suivons la première hypothèse ; elle nous annonce que la lumière marche plus vite dans l'eau que dans l'air ; suivons la seconde ; elle nous annonce que la lumière marche plus vite dans l'air que dans l'eau. Montons l'appareil de Foucault ; mettons en mouvement le miroir tournant ; sous nos yeux, deux taches lumineuses vont se former, l'une incolore, l'autre verdâtre. La bande verdâtre est-elle à gauche de la bande incolore ? C'est que la lumière marche plus vite dans l'eau que dans l'air, c'est que l'hypothèse des ondulations est fautive. La bande verdâtre, au contraire, est-elle à droite de la bande incolore ? C'est que la lumière marche plus vite dans l'air que dans l'eau, c'est que l'hypothèse des ondulations est condamnée. Nous plaçons l'œil derrière la loupe qui sert à examiner les deux taches lumineuses, nous constatons que la tache verdâtre est à droite de la tache incolore ; le débat est jugé ; la lumière n'est pas un corps ; c'est un mouvement vibratoire propagé par l'éther ; l'hypothèse de l'émission a vécu ; l'hypothèse des ondulations ne peut être mise en doute ; l'expérience cruciale en a fait un nouvel article du Credo scientifique.

Ce que nous avons dit au paragraphe précédent montre combien on se tromperait en attribuant à l'expérience de Foucault une signification aussi simple et une portée aussi décisive ; ce n'est pas entre deux hypothèses, l'hypothèse de l'émission et l'hypothèse des ondulations, que tranche l'expérience de Foucault ; c'est entre deux ensembles théoriques dont chacun doit être pris en bloc, entre deux systèmes complets, l'Optique de Newton et l'optique d'Huygens.

Mais admettons, pour un instant, que, dans chacun de ces systèmes, tout soit forcé, tout soit nécessaire de nécessité logique, sauf une seule hypothèse ; admettons, par conséquent, que les faits, en condamnant l'un des deux systèmes, condamnent à coup sûr la seule supposition douteuse qu'il renferme. En résulte-t-il qu'on puisse trouver dans l'experimentum crucis un procédé irréfutable pour transformer en vérité démontrée l'une des deux hypothèses en présence, de même que la réduction à l'absurde d'une proposition géométrique confère la

certitude à la proposition contradictoire ? Entre deux théorèmes de Géométrie qui sont contradictoires entre eux, il n'y a pas place pour un troisième jugement ; si l'un est faux, l'autre est nécessairement vrai. Deux hypothèses de Physique constituent-elles jamais un dilemme aussi rigoureux ? Oserons-nous jamais affirmer qu'aucune autre hypothèse n'est imaginable ? La lumière peut être une rafale de projectiles ; elle peut être un mouvement vibratoire dont un milieu élastique propage les ondes ; lui est-il interdit d'être quoi que ce soit d'autre ? Arago le pensait sans doute, lorsqu'il formulait cette tranchante alternative : La lumière se meut-elle plus vite dans l'eau que dans l'air ? " La lumière est un corps. Le contraire a-t-il lieu ? La lumière est une ondulation." Mais il nous serait difficile de nous exprimer sous une forme aussi décisive ; Maxwell, en effet, nous a montré qu'on pouvait tout aussi bien attribuer la lumière à une perturbation électrique périodique qui se propagerait au sein d'un milieu diélectrique.

La contradiction expérimentale n'a pas, comme la réduction à l'absurde employée par les géomètres, le pouvoir de transformer une hypothèse physique en une vérité incontestable ; pour le lui conférer, il faudrait énumérer complètement les diverses hypothèses auxquelles un groupe déterminé de phénomènes peut donner lieu ; or, le physicien n'est jamais sûr d'avoir épuisé toutes les suppositions imaginables ; la vérité d'une théorie physique ne se décide pas à croix ou pile. (286-289)

Comment sauver une théorie contredite ?

Imre Lakatos *Histoire et méthodologie des sciences*, (1978) , PUF, 1994, p.14-15

L'histoire est celle, imaginaire, d'un écart de conduite planétaire. Un physicien d'avant Einstein calcule, à l'aide de la mécanique de Newton et de sa loi de gravitation N , et des conditions initiales I , la trajectoire d'une petite planète p que l'on vient de découvrir. Mais la planète dévie de sa trajectoire calculée. Notre physicien newtonien va-t-il considérer que cette déviation est proscrite par la théorie de Newton et, par conséquent, qu'une fois bien établie, elle réfute N ? Non. Il émet l'idée qu'il doit y avoir une planète p' encore inconnue qui perturbe la trajectoire de p . Il calcule la masse, l'orbite etc. de cette planète hypothétique, puis demande à un astronome de mettre à l'épreuve expérimentalement son hypothèse. La planète p' est si petite qu'aucun télescope, même le plus puissant, n'a aucune chance de l'observer : l'astronome demande des crédits pour construire un télescope plus grand. Il faut trois ans pour construire le nouveau télescope. Si l'on découvrait la nouvelle planète p' , ce serait salué comme une nouvelle victoire de la science newtonienne. Mais ce n'est pas le cas. Notre homme de science abandonne-t-il pour autant la théorie de Newton et son idée de planète perturbatrice ? Non, il avance l'idée qu'un nuage de poussière cosmique nous cache la planète. Il calcule l'emplacement et les propriétés de ce nuage et demande des crédits pour envoyer un satellite mettre ses calculs à l'épreuve. Si les instruments du satellite (ce sont peut-être des instruments nouveaux, fondés sur une théorie encore peu mise à l'épreuve) enregistreraient l'existence du nuage conjecturé, ce résultat serait salué comme une victoire éclatante de la science newtonienne. Mais on ne découvre pas le nuage en question. Notre homme abandonne-t-il la théorie de Newton, en même temps que l'idée de la planète perturbatrice et celle du nuage qui la dissimule ? Pas du tout, il suggère l'existence dans cette région de l'univers d'un champ magnétique qui perturbe le fonctionnement des instruments du satellite. Un satellite nouveau est envoyé. Si on découvrait le champ magnétique, les newtoniens fêteraient une victoire sensationnelle. Mais ce n'est pas le cas. Est-ce considéré comme une réfutation de la science newtonienne ? Non. Ou bien une autre hypothèse auxiliaire ingénieuse est avancée..., ou bien toute l'histoire est enterrée sous la poussière des revues scientifiques et on n'en entend plus parler.

Note: allusion à Le Verrier et l'irrégularité de Uranus, avec prévision de l'existence de Neptune, découverte en 1846.

§ IV- CRITIQUE DE LA METHODE NEWTONIENNE-1^{ER} EXEMPLE.

L'application en physique du schéma "par l'absurde" ayant été critiquée, Duhem va explorer le statut de la démonstration directe.

Remarque: "*la démonstration directe lui (au géomètre) paraît le plus parfait des raisonnements*". Voilà qui est curieux car c'est une tradition non-logiciste, non formaliste des mathématiques qui s'exprime ici.

Page 289, Duhem nous présente le schéma Newtonien-inductif "idéal":

-Les conclusions physiques découlent d'hypothèses

-Ces hypothèses n'en sont pas vraiment puisqu'au contraire d'être formelles et conventionnelles, elles sont "*éprouvées une à une*" comme certaines.

-Cette certitude des "hypothèses" serait issue de l'induction. Ce qu'il va discuter est l'applicabilité de ce mode inductif aux faits scientifiques.

Remarque sur l'induction: le sens classique de l'induction est celui-ci: une opération mentale qui consiste à remonter d'un certain nombre de propositions données, généralement singulières, propositions que l'on nomme *inductrices*, à une proposition ou un petit nombre de propositions plus générales, appelées *induites*, telles qu'elles impliquent toutes les propositions inductrices.

On observera donc -et ceci est classique- qu'il y a dans la méthode inductive un caractère de connaissance probable puisqu'il est question d'inférer, à partir d'observations constantes, une propriété qui va au delà des observations effectuées. Au fond, il s'agit de passer de la proposition de type: "tous les x que nous avons rencontrés sont P" à "tous les x sont P"

C'est ce dont discute Poincaré qui écrit dans *La science et l'hypothèse*:

"La méthode des sciences physique repose sur l'induction qui nous fait attendre la répétition d'un phénomène quand se reproduisent les circonstances où il avait une fois pris naissance. Si toutes ces circonstances pouvaient se reproduire à la fois, ce principe pourrait être appliqué sans crainte: mais cela n'arrivera jamais; quelques unes de ces circonstances feront toujours défaut. Sommes-nous absolument sûrs qu'elles sont sans importance? Evidemment non. Cela pourra être vraisemblable, cela ne pourra être rigoureusement certain. De là le rôle considérable que joue dans les sciences physiques la notion de probabilité"¹⁴

Il ne s'agit pas, pour Duhem de déclarer invalide le procédé inductif; au contraire, il est éminemment fonctionnel, par exemple dans les lois du sens commun, comme celle-ci, obtenue par induction: "*après le tonnerre, il y a l'éclair*". Ce qu'il va discuter est l'applicabilité de ce mode aux faits scientifiques.

¹⁴Poincaré, *La Sc. et l'Hyp.* Préface, champs, Flammarion pp 26-7

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Il n'y aurait donc pas "à l'origine de la théorie physique", selon la "méthode newtonienne, de principes hypothétiques *"hypothesis non fingo"*. Il y aurait des données inductrices, par régression, puis généralisation, on pourrait en extraire des principes abstraits, de ces principes découlerait les ensembles de lois de la physique.

Remarque: le texte canonique newtonien sur cette question est son *Scholium generale* de la fin des *Principia*.

1^{ER} EXEMPLE. LA MECANIQUE CELESTE

Le schéma serait celui-ci: des propositions inductrices képlériennes, il aurait tiré, par inductions successives d'abord qu'il existe -une planète étant considérée- une force dirigée vers le soleil, (pp290-1)

puis que F est de la forme k/d^2

puis que F est de la forme $k'.m/d^2$

Et enfin, par induction et en généralisant à tout couple de corps matériels: $F = k.mm'/d^2$.

Remarque : bonne présentation de cette vision des choses dans l'article de Lalande « lois de Kepler » de *l'Enc. Méth.*

Pour Duhem, ceci n'est tout simplement pas possible, c'est une sorte de fable reconstituée a posteriori.

Voici la démonstration de Duhem. D'abord, la description d'une force (direction et intensité) n'a de sens que dans un repère déterminé (« un terme auquel on rapporte le mouvement des corps »).

Énoncé 1: Dans un repère-soleil, $F_{\text{planète}} = k.m/d^2$ et Force subie par le soleil nulle. "*Si le soleil est le terme...force*" (p292, haut).

Énoncé 2: Dans un repère-planète, $F_s = k.m/d^2$ et force subie par planète nulle. "*Si l'on prend...satellite*" (p292, bas)

Énoncé 3: Principe de l'attraction universelle. $F = k.mm'/d^2$, avec force mutuelle sur les deux corps.

Donc, de 1 et 2, Newton prétend inférer 3. Or non seulement 3 ne généralise pas 1 et 2, mais il est contradictoire avec eux. Ainsi, si le physicien admet 3, ses calculs déduits ne confirment pas 1, ni 2. (pp293-4)

Ce principe de la gravitation universelle est-il une simple généralisation des deux énoncés qu'ont fournis les lois de Kepler et leur extension aux mouvements des satellites ? L'induction peut-elle le tirer de ces deux énoncés ? Nullement En effet, il n'est pas seulement plus général que ces deux énoncés ; il ne leur est pas seulement hétérogène ; il est en contradiction avec eux. S'il admet le principe de l'attraction universelle, le mécanicien peut calculer la grandeur et la direction des

forces qui sollicitent les diverses planètes et le Soleil lorsqu'on prend ce dernier pour terme de comparaison, et il trouve que ces forces ne sont point telles que l'exigerait notre premier énoncé. Il peut déterminer la grandeur et la direction de chacune des forces qui sollicitent Jupiter et ses satellites lorsqu'on rapporte tous les mouvements à la planète, supposée immobile, et il constate que ces forces ne sont point telles que l'exigerait notre second énoncé.

Bien loin, donc, que le principe de la gravité universelle puisse se tirer, par la généralisation et l'induction, des lois d'observation que Kepler a formulées, il contredit formellement à ces lois. Si la théorie de Newton est exacte, les lois de Kepler sont nécessairement fausses.

Il est exact qu'il y a désaccord. Résumons la justification de cette contradiction. Lorsque l'on considère deux corps -par exemple deux planètes- on doit, pour appliquer les équations de la dynamique, les considérer dans un "repère absolu" (construction imaginaire de la géométrie spatiale). Alors, les forces, actions et trajectoires sont décrites par rapport au centre de gravité commun à ces deux corps.

Bien entendu, dans le cas Soleil/terre, la masse de celui-là est telle par rapport à celle de la terre que le centre de gravité commun est pratiquement confondu avec le centre du soleil; de même dans un système Planète/satellite.

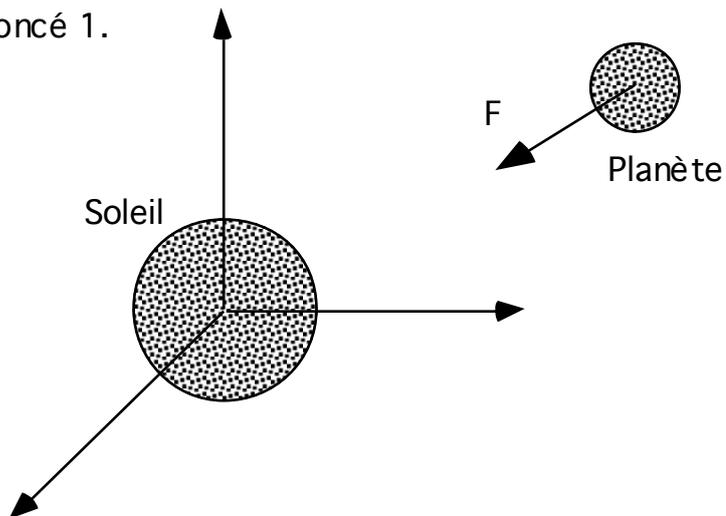
Si l'on ajoute à cela que le système Planète/satellite interagit avec le soleil, on comprendra les distorsions, faibles mais réelles entre les calculs newtoniens et les énoncés "képlériens"¹⁵.

Que s'est-il donc passé? Il n'y a pas eu d'induction, de généralisation légitime. Le passage des données Keplero-tychoniennes aux principes newtoniens a eu lieu parce qu'un certain processus de transcription symbolique, accompagné d'un choix théorique abstrait a été opéré: "*Sans doute...Dynamique*" (p295). On a perdu les planètes réelles, l'observation banale pour passer aux équations symboliques de la dynamique dont les objets sont des notions abstraites: masse, force, vitesse instantanée etc.

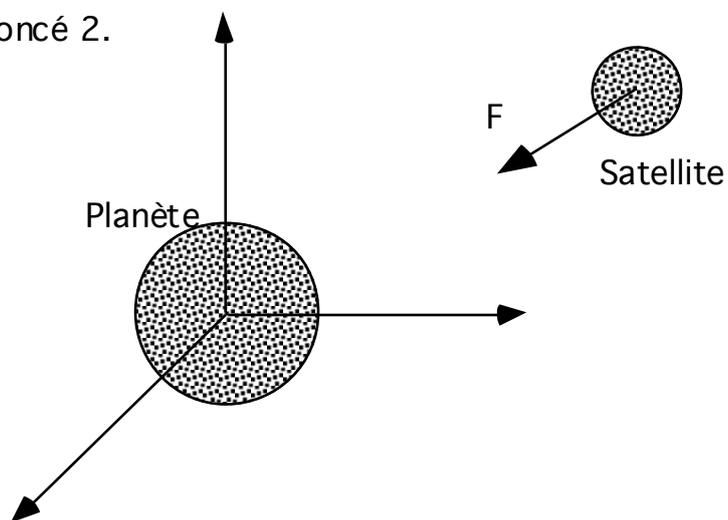
Toute expérience postérieure mettra en jeu tout un ensemble théorique imaginé par Newton et une certaine expérience d'Épreuve (ou expérience-couronnement) pourra valider la théorie choisie, c'est elle mentionnée par Duhem consistant à réussir l'observation d'une planète inconnue dont l'existence était rendue nécessaire par application de la théorie newtonienne à la marche d'Uranus: Neptune.

¹⁵ Voir article de Blay et Barthélémy, *Les changements de repères chez Newton*, in Archives Internationales d'Histoire des Sciences, 1992, vol.34.

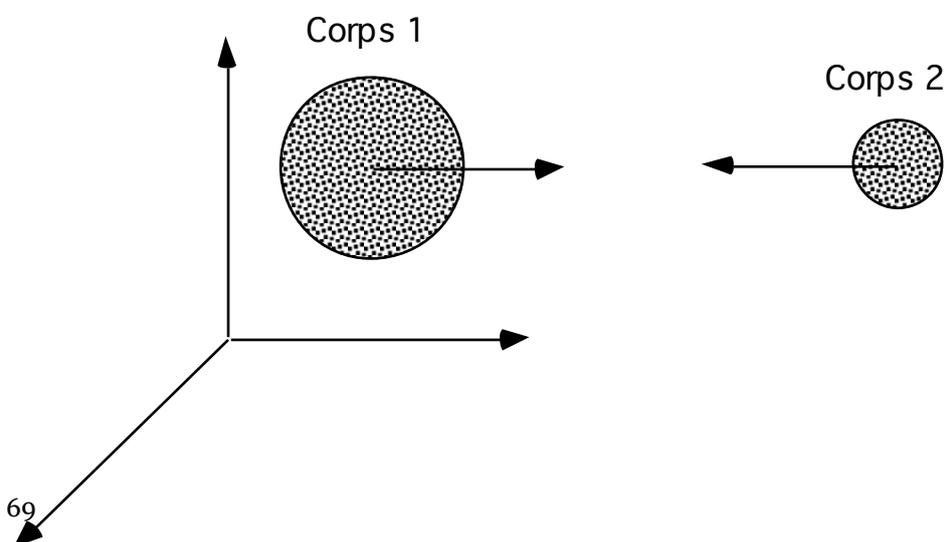
Enoncé 1.



Enoncé 2.



Enoncé 3.



Note importante : Kepler a tiré ses lois des observations de Tycho. Elles étaient des lois approchées, un choix possible. Mais, dit Duhem, « La dynamique permettait d'en donner une infinité de traductions symboliques différentes (le faisceau). Parmi ces formes diverses, en nombre infini, il en est une et une seule, qui s'accorde avec le principe de Newton. Les observations de Tycho Brahe permettent au théoricien de choisir cette forme ; mais elles ne l'y contraignent pas ; elles lui auraient permis d'en choisir une infinité d'autres ». (p. 296)

On peut songer à la proposition de Clairaut d'en choisir une autre.

§ IV- CRITIQUE DE LA METHODE NEWTONIENNE-SECOND EXEMPLE:
L'ELECTRODYNAMIQUE.

Ampère (1775-1836) est un théoricien qui se veut fidèle à la méthode newtonienne d'induction expérimentale. Duhem fait de longues citations de cette profession de foi inductive (p297).

Note sur l'électrodynamique d'Ampère :

Elle vise à élaborer une théorie *complète* des interactions électriques et magnétiques. Les travaux de André-Marie Ampère, commencés en 1820 et achevés en 1827, fournissent un cadre satisfaisant pendant le demi-siècle qui suivit ; ce qui est considérable et remarquable, si l'on songe aux innombrables idées, expériences, phénomènes nouveaux, appareillages et mesures sans cesse plus précis, advenus dans cet intervalle. La théorie d'Ampère est vaste, mathématiquement très élégante et performante ; elle rassemble sous quelques notions générales de nombreux faits d'apparence fort différente, bref, c'est une magnifique théorie physique, si réussie que l'on ne tarda pas à surnommer Ampère, le « Newton de l'électricité ». Il commence ses premiers exposés à l'Académie en 1820 en proposant d'abord la loi d'interaction des éléments de courants électriques. L'action mutuelle entre un courant électrique et un aimant, ainsi que celle de deux aimants se rangent sous la loi d'interaction des courants. Comment expliquer une si grande proximité entre l'électricité et le magnétisme ? Sous l'influence de Fresnel, Ampère élabore la théorie du magnétisme des aimants en imaginant qu'il résulte de l'action de micro-courants circulant autour de chacune de leurs particules. Ampère donne en 1827 un traité magistral qui fait la synthèse de ses découvertes, la *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience*. Des historiens des sciences ont sévèrement critiqué cet intitulé, récusant la possibilité même que les idées et les théories d'Ampère aient pu « découler comme naturellement ou nécessairement » de l'expérience. Ils ont montré que des idées abstraites et générales, que des choix souvent assez libres (notamment dans sa manière de mathématiser les choses) avaient guidé Ampère tout autant que ses expériences, aussi remarquables qu'eussent été ces dernières.

Un problème général posé à Ampère et à tous ses collègues est le suivant : presque tous aiment et admirent la théorie newtonienne de l'attraction des corps : deux corps exercent l'un sur l'autre une force agissant dans la direction déterminée par ces deux corps. Ils aimeraient que les « nouvelles » forces (produites par les courants et les aimants) se comportent de même, ce qui contribuerait à l'unité de la physique, but et horizon quasi permanent des savants. Or, il n'en est

rien, les forces créées par un élément de courant sur un aimant ou par un aimant sur un élément de courant n'agissent pas selon cette direction, mais transversalement. Les faits demeurent têtus ! Il allait falloir inventer et développer la notion de *champ* électrique, de *champ* magnétique et finalement de *champ* électromagnétique, pour rendre compte des lignes de forces qui représentent les directions d'action des forces, un peu comme des tourbillons créés autour du fil ou autour de l'aimant.

Les grandes lignes de la critique duhémienne sont les mêmes que dans le paragraphe précédent. Il en ressort qu'Ampère n'a pas pu tirer d'expériences les grandes propositions fondamentales de sa théorie. La critique des expériences d'Ampère est largement explicitée par des citations de Wilhem Weber (1848): "*Ampère a tenu... Ampère*" (pp300-1)

On peut d'ailleurs lire dans un cours contemporain d'électricité une confirmation du jugement duhémien :

"Ceci conduisit Ampère à émettre l'hypothèse qu'une substance magnétique contient des courants électriques permanents...Ampère donna une formulation mathématique élégante et complète de l'interaction des courants stationnaires et de l'équivalence de la matière aimantée avec un système de courants permanents (vers 1830). Sa brillante hypothèse concernant la nature réelle du magnétisme du fer allait attendre un siècle environ pour trouver une confirmation"¹⁶.

Faraday, en 1831 indique d'ailleurs:

"Qu'on adoptât la belle théorie d'Ampère, ou n'importe quelle autre..."¹⁷

C'est ce que considère Duhem lorsqu'il écrit que

"Des expériences aussi peu précises laissent au physicien le soin de choisir entre une infinité de traductions symboliques également possibles...seule l'intuition, qui devine la forme de la théorie à établir, dirige ce choix...divination" (p301 fin).

A nouveau, c'est un dispositif expérimental d'épreuve qui valide le choix théorique. En l'occurrence, celui mis au point par Weber.

Les leçons de cette critique de la conception inductive expérimentale sont résumées par Duhem, pp303-4.

Retenons particulièrement celle-ci: pour Duhem, il n'y a pas d'expérience isolée qui vaille, et même il n'y a pas d'expérience physique qui soit une expérience isolée. Si un dispositif expérimental est mis en œuvre, il mobilise un ensemble théorique forcément très vaste et un ensemble de traductions symboliques également vaste.

Passage de Duhem :

Personne, après Newton, n'a, plus nettement qu'Ampère, déclaré que toute théorie physique se devait tirer de l'expérience par la seule induction ; aucune œuvre ne s'est plus exactement moulée sur les *Philosophiæ naturalis Principia*

¹⁶Cours de Physique de Berkeley, vol.2, p173

¹⁷Faraday, Experimental researches in Electricity, Londres, 1839.

mathematica que la *Théorie mathématique des Phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*.

Ampère commence l'exposé de sa *Théorie mathématique* ... en ces termes :

" Newton fut loin de penser " que la loi de la pesanteur universelle " pût être inventée en partant de considérations abstraites plus ou moins plausibles. Il établit qu'elle devait être déduite des faits observés, ou plutôt de ces lois empiriques qui, comme celles de Kepler, ne sont que des résultats généralisés d'un grand nombre de faits. "

« Observer d'abord les faits, en varier les circonstances autant qu'il est possible, accompagner ce premier travail de mesures précises pour en déduire des lois générales, uniquement fondées sur l'expérience, et déduire de ces lois, indépendamment de toute hypothèse sur la nature des forces qui produisent les phénomènes la valeur mathématique de ces forces, c'est-à-dire la formule qui les représente, telle est la marche qu'a suivie Newton. Elle a été, en général, adoptée en France, par les savants auxquels la Physique doit les immenses progrès qu'elle a faits dans ces derniers temps, et c'est elle qui m'a servi de guide dans toutes mes recherches sur les phénomènes électrodynamiques. J'ai consulté uniquement l'expérience pour établir les lois de ces phénomènes, et j'en ai déduit la formule qui peut seule représenter les forces auxquelles ils sont dus ; je n'ai fait aucune recherche sur la cause même qu'on peut assigner à ces forces, bien convaincu que toute recherche de ce genre doit être précédée de la connaissance purement expérimentale des lois et de la détermination, uniquement déduite de ces lois, de la valeur de la force élémentaire "

Il n'est pas besoin d'une critique bien attentive ni bien perspicace pour reconnaître que la *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques* ne procède nullement suivant la méthode qu'Ampère lui assigne, qu'elle n'est pas uniquement déduite de l'expérience. Les faits d'expérience, pris dans leur brutalité native, ne sauraient servir au raisonnement mathématique ; pour alimenter ce raisonnement, ils doivent être transformés et mis sous forme symbolique. Cette transformation, Ampère la leur fait subir. ... Il ne se contente pas, non plus, d'user de la notion de force, empruntée à la Mécanique, et des divers théorèmes qui constituent cette science ; à l'époque où il écrit, ces théorèmes peuvent être considérés comme hors de contestation. *Il fait appel, en outre, à tout un ensemble d'hypothèses entièrement nouvelles, entièrement gratuites, parfois même quelque peu surprenantes.* Au premier rang de ces hypothèses, il convient de mentionner l'opération intellectuelle par laquelle il décompose en éléments infiniment petits le courant électrique qui, en réalité, ne peut être brisé sans cesser d'être ; puis la supposition que toutes les actions électrodynamiques réelles se résolvent en actions fictives, sollicitant les paires que les éléments de courant forment deux à deux ; puis le postulat que les actions mutuelles de deux éléments se réduisent à deux forces appliquées aux éléments, dirigées suivant la droite qui les joint, égales entre elles et directement opposées ; puis, cet autre postulat que la distance de deux éléments entre simplement dans la formule de leur action mutuelle par l'inverse d'une certaine puissance.

Ces diverses suppositions sont si peu évidentes, si peu forcées (au sens de nécessaires), que plusieurs d'entre elles ont été critiquées ou rejetées par des successeurs d'Ampère ; d'autres hypothèses, également propres à traduire symboliquement les expériences fondamentales de l'Électrodynamique, ont été proposées par d'autres physiciens ; mais nul d'entre eux n'est parvenu à donner cette traduction sans formuler aucun postulat nouveau, et il serait absurde d'y prétendre. La nécessité où se trouve le physicien de traduire symboliquement les faits d'expérience avant de les introduire dans ses raisonnements lui rend impraticable la voie purement inductive qu'Ampère a tracée ; cette voie lui est également interdite parce que chacune des lois observées n'est point exacte, mais simplement approchée. L'approximation des expériences d'Ampère est des plus grossières. Des faits observés il donne une traduction symbolique propre au

progrès de sa théorie ; mais combien il lui eût été facile de profiter de l'incertitude des observations pour en donner une traduction toute différente ! Écoutons Wilhelm Weber :¹⁸

" Ampère a tenu à indiquer expressément, dans le titre de son Mémoire, que sa théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques est uniquement déduite de l'expérience, et l'on y trouve, en effets exposée en détail, la méthode, aussi simple qu'ingénieuse, qui l'a conduit à son but. On y trouve, avec toute l'étendue et la précision désirable, l'exposé de ses expériences, les déductions qu'il en tire pour la théorie et la description des instruments qu'il emploie. Mais, dans des expériences fondamentales, comme celles dont il est question ici, il ne suffit pas d'indiquer le sens général d'une expérience, de décrire les instruments qui ont servi à l'exécuter et de dire, d'une manière générale, qu'elle a donné le résultat qu'on en attendait ; il est indispensable d'entrer dans les détails de l'expérience elle-même, de dire combien de fois elle a été répétée, comment on en a modifié les conditions et quel a été l'effet de ces modifications ; en un mot, de livrer une espèce de procès-verbal de toutes les circonstances permettant au lecteur d'asseoir un jugement sur le degré de sûreté et de certitude du résultat. Ampère ne donne point ces détails précis sur ses expériences, et la démonstration de la loi fondamentale de l'électrodynamique attend encore ce complément indispensable. Le fait de l'attraction mutuelle de deux fils conducteurs a été vérifié maintes et maintes fois et est hors de tout conteste ; mais ces vérifications ont toujours été faites dans des conditions et avec des moyens tels qu'aucune mesure quantitative n'était possible, et il s'en faut que ces mesures aient jamais atteint le degré de précision qui était nécessaire pour qu'on pût considérer la loi de ces phénomènes comme démontrée. ...

Des expériences aussi peu précises laissent au physicien le soin de choisir entre une infinité de traductions symboliques également possibles ; elles ne confèrent aucune certitude à un choix qu'elles n'imposent nullement ; seule, l'intuition, qui devine la forme de la théorie à établir, dirige ce choix. Ce rôle de l'intuition est particulièrement important dans l'œuvre d'Ampère ; il suffit de parcourir les écrits de ce grand géomètre pour reconnaître que sa formule fondamentale de l'Électrodynamique a été trouvée tout entière *par une sorte de divination* ; que les expériences invoquées par lui ont été imaginées après coup, et combinées tout exprès, afin qu'il put exposer selon la méthode newtonienne une théorie qu'il avait construite par une série de postulats.

Ampère avait d'ailleurs trop de candeur pour dissimuler bien savamment ce que son exposition entièrement déduite de l'expérience avait d'artificiel ; à la fin de sa *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques*, il écrit les lignes suivantes : " Je crois devoir observer, en finissant ce Mémoire, que je n'ai pas encore eu le temps de faire construire les instruments représentés dans la figure 4 de la planche première et dans la figure 20 de la seconde planche. Les expériences auxquelles ils sont destinés n'ont donc pas encore été faites. " Or, le premier des deux appareils dont il est ici question avait pour objet de réaliser le dernier des quatre cas d'équilibre fondamentaux qui sont comme les colonnes de l'édifice construit par Ampère ; c'est à l'aide de l'expérience à laquelle cet appareil était destiné que se devait déterminer la puissance de la distance selon laquelle procèdent les actions électrodynamiques. Bien loin donc que la théorie électrodynamique d'Ampère ait été entièrement déduite de l'expérience, l'expérience n'a eu qu'une part très faible à sa formation ; elle a été simplement l'occasion qui a éveillé l'intuition du physicien de génie, et cette intuition a fait le reste. C'est par les recherches de Wilhelm Weber que la théorie tout intuitive

¹⁸ (*) : * Wilhelm WEBER : *Elektrodynamische Maussbestimmungen*, Leipzig, 1846. -- Traduit dans la Collection de Mémoires relatifs à la Physique, publiés par la Société française de Physique ; tome III : Mémoires sur l'électrodynamique.

d'Ampère a été pour la première fois soumise à une comparaison minutieuse avec les faits ; mais cette comparaison n'a point été menée par la méthode newtonienne ; de la théorie d'Ampère prise dans son ensemble, Weber a déduit certains effets susceptibles d'être calculés ; les théorèmes de la Statique et de la Dynamique, voire même certaines propositions d'optique, lui ont permis d'imaginer un appareil, l'électrodynamomètre, par lequel ces mêmes effets peuvent être soumis à des mesures précises ; l'accord des prévisions du calcul avec les résultats des mesures ne confirme plus alors telle ou telle proposition isolée de la théorie d'Ampère, mais tout l'ensemble d'hypothèses électrodynamiques, mécaniques et optiques qu'il faut invoquer pour interpréter chacune des expériences de Weber.

Là donc où Newton avait échoué, Ampère, à son tour, et plus rudement encore, vient d'achopper. C'est que deux écueils inévitables rendent impraticable au physicien la voie purement inductive. En premier lieu, nulle loi expérimentale ne peut servir au théoricien avant d'avoir subi une interprétation qui la transforme en loi symbolique ; et cette interprétation implique l'adhésion à tout un ensemble de théories. En second lieu, aucune loi expérimentale n'est exacte ; elle est seulement approchée ; elle est donc susceptible d'une infinité de traductions symboliques distinctes ; et parmi toutes ces traductions, le physicien doit choisir celle qui fournira à la théorie une hypothèse féconde, sans que l'expérience guide aucunement son choix.

Cette critique de la méthode newtonienne nous ramène aux conclusions auxquelles nous avait déjà conduits la critique de la contradiction expérimentale et de l'*experimentum crucis*. Ces conclusions méritent de nous les formulons avec netteté. Les voici :

Chercher à séparer chacune des hypothèses de la Physique théorique des autres suppositions sur lesquelles repose celle science, afin de la soumettre isolément au contrôle de l'observation, c'est poursuivre une chimère ; car la réalisation et l'interprétation de n'importe quelle expérience de Physique impliquent l'adhésion à tout un ensemble de propositions théoriques. Le seul contrôle expérimental de la théorie physique qui ne soit pas illogique consiste à comparer le **SYSTÈME ENTIER DE LA THÉORIE PHYSIQUE À TOUT L'ENSEMBLE DES LOIS EXPÉRIMENTALES**, et à juger si celui-ci est représenté par celui-là d'une manière satisfaisante.¹⁹

§ VI. CONSEQUENCES RELATIVES A L'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE

§ VII CONSEQUENCES RELATIVES AU DEVELOPPEMENT DE LA THEORIE PHYSIQUE

Le titre du § peut sembler inapproprié: pp312-3, Duhem fait bien le point sur ceci: les matériaux de la T.P.sont de deux sortes:

- les symboles mathématiques représentatifs des quantités et des qualités du monde physique
- les postulats, c'est-à-dire les principes (exemple le principe de la conservation de l'énergie)

On remarque évidemment que les deux sortes de matériaux sont abstraites ou a priori: ne sont ni sensibles ni expérimentaux.

¹⁹ Duhem p.297-304

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Avec ceci, elle bâtit un **édifice logique** qui-en tant que tel-a ses contraintes et ses libertés:

-ses contraintes: Pour les symboles, ils doivent être compatibles avec des conditions d'existence, ou de possible représentativité (ex: pas de Température absolue négative; ou de masse variable –cf. relativité). Pour les postulats: compatibilité logique et non-contradiction.

-ses libertés; et c'est le plus important pour le § entier: à l'intérieur de ces contraintes, tout cheminement déductif est valable, est légitime. Ceci est affirmé sur un ton provocateur (p313): *"Au cours de son développement, une théorie physique est libre de choisir la voie qui lui plaît, pourvu qu'elle évite toute contradiction logique; en particulier, elle est libre de ne tenir aucun compte des faits d'expérience."*

Il y a là une des idées essentielles du chapitre:

Découpler la T.P -en tant qu'elle est en train de se développer- de tout contrôle expérimental, de toute évaluation réaliste. Pour admettre cette opinion radicale, il faut avoir à l'esprit que la théorie est *"Un système de propositions logiquement enchaînées et non pas une suite de modèles"* (p157) ou encore *«Un système de propositions mathématiques déduites»*(p24).

Je crois que ceci correspond à l'idée profonde chez Duhem que l'on ne sait pas -en réalité- ce qui se passe en physique, ce qu'il en est de la réalité. Que les expériences sont toujours trop vagues pour fournir ou justifier un raisonnement logique rigoureux; pour parler autrement, Duhem est bien convaincu que les causes efficientes restent cachées et que, ni modèles, ni dispositif expérimental ne peuvent les dévoiler. Par exemple, le calcul différentiel.

Aussi a-t-il bâti un système théorique symbolique qui a **gagné le droit** d'obéir à ses propres lois et exigences formelles.

Toutefois, l'épreuve des faits expérimentaux doit bien avoir lieu, le test, le contrôle, l'évaluation **physique doit advenir**. Duhem est clair (p313): *"Lorsque la théorie a atteint son entier développement. Lorsque l'édifice logique est parvenu au faite, il devient nécessaire de comparer l'ensemble des propositions mathématiques...à l'ensemble des faits d'expérience"*.

On compare deux ensembles :

Les prop. Mathématiques (les conclusions, pas les étapes intermédiaires) et les faits d'expérience

Ce passage inspire trois remarques:

1) Pourquoi cette comparaison devient-elle nécessaire? Parce que la Théorie physique peut et doit être appliquée (ceci concerne toutes les expériences d'application vues au chapitre précédent p279); aussi et surtout parce que la T.P. admet une certaine direction, elle est pourvue d'un certain horizon qui est la *Classification naturelle* en vertu de quoi il existe un sens, un progrès de la Théorie Physique. L'évaluation de la T.P. à un moment de son développement général est donc inévitable pour mesurer le chemin parcouru vers cette classification naturelle.

2) Cette comparaison finale décide de la valeur physique d'une théorie. On comprend notamment qu'une théorie, bien conduite, puisse cependant échouer à représenter convenablement l'ensemble des faits qui lui sont soumis. Elle sera alors logiquement valide et physiquement fausse (p313).

3) Un point sur lequel Duhem ne s'explique pas clairement est cependant celui-ci: comment sait-on qu'une "*Théorie a atteint son entier développement*"; qu'on en est "*aux conclusions*" ?

Il y a bien-on le sait depuis la première partie- la considération de la Théorie Physique, en général, (comme programme de connaissance de la nature) dont l'aboutissement est la classification naturelle. Cette-ci -on le sait aussi- est inaccessible et demeure à l'horizon. ce n'est pas d'elle qu'il s'agit. Il s'agit ici des conclusions d'une "zone théorique" délimitée: l'optique, la mécanique rationnelle, l'électromagnétisme etc. Il est difficile de ne pas considérer -et Duhem nous y incite depuis le début de son ouvrage- que les éventuelles conclusions d'un "discours sur l'optique" n'aient pas un caractère éminemment provisoire; où encore qu'un plein achèvement" de l'optique théorique ne soit lui aussi que momentanément.

Ce qui est important, pour Duhem est de soustraire les étapes intermédiaires à l'exigence du contrôle des faits. (p314) Il est net que par de telles déclarations radicales, Duhem rompt toutes les amarres avec l'empirisme. Les postulats et les méthodes déductives ne représentent même pas les faits ou expériences. Les déductions n'ont rien à voir avec la réalité; elles relèvent du formalisme algébrique. Les postulats de la théorie sont d'ailleurs établis par des intuitions formelles. "*La divination d'Ampère*"

Un point délicat:(pp314-5) On distinguera pour un symbole introduit, entre "avoir un sens" d'une part et "exprimer un fait réel et possible". Ainsi, le symbole T de la température ne peut être introduit sur \mathbb{R} tout entier, car il n'a pas de sens sur \mathbb{R}_- . Par contre, il peut être considéré en T.P., sur \mathbb{R}_+ , bien qu'au voisinage de zéro, il ne puisse rien représenter de réel ou même de possible.

Sur \mathbb{R}_- , la température absolue n'existe pas, et T ne symbolise rien

Sur \mathbb{R}_+ , elle existe, même si aux limites elle ne peut plus prétendre représenter de phénomène réel. Les formules qui l'emploient ne "fonctionnent" plus, même aux approximations près

La première réflexion dit ce qu'il, en est des conditions de définition d'une grandeur introduite (une température absolue négative serait une chimère), la seconde dit ce qu'il en est du sens physique, des conditions d'une interprétation raisonnable.

Ex: la loi de Gay Lussac et des travaux de Willard Gibbs (p315):

l'équation d'état d'un gaz parfait est donnée par:

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

$V = V_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$, avec $\alpha = 1/273$.

Si T est proche de 0, on voit que V disparaît!

Dans les moments du développement mathématique/symbolique, de la T.P, les "objets visés" n'ont plus de sens physique: à cause des conditions limite incluses dans les formules, des distorsions énormes avec les appareillages...(pp315/6), mais plus encore parce qu'on ne sait pas (et n'a pas à savoir) à quoi ils correspondent physiquement (les imaginaires, les matrices qui donneront éventuellement des rotations...)

L'exemple pris p316 du calcul différentiel est sans doute le meilleur possible: c'est un outil symbolique central de toute physique, le plus décisif peut-être de tous. Il n'y a rien qui ne réclame pas sa contribution: la force, la vitesse, la charge électrique, la puissance... Pourtant la compréhension de son éventuel "sens physique" ou de sa "réalité naturelle" demeure, depuis sa naissance une véritable bouteille à l'encre. (cf. les débats et polémiques sur la métaphysique du calcul infinitésimal: dans l'Acad. des Sc. jusqu'à 1705, Berkeley, Lazare Carnot, d'Alembert, et aujourd'hui les "non-standard").

Remarque: On retiendra donc cette idée forte du découplage de la théorie-dans le moment de son développement- d'avec le réel. On peut y voir une correspondance, une expression équivalente avec les anciens et profonds arguments selon lesquels les causes efficientes demeurent cachées, ou avec les "comme si" des tenants des modèles.

§ VIII. CERTAINS POSTULATS DE LA T.P SONT-ILS INACCESSIBLES AUX DEMENTIS DE L'EXPERIENCE?

Se trouvent donc face à face deux conceptions opposées du rapport T.P/ réalité:

a) du côté de Gustave Robin, les empiristes, les tenants de la stricte induction newtonienne. Pour eux, les expérimentations et la méthode inductive mènent aux lois générales et aux conclusions de la Théorie. Celle-ci, dans le cours de son développement n'est pas séparée de la réalité des faits.

b) du côté de Duhem, les "phénoménistes" ou tenant d'un positivisme formel (logique). Pour eux, de pures hypothèses abstraites, choisies pour leur efficacité déductive (dues à l'ingénium du physicien) sont le socle de la Théorie. Un développement formel abstrait produit des conclusions.

Seules les conclusions peuvent interroger valablement un ensemble de faits expérimentaux. Et encore: pas quant à leur essence, mais seulement quant à la possibilité de leur interprétation. Cette T.P. ne sait rien de la réalité objective.

Cette mise au point permet de saisir la suite du chapitre: la proposition ici discutée soutient que certaines hypothèses sont hors de portée de toute mise en cause expérimentale. L'argument essentiel étant qu'ayant une forme tautologique, elles ne seront jamais niées

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Tout A est B n'est pas critiquable dès lors que

"être A, c'est être B"

Exemple donné par Edouard Le Roy pp317-8 :

A est d'être en chute libre et B est avoir une accélération constante. La discussion de Duhem est convaincante.

Poincaré examine un semblable schéma en analysant comme tautologique la seconde loi de Newton ($F = mg$) dans laquelle F et m se définissent mutuellement. Il en conclut à l'impossibilité de mise en cause expérimentale de la loi.²⁰

Duhem fait appel à des distinctions examinées avant pour dégager deux sens distincts à l'expression *Chute libre* : celle du sens commun qui est aussi celle de la réalité; et par ailleurs la chute symbolique libre, c.à.d. une équation qui prétend être une image acceptable de la première. Or l'expérience -version Duhem- ne consiste pas à tourner en rond emporté par la tautologie, mais à évaluer la ressemblance entre la réalité et son image symbolique.

Inévitablement, il y a distance entre les deux: $x = 1/2 g.t^2$ ne se passe jamais -en vrai- Alors dit Duhem (p319) "*deux partis s'offrent à nous*"

La contradiction exhibée par l'expérience doit fournir une critique des énoncés théoriques (de la famille $P \cup \{U_i p_i\}$) Ou nous jugeons que l'ensemble est en cause (notamment l'hypothèse centrale P) et nous changeons cette définition-hypothétique et toute la mécanique avec elle.

Ou alors -avec E. Le Roy-nous estimons qu'en modifiant notre chute symbolique, en le corrigeant par des paramètres algébriques supplémentaires, on obtiendra une image qui soutiendra l'épreuve de la confrontation aux faits. Dans ce cas, la définition-hypothèse a survécu et avec elle la dynamique et l'édifice général.

On pourra songer au débat implicite et fondamental entre Galilée et Descartes sur cet objet, *la chute des graves*.

Il ne faudrait cependant pas croire que telle est toujours la bonne solution. Il n'est pas insensé, illogique que ce soit l'hypothèse jugée inexpugnable qui ne tombe; et ce par choix du physicien. A la question inaugurant le §, Duhem réplique qu'il n'est pas insensé ni absurde de répondre non (fin p321).

Il en donne d'ailleurs un exemple avec l'hypothèse de la trajectoire rectiligne du rayon lumineux. Dans un milieu homogène (p322). Il a raison de signaler la forme apparemment tautologique de l'énoncé puisque chez les grecs (cf. Euclide, Platon) déjà, la rectilinéarité est donnée par la propagation lumineuse. Les "petites erreurs" entre le rayon réel et commun et le rayon idéal a fini par avoir raison de l'hypothèse principale.

Remarque: les travaux du père Francesco Grimaldi parurent en 1685; il mettait en évidence les

²⁰Poincaré SC et Hyp. pp117/124

phénomènes de diffraction au cours desquels il apparaît que la lumière peut être déviée.

Remarque: c'est à Duhem, le non-empiriste radical qu'il revient d'évaluer "à la hausse" la puissance critique de l'expérimentation qui peut même remettre en cause des énoncés réputés intangibles.

§ IX. HYPOTHESES DONT L'ENONCE N'A PAS DE SENS EXPERIMENTAL

Il est une autre raison pour laquelle des énoncés peuvent passer pour inaccessibles à la remise en cause par l'expérience. Ce n'est plus qu'ils soient réputés tautologiques mais ils perdent tout sens expérimental. Les exemples pris par Duhem (pp323-4) sont aussi traités par Poincaré²¹:

-Le principe d'inertie: en vertu de la relativité des repères il est impossible de ne pas trouver un certain repère dans lequel tel déplacement ne soit pas inertiel. Ce principe ne peut donc être remis en cause (pp323-4).

-Le principe de l'égalité de l'action et de la réaction (troisième loi de Newton): le seul système isolé est l'univers entier qui ne saurait fonctionner comme un laboratoire (pp324-5).

Duhem semble d'accord avec Poincaré et il rajoute deux beaux exemples.

-La loi des proportions multiples en chimie (pp325-6). C'est une loi due à John Dalton (1766-1844) dont voici une expression un peu plus simple que la formulation duhémienne: "*Lorsque deux éléments A et B forment plusieurs combinaisons, l'analyse montre que, à un même poids de A sont unis, dans chacune d'elles, des poids de B proportionnels à des nombres entiers très simples; 1,2,3,4,5 etc.*"

Par exemple le carbone et l'oxygène forment du gaz carbonique ou encore de l'oxyde de carbone. Pour 1g de carbone, dans le premier on a 1,33 g d'oxygène et pour le second on a 2,66 g. Le rapport est ici 1/2.

Le soufre et l'oxygène forment du gaz sulfureux ou encore de l'anhydride sulfurique. Pour 1g de soufre, dans le premier on a 0,998 g d'oxygène et pour le second on a 1,497g. Le rapport est ici 2/3.

Ainsi, les combinaisons présentent des discontinuités brusques de composition. C'est effectivement une loi fondamentale de la chimie.

L'argument duhémien rappelle celui des discontinuités d'Hadamard sur les géodésiques. Toute expérimentation ne s'interprète qu'avec des voisinages.(groupes infinis de jugements). L'intérêt de la loi est de faire apparaître des rapports rationnels simples (ou commensurables). L'expérience, si fine soit-elle ne révèle que des rapports "à peu près", ce qui ruine son intérêt même.

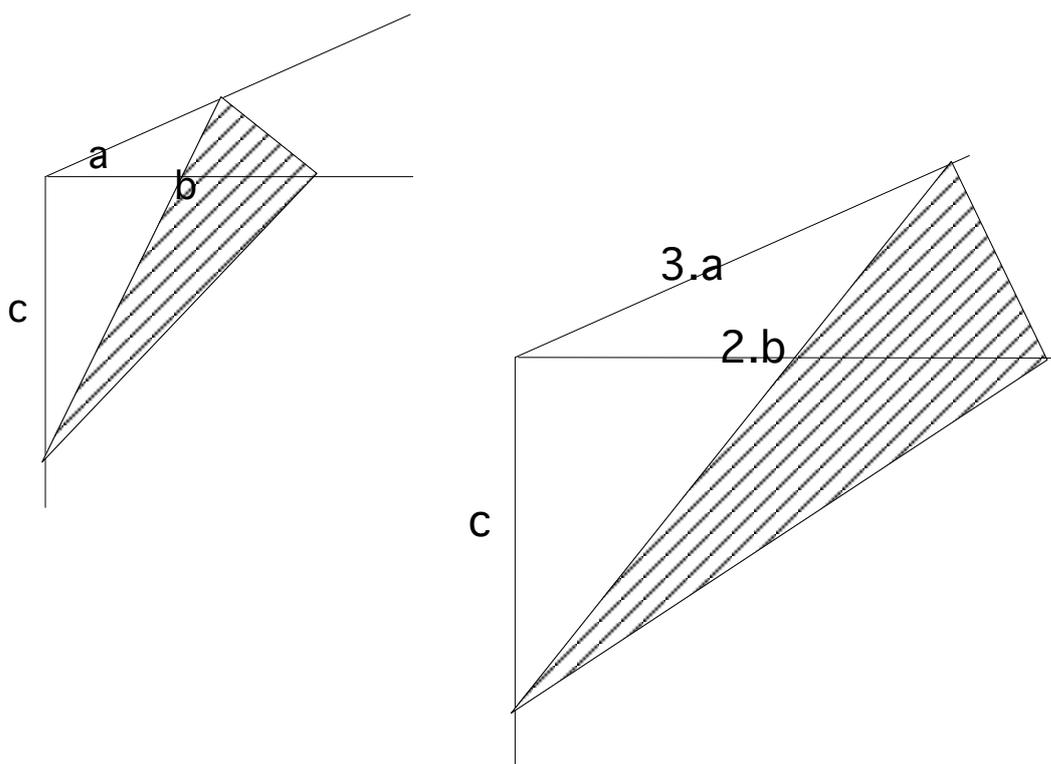
En effet -comme l'explique Duhem p327- quel que soit le voisinage (si petit soit-il) d'un

²¹Poincaré, La Science et l'Hypothèse, pp117-124

incommensurable, il contient un commensurable. On dit que le corps des rationnels est dense.

Duhem "pousse" un peu en négligeant la grande simplicité des rapports revendiqués par la loi de Dalton. Son contre argument mathématique doit éventuellement faire appel à des rapports compliqués (ex:II est proche de $10/3$, ou de $22/7$ ou de $355/113$ etc.)

-La loi des indices rationnels en cristallographie est du même type. Elle explique les régularités cristallines. Une de ses versions en est la loi de Romé de l'Isle (1736-1790): "*La forme des cristaux est déterminée par les angles-dièdres que forment les faces entre elles*".



Si une face d'un cristal est déterminée par a, b, c , toute autre face de ce cristal sera déterminée par une troncature du type $\alpha a \beta b \gamma c$ avec α, β, γ entiers.

L'argument est bien sur le même (pp326-7). Lire le passage, p327: "*Un énoncé mathématique...commensurable*".

Le raisonnement de Duhem est alors le suivant: il y a bien des hypothèses inaccessibles directement au contrôle de l'expérience -ainsi que le soutien Poincaré- Mais sont-elles **vraiment** hors d'atteinte? Non, "*le prétendre serait commettre une grave erreur*".

Isolément, elles le sont, mais le contrôle ne doit pas concerner des énoncés isolés mais des ensembles théoriques. Il se peut que l'ébranlement de l'édifice se produise à la périphérie de ces énoncés ou de leurs conséquences; il se peut que l'édifice entier vacille; alors s'effondre toute la théorie et ces énoncés avec elle (p328).

Citer pp328-9 : "*Quelle que soit...rejetée*".

§IX. LE BON SENS EST JUGE DES HYPOTHESES QUI DOIVENT ETRE ABANDONNEES

Le chapitre se conclut sur une idée qui peut sembler paradoxale, à savoir celle qui confère au bon sens le rôle de juge, quant au choix des hypothèses. Dans la situation où un résultat a condamné un système théorique, plusieurs voies sont ouvertes pour le théoricien, de la plus prudente à la plus bouleversante, du choix des modifications minimales qui sauvegardent la majorité des énoncés théoriques habituels jusqu'à la proposition d'un cadre théorique radicalement nouveau.

Il n'y a pas, en ces choses, de nécessité logique; le choix existe; il est laissé au bon sens constitué lui "des motifs qui ne découlent pas de la logique et qui cependant dirigent notre choix, ces raisons, que la raison ne connaît pas, qui parlent à l'esprit de finesse et non à l'esprit de géométrie"(p331).

Je pense qu'il convient de séparer cette idée de bon sens de celle du sens commun, telle qu'elle est apparue dans le cadre des expériences communes, ou connaissances communes. celle-ci avait à voir avec la connaissance sensible, celle-là trouve sa source et sa définition chez Pascal (et même chez Descartes: «*La finesse est la part du jugement*» (Pascal, Pensée, 513-Lafuma). (cf. Pensées 511 et 512). Le bon sens est ici de l'ordre de l'esprit de finesse: partout répandu, mais dont les raisons demeurent en général mêlées et confuses.

S'il n'y a pas de règles rationnelles pour gérer, prévoir, rendre nécessaires les décisions et les choix qui relèvent de ce bon sens, il est toutefois possible de parer à l'un des principaux obstacles à son règne par la rectitude morale: "*il faut encore être juge impartial et loyal*".

CHAPITRE VII. LE CHOIX DES HYPOTHESES

C'est un chapitre assez particulier. Remarque, il fut exclu du texte à préparer pour l'agrégation la fois précédente (années 1990).

Voici ce qu'il a d'étrange. Dans l'économie générale de la *T.P.*, l'étape de choix des hypothèses est stratégique, sans doute le point le plus sensible de la construction duhémienne : le but de la *TP*, c'est l'accord avec l'expérience, mais le centre nerveux, c'est le choix des symboles qui assureront son développement, tel est le « choix des hypothèses ». Or, le chapitre développe un argument principal sur la manière de choisir les hypothèses, argument plus historique que spéculatif. Par ailleurs, dans ce chapitre Duhem montre pourquoi, choisir des hypothèses, c'est installer la physique en équilibre entre les mathématiques et l'observation de sens commun.

§ I. A QUOI SE REDUISENT LES CONDITIONS...

Or, un seul et vaste argument va être présenté, avec beaucoup de détails, dans le chapitre, c'est l'argument continuiste, j'y reviens dans un instant.

Duhem commence par rappeler les conséquences radicales de sa conception de la *TP*.

Les hypothèses ne doivent rien et ne redoutent rien de la métaphysique

Les hypothèses ne sont pas issues de l'expérience

Les hypothèses n'ont pas à être isolément testées

Elles doivent

Chacune être non contradictoire, pour éviter le non-sens.

Elles doivent être compatibles car nous avons une intuition *innée* de la classification naturelle (p.335).²²

Leurs conséquences logiques doivent former un *ensemble* ressemblant à l'*ensemble des données d'observation*, car une telle représentation est le but de la *TP*.

S'il n'y a pas ressemblance, il y a *fausseté physique* (pas théorique).

§ II. LES THEORIES NE SONT PAS LE FRUIT D'UNE CREATION SOUDAINE...

Tant de liberté dans l'élaboration de la *TP* est effrayant : on sait d'où ne viennent pas les hypothèses. Elles sont là, librement à la disposition du théoricien, en un ensemble vertigineux. N'a-t-il aucun critère de choix ?

Duhem est extrêmement habile. Il va, maintenant raccorder deux domaines de son œuvre : l'épistémologie et l'histoire. Les hypothèses raisonnables, rationnelles, fertiles se sont constituées petit à petit, au cours d'un développement continu et complexe. Aussi, le théoricien pertinent est-il d'abord et avant tout un héritier. Les hypothèses ne se présentent pas *ex nihilo*, mais bien comme un fruit mûr dont le temps est venu.

²² Ce passage est très commenté par Brenner. Voir la fin de son étude publiée en PDF.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

Suivent 48 pages d'une grande leçon d'histoire des sciences : comment Newton est-il entré en possession de $f = k.m.m'/d^2$?

On pourra comparer avec le long passage de Meyerson sur l'élaboration du principe d'inertie²³. Le style et le genre sont les mêmes (histoire des sciences et philosophie des sciences mêlées) mais les doctrines épistémologiques opposées. Meyerson met en avant les arguments favorables au caractère explicatif de la théorie.

La réponse fait la fin de ce long paragraphe :

Nous pouvons suivre les transformations lentes et graduelles par lesquelles le système théorique a évolué ; mais à aucun moment, nous ne pouvons saisir une création soudaine et arbitraire d'hypothèses nouvelles (384).

§III. LE PHYSICIEN NE CHOISIT PAS LES HYPOTHESES...ELLES GERMENT EN LUI SANS LUI.

Examen d'une contraction dans le temps. Entre l'expérience d'Oersted (1819) et le grand mémoire (définitif ?) d'Ampère à l'Académie (1823), seulement quatre ans. La théorie mathématique de l'électromagnétisme est là, toute finalisée. Duhem soutient que c'est, en accéléré, la même continuité, avec hésitation, reprises et héritage, réglages et mises au point que pour l'attraction. En outre, il y a une troupe, aux côtés d'Ampère. Bref, ce « coup de théâtre » est continuiste (p. 386).

Il y a des raisons *conceptuelles* –externes. Voyons un exemple où Duhem donne l'une des raisons pour lesquelles Ampère réussit si vite et si bien

Les méthodes créées des mouvements des astres cherchaient de tous côtés, dans la mécanique terrestre, l'occasion de prouver leur fécondité, et la physique mathématique progressait avec une étonnante rapidité. (p. 387)

L'externalisme de Duhem est spécial (mais à mes yeux convaincant) : il consiste en une *ambiance conceptuelle*.

On dirait que l'idée flotte dans l'air, portée d'un pays à l'autre par le vent qui souffle, prête à féconder tout génie qui se trouve en état de l'accueillir et de la développer, semblable au pollen... (388)

Nous avons, dans ce paragraphe une théorie des découvertes simultanées.

L'exemple mis en avant est celui de l'Onde *évanescence*.

Cas de réflexion totale. Toute l'énergie du rayon est réfléchi, mais, juste au voisinage de la surface, à l'arrivée du rayon, on peut constater néanmoins l'existence d'une perturbation électromagnétique dans le second milieu où il est malgré tout possible de détecter une onde. Elle est dite *évanescence*.

§IV. DE LA PRESENTATION DES HYPOTHESES DANS L'ENSEIGNEMENT...

On devra se contenter d'un compromis entre les exigences de la logique et les possibilités des étudiants qui ne disposent pas de l'ensemble des théories mobilisées dans les expérimentations.

²³ *Identité et réalité*, Félix Alcan, 1925, p.114-165

C'est avec une prudence extrême que Duhem fait les concessions nécessaires :

L'induction, cependant, peut indiquer, en quelque sorte, la voie qui conduit à certaines hypothèses ; il ne sera pas interdit de le remarquer ; il ne sera pas interdit, par exemple, au début d'un exposé de la mécanique céleste, de prendre les lois de Kepler et de montrer comment le traduction mécanique de ces lois conduit à des énoncés qui semblent appeler l'hypothèse de l'attraction universelle ; mais, ces énoncés une fois obtenus, il faudra attentivement observer à quel point ils diffèrent de l'hypothèse qu'on leur substitue.

§ V. LES HYPOTHESES NE PEUVENT ETRE DEDUITES D'AXIOMES FOURNIS PAR LA CONNAISSANCE COMMUNE

L'effet majeur de ce paragraphe est de marquer la distinction entre les jugements de sens commun et les jugements scientifiques. Viser à les rapprocher, à les mettre en continuité, conduit à des *calembours, de mauvaises vulgarisations, une science frelatée, des piperies, discours spécieux, jeux de mots, trompeuses analogies* (395-396).

Duhem insiste donc une fois de plus sur la discontinuité entre la pensée scientifique et la pensée commune. L'exemple fourni par l'*Energie* fonctionne évidemment, comme bien d'autres possibles.

Et, à nouveau, c'est chez Pascal que l'on trouvera le remède adéquat, avec la « précieuse règle de Pascal » (substitution de la définition au défini²⁴)

La circulation entre les deux sources de jugement (scientifique et de sens commun) n'est pas réflexive : si elle est généralement déficiente de celui-ci vers celui-là, en revanche, elle est enrichissante et pertinente dans le sens opposé : l'esprit scientifique enrichit et éduque le sens commun, au point même de lui faire oublier ses dettes envers la pensée scientifique (p. 397).

Le cercle vicieux dénoncé est le suivant :

- (1) Les théories scientifiques génèrent (selon des processus historiques complexes) les hypothèses de la *TP*
- (2) Les hypothèses diffusent dans le sens commun
- (3) On prend ces énoncés diffusés dans le sens commun comme fondement des *TP*

Il est clair que c'est la troisième étape qui est illégitime.

C'est celle qu'Euler parcourt en donnant une définition de la puissance inertielle ou de la force comme issue du *langage courant et non scientifique* .

Comme si les propriétés inertielles de la Théorie Physique développée (la Dynamique) étaient issues du sens commun. C'est le contraire que soutient le sens commun. Il y a sur ce point un accord avec A. Koyré qui insiste aussi sur ce renversement.

²⁴ De *l'esprit géométrique*, section I, Lafuma 349 b

Passage à souligner (p. 402-403) : les « lois de sens commun et ses termes généraux » ne sont pas trop simples pour produire des énoncés sophistiqués ; à l'inverse, ils sont trop riches, trop complexes, trop *inanalysés* pour être précisément mis en relation, symbolisés etc.

Il est vrai qu'une charrette n'avance plus sans un attelage qui est son moteur ; il faut extrêmement simplifier la notion de charrette pour la soumettre au principe d'inertie.

La fin de ce long paragraphe (à partir de p. 404, « Le dessein...») met en garde contre un autre danger qui guette la *TP*. Elle court le risque d'être constituée *trop à l'imitation de la Géométrie*.

Voici l'argument :

En mathématiques, la distance entre sens commun et notions analysées est presque nulle. Aussi, ces sciences ne connaissent pas de conflit entre la certitude (du premier) et la clarté (des secondes).

On note que les problèmes des fondements logiques et des *GNE* ne sont même pas évoqués.

La physique « n'a pas ce bonheur ». Résumé très direct de la thèse générale du livre (p.405). La physique emprunte les méthodes de clarté aux mathématiques, mais c'est un emprunt fait à un domaine extérieur à soi-même. Il y a comme une hétérogénéité essentielle qu'on ne devrait pas oublier aux étapes où les notions physiques analysées ressemblent à des notions mathématiques. N.B. bon passage en faveur de mon idée de symbiose : (...mêlent les uns aux autres, d'une manière inextricable, les procédés qui leurs sont propres.).

La *T.P.* est le résultat de la mise en relation de ces deux domaines, l'observation où règne le sens commun, et la représentation symbolique où règne la déduction mathématique.

La circulation qui est ainsi établie ne peut exister que par la recherche d'un équilibre entre les deux pôles (406-407). Duhem cite Edouard Le Roy qui exprime *fidèlement* sa pensée. On pourra cependant trouver des glissements dans les termes constitutifs du dipôle. Le Roy y ajoute divers termes, si bien qu'on se retrouve avec deux séries opposées des termes suivants :

A l'observation et au sens commun s'ajoutent, la vérité, l'objectivité, l'image, la qualité, le concret, l'expérience, l'intuition et à la représentation symbolique et la déduction mathématique sont jointes la nécessité, la rigueur, la formalisation.

§IV. IMPORTANCE, EN PHYSIQUE, DE LA METHODE HISTORIQUE

L'analogie centrale de ce dernier paragraphe est empruntée (p. 409) à la *théorie de la récapitulation* de Ernst Haeckel (1866), selon laquelle la croissance d'un embryon récapitule l'évolution de son espèce, *l'ontogenèse récapitule la phylogenèse*. La défense générale de l'histoire des sciences comme source de la mise au point des hypothèses symboliques de la théorie physique se décline en une défense de cette même histoire des sciences dans l'apprentissage, la justification et la compréhension de la physique lorsqu'on l'étudie.

La théorie Physique, son objet-sa structure par Pierre Duhem

On remarquera ici que le physicien catholique admet la théorie de l'évolution.

L'histoire, en outre, exhibe le progrès de la physique et sa marche vers (ou du moins un argument en faveur de l'existence de) la classification naturelle.

Un bénéfice supplémentaire sera de pouvoir être un peu plus pascalien encore en se gardant du Pyrrhonisme et du dogmatisme (p. 410) d'une part, en respectant une de ses maximes « s'il se vante, je l'abaisse, s'il s'abaisse, je le vante », d'autre part.