

Les analogies théories - artefacts : le cas des modèles hydrauliques au 19^e siècle

Etienne Bolmont

LPHS — Archives Poincaré, Université de Nancy 2

Résumé. L'histoire des analogies dans le domaine de l'électromagnétisme introduit une catégorie particulière qui s'appuie sur la construction d'artefacts sensés représenter la théorie. Ces objets ne sont pas seulement des aides pédagogiques, mais sont considérés par leurs auteurs comme essentiels dans l'élaboration et la justification des théories. Cette conception originale de l'analogie est présentée à partir de quelques exemples de modèles hydrauliques, et les réactions qu'ils ont soulevées illustrent certaines grandes orientations épistémologiques du 19^e siècle.

Abstract. The history of analogies in electromagnetism introduces a special category which relies on building artefacts able to represent theory. These objects are not only a tool of pedagogy, in that they are regarded by their authors as essential to theory construction and justification. This original conception of analogy is presented via examples of hydraulic models, and the reactions raised illustrate the epistemological preoccupations of the 19th century.

1 Introduction

Il existe une catégorie d'analogies qui porte sur les relations particulières que peuvent entretenir les théories avec des objets matériels sensés les représenter.

One need only recall the persistent use of familiar mechanical models in constructing explanations for the phenomena of heat, light, electricity, and even human behavior in order to recognize the influence of this conception of explanation [Nagel 1961, 46]

L'électromagnétisme est un domaine qui a souvent conduit les savants à construire des machines plus ou moins compliquées pour représenter la théorie. Les grandes analogies mécaniques ont inspiré l'apparition en nombre de modèles mécaniques, notamment chez les savants britanniques ou de modèles hydrostatiques ou hydrodynamiques, tels ceux que Carl Anton Bjerknæs avait présentés à de nombreuses sociétés scientifiques dans les années 1880. Ainsi, W. Thomson exprime sans ambiguïté ce besoin d'envisager un modèle mécanique, *pour une compréhension de l'ensemble* :

It seems to me that the test of 'do we or do we not understand a particular subject in physics ?' is 'Can we make a mechanical model of it ?' [Thomson 1884, 270]

Ces modèles n'en constituent pas pour autant une classe à part dans les considérations sur l'analogie, même s'ils furent souvent décriés. Duhem est celui qui s'est le plus opposé à cet usage des modèles, attribuant cette tendance aux « esprits amples et faibles » des Britanniques, à l'opposé des Français et des Allemands que « l'esprit étroit et fort » prédestine à une démarche plus théorique, plus abstraite :

Ces diverses manières de faire appel à l'analogie entre deux groupes de lois physiques ou entre deux théories distinctes sont donc fécondes en découvertes ; mais on ne saurait les confondre avec l'emploi des modèles.¹ 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 rien là qui puisse étonner le logicien le plus rigoureux ; mais il n'y a rien, non plus, qui rappelle les procédés chers aux esprits amples et 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'ensembles concrets. [Duhem 1906, 142-143].

1. Il s'agit ici des modèles mécaniques.

Duhem nous montre ici qu'il distingue l'emploi de l'analogie dans le raisonnement scientifique, qu'il juge indispensable, de l'utilisation des modèles mécaniques. Il s'agit pour lui de modèles que l'on peut visualiser, composés d'éléments organisés dans l'espace, agissant les uns sur les autres par contact direct, et non de modèles théoriques pour lesquels Duhem parle plutôt d'analogie, en tant que relations entre deux systèmes abstraits, dont l'un pourrait être considéré comme l'analogue (ou le modèle) de l'autre.

Mais nous devons prendre en compte cet usage particulier de l'analogie que les grands savants ont utilisé, à l'exemple de Maxwell, Thomson (Lord Kelvin) et Poincaré. Ce dernier ne se prive pas d'employer dans ses démonstrations théoriques les modèles hydrauliques et sa familiarité avec l'analogie mécanique le conduit à illustrer certains points de la théorie par des exemples pratiques. On pourrait cependant considérer l'approche des artefacts modèles par Poincaré, comme celle d'un pédagogue. En effet, ses ouvrages sont, essentiellement en physique et notamment dans le domaine de l'électromagnétisme, des transcriptions des cours qu'il donna en Sorbonne. Nous y trouvons nombre d'exemples dans lesquels il se sert d'une analogie en présentant un dispositif dont la construction est tout à fait envisageable.² L'analogie est explicative, elle permet de comprendre, de « se rendre compte ». Mais il en établit les limites :

Ajoutons immédiatement que, bien que cette image hydrostatique nous fasse concevoir la manière dont se comporte le fluide inducteur dans la théorie de Maxwell, elle ne peut pas être poussée trop loin car le fluide inducteur est incompressible, propriété dont ne jouit pas l'air auquel nous l'avons comparé. Cette image n'est donc utile que pour faire comprendre l'effet de l'une des propriétés de ce fluide : son élasticité.

L'analogie est une « image fidèle » et dans le cadre de l'analogie positive,³ elle se réfère à un isomorphisme. Henri Poincaré n'a jamais réalisé les modèles qu'il décrit, mais il est remarquable que certains scientifiques et non des moindres soient passés à une construction effective.

En décrivant ces fabrications, nous essaierons de comprendre les interactions entre la théorie et le modèle, c'est-à-dire de décrire l'analogie théorie - artefact. Quelle est la nature des relations entre les éléments

2. Par exemple, l'analogie hydraulique du fluide inducteur : [Poincaré 1891], p. 18-20.

3. Nous nous plaçons ici dans le cadre des travaux de Mary Hesse, qui introduit les concepts d'analogie négative, neutre et positive. Ainsi, comparant les deux domaines mis en correspondance, les parties isomorphes constituent le fondement de l'analogie positive et les éléments et relations reconnus totalement divergents définissent l'analogie négative, qu'on pourrait également qualifier de non-analogie. [Hesse 1966]

de la théorie et les parties de ces objets singuliers ? Ces modèles ont-ils un caractère illustratif, sont-ils des images de la théorie, ce qui justifierait alors leur utilisation dans le domaine de la pédagogie des sciences ? Acquièrent-ils parfois un caractère prédictif qui permettrait de les utiliser dans la découverte même des lois scientifiques de l'électromagnétisme ? Quel est leur rapport à la réalité ?

Deux catégories de modèles artefacts ont été fabriqués : ceux qui utilisent les machines simples et les dispositifs de transmission ou de transformation du mouvement, les modèles mécaniques ; ceux qui font intervenir les fluides, avec des dispositifs contrôlant les pressions, les circulations dans des tuyaux, les modèles hydrauliques. Si les modèles mécaniques sont le signe de la toute puissance de la théorie mécanique, les modèles hydrauliques, qui s'inscrivent dans un cadre également mécaniste, sont surtout à mettre en relation avec les analogies hydrauliques.⁴

Dans le cadre de cet article, nous laisserons de côté les modèles mécaniques⁵ pour ne prendre en considération que les modèles hydrauliques. Quelques exemples nous permettront de mieux saisir leurs rôles par rapport aux théories représentées et nous montrerons quelques problèmes épistémologiques qu'ils n'ont pas manqués de soulever dans le monde scientifique.

2 Exemples de modèles hydrauliques

2.1 Lodge

Lodge construit des modèles hydrauliques, notamment celui de la bouteille de Leyde, à l'aide d'un réservoir d'eau muni d'un diaphragme souple.⁶ Il arrive ainsi, grâce à son ingéniosité, à présenter l'image 'exacte' de ce qui se passe avec une bouteille chargée et isolée dont on met alternativement à la terre les deux armatures (voir figure 1).

Il précise également :

Nous avons insisté sur cette analogie hydraulique, parce qu'elle donne la clef d'une bonne partie de l'électrostatique. Cependant cette analogie n'est

4. Après les travaux initiateurs de Faraday, ceux de Maxwell et de William Thomson utilisent beaucoup les analogies hydrauliques dans la construction de la théorie électromagnétique.

5. Comme ceux de Maxwell, William Thomson, Lodge, Fitzgerald, Lord Raleigh et Boltzmann. Se reporter à [Bolmont 1999].

6. Lodge est surtout connu pour ses modèles mécaniques et son ouvrage les décrivant a été la cible particulière de Duhem : [Lodge 1891]

Fig. 10.

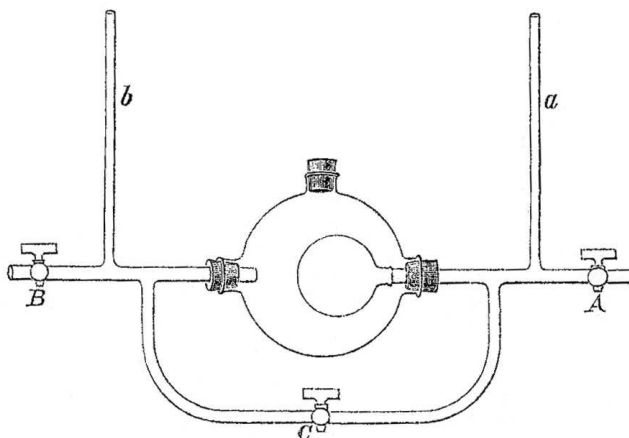


Diagramme d'un modèle hydraulique de la bouteille de Leyde.

FIGURE 1 – [Lodge 1891]

ni complète ni parfaite ; néanmoins en combinant les résultats obtenus avec ceux que fournit le modèle à corde sans fin,⁷ et en se reportant à ce qui a été dit sur l'isolation et la conduction en général, on aura fait un progrès réel dans la connaissance de ces phénomènes [. . .].

Cette manière de voir constituera une représentation bien plus réelle des phénomènes que l'ancienne théorie des actions à distance. Elle nous permettra de pénétrer plus avant dans la nature intime de l'électricité, bien que celle-ci puisse, à parler strictement, rester toujours inconnue [. . .].

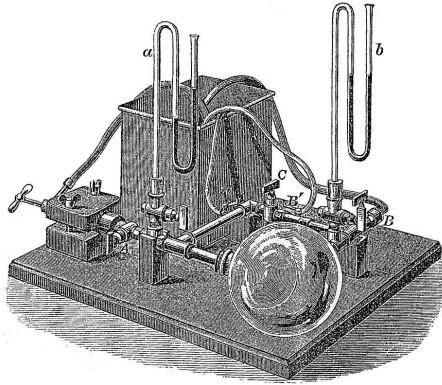
Mais n'oublions pas non plus qu'il n'est guère prudent de s'engager dans un dédale de phénomènes compliqués sans autre guide que de sèches équations mathématiques.

[. . .] il y a peu d'esprits capables de se passer de tout autre secours que celui du pur raisonnement, et une peinture mentale des phénomènes sera toujours utile, à la condition qu'elle soit suffisamment approchée de la réalité des faits. [Lodge 1891, 40-42]

On remarque ici ce besoin d'une illustration expérimentale de la théorie, même si elle passe par l'analogie. Lorsqu'elle appuie la théorie de la transmission des actions de proche en proche, toute analogie sera considérée comme une quasi-confirmation de cette théorie, et c'est en cela

7. Le modèle de la corde sans fin est un artefact mécanique dans lequel la circulation en boucle d'une corde simule le courant électrique.

Fig. 11.



Modèle hydraulique de la bouteille de Leyde.

Le globe de verre renferme un ballon élastique qui se dilate lorsqu'on y pompe de l'eau; le réservoir est rempli d'eau dont les niveaux correspondent au potentiel de la terre. Les manomètres à mercure correspondent à deux électroscopes reliés aux armatures.

FIGURE 2 – [Lodge 1891]

qu'elle prend un caractère réaliste. L'hypothèse sous-tendue dans cette idée est que, si on parvient à établir une analogie à un phénomène ou à une théorie, la théorie sera davantage confirmée, ce qui se rapproche de la thèse de Campbell.⁸

2.2 Carl Anton Bjercknes

Carl Anton Bjercknes nous offre le meilleur exemple d'un réel investissement dans la construction de modèles hydrauliques. Il connut un grand succès en présentant ses modèles à l'Exposition de l'Électricité de Paris, en 1880. Ainsi qu'il est rapporté dans la revue *Nature* par George Forbes, l'intention de Bjercknes était de montrer les phénomènes fondamentaux de l'électricité et du magnétisme par leurs analogues en hydrodynamique. Forbes remarque : « Every result which is thus shown by experiment had been previously predicted by Prof. Bjercknes as the result of his mathematical investigations. » [Forbes 1881, 360-361].

La place de ces expériences pourrait donc être comprise non pas

8. Selon Campbell, l'explication des lois par une théorie est achevée seulement par la formulation d'une analogie avec quelque système gouverné par des lois déjà établies. [Campbell 1921]

comme une simple illustration à caractère didactique des phénomènes étudiés, mais comme une validation expérimentale de la théorie développée précédemment. Cet aspect de la validation de la théorie par analogie est original dans l'étude des analogies où nous pouvons comprendre l'analogie comme un mode de raisonnement scientifique conduisant essentiellement à la mise en place d'hypothèses à vérifier par l'expérience. Si les modèles concrets remplissent ce rôle important et permettent notamment de nouvelles découvertes par leur rôle heuristique, les attaques de Duhem perdent leur sens.

Pour Forbes, ce point de vue particulier sur l'analogie reste quand même problématique. À propos d'une expérience de Bjerknæs sur l'attraction et la répulsion après contact d'une substance neutre électrisée et le passage d'une étincelle, il déclare, dubitatif : « ... But it is extremely speculative, and is not as yet experimentally illustrated, and I think that at present it is better to pass it by. » [Forbes 1881, 360-361].

Comment Bjerknæs lui-même présente-t-il ses réalisations ? Il a conduit des travaux théoriques approfondis sur l'hydrodynamique et connaît donc particulièrement bien ce domaine. Ses recherches sur les corps oscillants ou pulsants dans des fluides l'ont amené au rapprochement avec les phénomènes fondamentaux de l'électricité et du magnétisme, même si cette transposition se fait à l'inverse des phénomènes naturels : deux corps pulsants s'attirent si leurs volumes vibrent en phase alors que les pôles de deux aimants s'attirent s'ils sont de noms contraires.

Les origines de ses travaux se situent dans les idées émises par William Thomson en 1850 [Thomson 1884, 449-456, 572-583], par les leçons de Dirichlet à Göttingen en 1855-1856 et Bjerknæs cite même l'influence d'Euler dans ses Lettres à une princesse d'Allemagne : ce dernier a perçu le premier l'analogie hydrocinétique avec la force magnétique d'un aimant (Gilbert pourrait l'avoir inspiré par sa théorie des effluves) :

L'arrangement que nous observons dans la limaille de fer ne nous laisse pas douter que ce ne soit une matière subtile et invisible qui enfle les parcelles de la limaille, et les dispose dans la direction que nous voyons. Outre cela, il est également clair que cette matière subtile traverse l'aimant même, en y entrant par l'un de ses pôles, et sortant par l'autre : de sorte qu'elle forme par son mouvement continué autour de l'aimant, un tourbillon qui reconduit la matière subtile d'un pôle à l'autre et il n'y a aucun doute que ce mouvement ne soit extrêmement rapide.

[...] et ce mouvement, qui se fera tout autour de l'aimant, est ce que nous nommons tourbillon magnétique.

[...] Maintenant nous n'avons qu'à réfléchir sur ces tourbillons, pour juger comment deux aimans agissent l'un sur l'autre. [Euler 1768, 115-119]

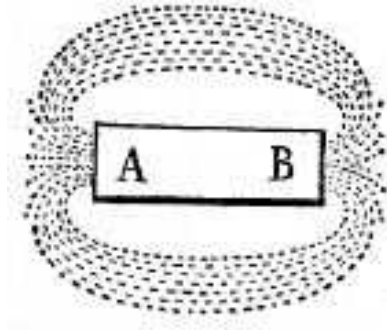


FIGURE 3 – Spectre magnétique [Euler 1768, 115].

Bjerknes part des constatations sur le comportement de sphères vibrantes (oscillantes ou pulsantes) plongées dans un liquide. Il arrive à ce résultat que deux sphères vibrant en phase s'attirent, alors que si elles vibrent en opposition de phase, elles se repoussent. Naît alors l'analogie :

Elles se comportent, par suite, comme des pôles magnétiques ; seulement il faut supposer que les pôles de même nom s'attirent et que ceux de nom opposé se repoussent. Cette modification de leur action admise montre aussi que deux sphères oscillantes peuvent être comparées à deux aimants orientés suivant les directions instantanées de leurs oscillations. Et, en général, on aura une série de phénomènes qu'on pourrait désigner comme un magnétisme inverse. [Bjerknes 1877, 1375-1377]

Dans la suite de ses articles parus dans les *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* dans les années 1880, Bjerknes présente bien les limites de son modèle, notamment par le fait qu'il n'est valable que dans le cas où les sphères vibrent en phase ou en opposition de phase. L'inversion le gêne apparemment beaucoup et il rêve à des systèmes complexes de sorte qu'on retrouve, par une nouvelle inversion, un comportement identique à celui des éléments électriques ou magnétiques [Bjerknes 1879a, 165-167]. C'est alors qu'il justifie l'introduction de ses modèles hydrauliques comme des moyens d'une vérification expérimentale. Vérification de quoi, de la théorie hydraulique ou de l'analogie ? Le titre de l'article concerné nous porte plutôt à pencher vers la deuxième solution : *Hydro-électricité et hydromagnétisme ; résultats expérimentaux* [Bjerknes 1879b, 280-282]. Le reste de l'article est cependant un développement des expériences hydrauliques sans ce rapprochement attendu avec l'électricité ou le magnétisme. Mais à la séance dans laquelle il a présenté ses appareils aux académiciens, il précise :

On imitera de cette manière complètement les actions connues de l'électricité statique et du magnétisme, toutefois avec cette différence essentielle qu'elles seront toujours inversement dirigées. [Bjerknes 1879c, 144]

Il annonce plus loin de nouveaux progrès notamment en reproduisant les phénomènes concernant le magnétisme temporaire.

Il justifie ainsi les termes d'hydro-électricité et hydromagnétisme :

Ces mots, je les ai adoptés en généralisant ou en altérant un peu le sens d'une notation connue, et ils ne devraient pas être compris comme désignant des phénomènes électriques ou magnétiques réels. [Bjerknes 1881, 304]

Ces termes sont donc relatifs à l'analogie et ils désignent expressément la relation entre les deux domaines concernés⁹.

Le diamagnétisme et le paramagnétisme sont ainsi décrits par les densités relatives des corps et du liquide :

Dans un milieu hydromagnétique, les corps se trouvent dans un état paramagnétique s'ils sont plus légers et par conséquent plus mobiles que le fluide, et dans un état diamagnétique s'ils sont plus lourds. [Bjerknes 1881, 304]

La construction de l'analogie apparaît dans ce texte : il parle d'abord de coïncidence jusque dans les moindres détails, d'analogie si intime puis de juste connexion avec les phénomènes magnétiques. L'aboutissement de ces considérations conduit à des théorèmes concernant les analogies :

Ainsi il faudrait poser les recherches sur une base plus large, pour arriver d'abord aux théorèmes concernant les analogies avec les phénomènes du magnétisme permanent et pour pouvoir ensuite les compléter par d'autres recherches relativement à l'imitation des phénomènes du magnétisme temporaire. Ces nouveaux théorèmes, dont il s'agit surtout ici, ne peuvent être exposés en peu de mots [...] Mais, [...], on pourrait les résumer brièvement en ajoutant aux anciens théorèmes le théorème suivant : que tous les corps, aussi bien que le fluide dans lequel ils vibrent, sont hydromagnétiques, et qu'ils le sont à un degré plus ou moins grand relativement au fluide, suivant qu'ils sont plus ou moins légers que celui-ci. [Bjerknes 1881, 305]

L'analogie ainsi légitimée devient source de connaissance. L'artefact apparaît alors comme la preuve expérimentale de l'existence réelle de l'analogie.

9. Le terme d'hydroélectricité avait déjà été utilisé par Ohm, dans un sens totalement différent qui était celui de l'électricité qui traverse les électrolytes.

Thomson utilise également une analogie de même sens, que Poincaré présente avec les travaux de Bjerknæs. Le savant français compare leurs résultats, essentiellement dans l'inversion des effets. Leurs travaux ne sont pas tout à fait équivalents puisque Bjerknæs se situe dans le cadre de l'électrostatique alors que Thomson travaille en électrodynamique.¹⁰

Thomson a également développé une analogie dans son mémoire *Hydrokinetic Analogy for the Magnetic Influence of an ideal extreme Diamagnetic* dans lequel il décrit les forces qui s'exercent sur des solides immergés dans un liquide en mouvement. Dans le cas d'un tube ouvert à chaque extrémité, traversé par un fluide incompressible, il utilise un résultat qu'il a démontré précédemment, à savoir que la vitesse du fluide en tout point au voisinage du tube est identique en amplitude et sens à la force électromagnétique au point correspondant du voisinage d'un électroaimant remplaçant le tube. Si on considère l'aspect dynamique de l'interaction entre deux aimants, Thomson souligne que l'on retrouve la même loi d'interaction entre deux tubes parcouru par un liquide, mais

with this remarkable difference, that the forces are opposite in the two cases ; unlike poles attracting and like poles repelling in the magnet system, while in the hydrokinetic analogue there is attraction between like ends and repulsion between unlike ends.¹¹

Cependant, la différence entre les deux savants réside surtout dans le fait que C.A. Bjerknæs a construit ses modèles expérimentaux alors que Thomson ne l'a, semble-t-il, pas fait, tout comme Poincaré n'a pas réalisé les modèles hydrostatiques qu'il présente. Ceci montre que la construction du modèle effectuée par Bjerknæs apporte à ce dernier une confirmation de la valeur de la théorie électromagnétique par le rapport étroit qu'elle introduit avec le réel. Si Thomson ne construit pas le modèle mécanique, ce pourrait être parce qu'il n'éprouve pas cette nécessité car la seule évocation lui suffit dans la validation de la théorie, ce qui apparaît également dans l'œuvre de Maxwell.

10. [Poincaré 1901, 624-627]. Poincaré établit ainsi les causes de l'inversion : « L'inversion dans l'expérience de Bjerknæs provient de ce qu'on a représenté les charges électriques par des vitesses, tandis qu'il fallait les représenter par des moments. S'il y a inversion dans l'appareil de Kelvin, c'est parce qu'on a représenté les intensités par des moments, tandis qu'il fallait les représenter par des vitesses. »

11. Thomson : *Hydrokinetic Analogy for the Magnetic Influence of an ideal extreme Diamagnetic*, in : *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* (1870); cité d'après [Thomson 1884a, 574].

2.3 Decharme

A la suite des expériences de C.A. Bjerknæs, Decharme poursuit dans la même veine par une imitation des phénomènes d'électromagnétisme, en utilisant des courants liquides dans l'air ou dans l'eau. Il parvient ainsi à réaliser l'imitation des fantômes magnétiques, images des champs créés par des courants électriques. Il utilise ses modèles dans les deux sens et affirme :

En résumé, malgré quelques différences, tenant à la nature même des deux ordres de phénomènes comparés, il y a, entre les lignes de force des courants électriques des aimants ou des électro-aimants et les figures hydrodynamiques correspondantes, des points de ressemblance assez nombreux et assez caractéristiques pour en motiver l'assimilation. [Decharme 1883b, 404-427]

Nous retrouvons le but souvent non avoué d'une assimilation des domaines concernés par l'analogie. Ou plutôt, faut-il ne voir dans cette assimilation que la correspondance géométrique des formes des courbes ou figures décrites. Ceci reviendrait à une analogie structurelle géométrique.

Les phénomènes de stratification de la lumière dans les gaz raréfiés lui donnent l'occasion d'attribuer à l'analogie un rôle d'explication des phénomènes concernés : « Toute expérience tendant à jeter quelque lumière sur ce mystérieux sujet n'est donc pas à négliger... » [Decharme 1883b, 416].

Ainsi, pour Decharme, les modèles hydrauliques sont bien sûr des illustrations, mais ils gagnent, quand la théorie est défailante, le statut d'arguments, et donc un caractère utile voire nécessaire. Il met en évidence une relation dans les deux sens entre artefact et théorie et fait également apparaître le fait qu'un même phénomène peut être illustré de plusieurs manières, en citant, au sujet des stratifications de la lumière, les travaux de Stephan qui utilise de la limaille de fer en suspension dans de l'eau dans un tube auquel on imprime des vibrations fortes. Cette remarque est à mettre en rapport avec le fait qu'à une théorie peut correspondre plusieurs modèles équivalents, ici dans ce cas particulier du modèle mécanique, de l'artefact.

Decharme établit les règles de son approche sous une forme qui peut paraître simpliste : « *L'aspiré* correspond à l'électricité positive et le *soufflé* à l'électricité négative. » [Decharme 1883b, 424].

Porté sur les analogies, Decharme, dans une note à l'Académie des Sciences [Decharme 1882a, 440-442] compare ses expériences à celles de

Bjerknes et établit alors des analogies entre leurs travaux respectifs. Cependant, à l'occasion de l'imitation d'un électro-aimant à courants interrompus, il décrit une expérience qui n'a pas d'analogue parmi celles de Bjerknes. Mais ceci resterait anecdotique s'il n'ajoutait :

Cette expérience, avec les ajustages¹² attractifs et répulsifs, n'est pas seulement une imitation abstraite du phénomène naturel électromagnétique, mais c'est une réalisation effective, semblable aux mouvements produits par les électro-aimants, sous l'influence d'un courant électrique interrompu régulièrement. Elle me paraît même susceptible de recevoir des applications dynamiques. [Decharme 1882a, 442]

L'analogie électromagnétisme - artefact est ainsi considérée comme réversible, ce qui ne s'entend évidemment que dans le cadre où un isomorphisme est affirmé entre théorie et artefact.

3 Réactions

3.1 La polémique Decharme - Ledieu

C'est alors qu'intervient A. Ledieu, officier de marine et physicien à ses heures, dont les idées sont à rattacher au courant énergétiste. Il va engager, au travers des communications à l'Académie des Sciences, une polémique avec Decharme qui va durer environ deux ans à partir de 1882, avec la somme de huit articles.

Dans une première note à l'Académie des Sciences, Ledieu reproche à la théorie de l'électricité d'avoir conservé des idées confuses issues du mariage de deux théories « fictives », celle des fluides de l'électrostatique et celle de l'électrocinétique, d'avoir mal assimilé la thermodynamique avec la notion « féconde et réelle » d'énergie et donc de se présenter comme « une doctrine désormais hétérogène et exposée à mettre au jour d'incontestables contradictions dynamiques ». [Ledieu 1882a, 619]

On peut remarquer dans ses articles la même confusion qu'il dénonce, notamment dans les explications infondées qu'il donne à l'appui de ses idées. Dans une deuxième communication, il poursuit sa critique et se pose la question particulière « de la connexité de l'éther et de l'électricité en étudiant les modes d'accumulation et de propagation de ce dernier agent » Puis il cite sans plus de développement les travaux de Bjerknes et Decharme :

12. Ajustage : selon Littré, terme d'hydraulique utilisé pour désigner un tuyau adapté à un orifice d'écoulement pour en limiter le débit.

Les imitations hydrodynamiques d'effets électriques et magnétiques, dues à MM. Bjerknæs et Decharme, n'ont pas non plus échappé à notre examen, mais nous avons bien vite constaté qu'elles ne constituaient que de fausses analogies. [Ledieu 1882b, 672]

En quoi consiste cette « fausseté » des analogies utilisées par Bjerknæs et Decharme ? Ce ne sont pour Ledieu que des imitations, et en reprenant le terme même employé par Decharme pour décrire ses expériences, il lui donne un caractère de faiblesse dans la démonstration, l'analogie existant entre modèle et théorie ne présentant pas une isomorphie confirmée, comme nous le verrons plus loin. Et il énonce les bases d'une nouvelle théorie de l'électricité, fondée sur l'hypothèse des forces centrales. Il considère « les molécules complètes, agrégat d'atomes pondérables et d'atomes étherés » dont il donne les caractéristiques (masses, interactions, énergies). Il conclut :

En somme, L'ÉLECTRICITÉ pas plus que la chaleur et la lumière, ne saurait être regardée comme un agent spécial régi par une mécanique particulière. En tant que cause phénoménale, c'est simplement de l'ÉNERGIE POTENTIELLE DE L'ÉETHER ASSOCIÉ A LA MATIÈRE PONDÉRABLE, particulièrement sous forme d'atmosphères entourant les molécules. Cette sorte d'énergie, dont personne ne semble s'être préoccupé jusqu'ici, renferme le secret de tous les effets électriques¹³

Et la propagation de l'électricité est pour lui une propagation d'énergie, analogue à celle de la chaleur développée par Fourier, sur la base de la conservation des énergies. Ledieu se sert donc bien également des analogies. Mais il se réfère davantage à une relation entre théories : « Ce que nous venons de dire pour la transmission de la chaleur est applicable mot à mot à la propagation de l'électricité. »

La relation d'isomorphisme qu'il utilise de manière implicite montre que le statut qu'il accorde à une vraie analogie est celui que l'on retrouve dans l'analogie mathématique, celle des relations. Son qualificatif de « fausse », attribué à l'analogie avec le modèle hydraulique ou mécanique, correspondrait donc à une relation faible, non réversible, et qui ne pourrait donc pas servir d'argument en faveur de la théorie qu'elle est sensée représenter dans le modèle construit.¹⁴

13. [Ledieu 1882c, 755]. Les majuscules sont de Ledieu.

14. Il se contredit pourtant quand il donne une autre image de cette propagation qui est celle de la série de billes suspendues et en contact les unes les autres qui se comporte comme un « conducteur de travail », la différence avec ce qu'il dénonce chez Decharme n'est pas évidente, c'est bien un modèle mécanique qui lui permet d'illustrer la transmission de l'énergie.

Decharme ne reste pas indifférent à l'allusion de Ledieu et répond rapidement dans une note où il conclut dans un premier temps sur ses expériences d'imitation des phénomènes d'électricité et de magnétisme :

Après avoir imité, au moyen de courants liquides ou gazeux, dans de nombreuses expériences, les principaux phénomènes d'électricité statique ou dynamique, d'électromagnétisme et d'induction, d'électrochimie et même de physiologie, je me crois autorisé à conclure de l'analogie des effets à l'analogie des causes, à savoir que les phénomènes électriques ou magnétiques sont assimilables aux phénomènes hydrodynamiques ; c'est-à-dire que l'électricité sous forme de courant (d'éther ou de matière pondérable) est analogue à un courant liquide, et, à l'état de tension, est analogue à une certaine quantité de liquide se répandant en jet. On sait, d'ailleurs, que plusieurs lois de l'écoulement de l'électricité conviennent aussi à l'écoulement des liquides. [Decharme 1882h, 913]

La relation de causalité est ici appliquée de façon originale à l'analogie : l'effet est le courant électrique analogue à un courant d'eau et la cause est la tension électrique, qui serait analogue à une différence de pression, ce que Decharme n'exprime pas clairement. On peut cependant qualifier cette analogie d'analogie structurelle, la structure en question étant une structure logique de cause à effet.

On peut assimiler les flux thermiques et électriques au flux liquide, et « la théorie des ondes, qui explique déjà tous les phénomènes de la lumière, de la chaleur et du son, semble donc être le secret de la nature ». L'analogie permet donc de construire une théorie plus générale, celle des ondes. Mais nous pouvons dénoter que cette théorie aura le caractère essentiel d'une théorie mathématique.

On retrouve une allusion plus critique à ce mode de raisonnement dans le compte-rendu de Bertin des travaux de C.A. Bjerknæs :

Après cette étude si complète et si intéressante, qui aboutit à constater l'analogie parfaite des corps vibrants avec les corps électrisés ou aimantés, peut-on conclure, avec M. Bjerknæs, de l'analogie des effets à l'identité des causes et dire que l'électricité et le magnétisme sont dus à des mouvements vibratoires ? [...] Il est évident qu'une pareille conclusion n'a rien de légitime. Il faudrait autre chose pour assigner logiquement une origine vibratoire aux phénomènes d'électricité et du magnétisme : il faudrait notamment y démontrer l'interférence, ce qu'on n'a pas encore fait. [Bjerknæs 1882, 283]

Ces fondements de la réflexion sur la nature des phénomènes sont évidemment en contradiction avec les vues de Ledieu « qui repousse l'idée de

flux et d'ondes ». Refusant évidemment le qualificatif de « fausses » aux analogies qu'il a développées, Decharme contre-attaque en soulignant la faiblesse des arguments de Ledieu car ses hypothèses sont « impossibles à soumettre au contrôle de l'expérience », ce qui est à l'opposé de son travail qu'il présente comme essentiellement expérimental, appuyant l'analogie constatée. La polémique est engagée sur un fond de bataille entre les tenants d'un rationalisme comme Ledieu et ceux dont nous pourrions dire qu'ils ont une orientation pragmatique.

Ledieu, dans sa réponse [Ledieu 1882d, 1026-1030] invoque une « inexorable logique » qui lui interdit de suivre le raisonnement analogique de Decharme. Il est nécessaire pour lui de faire appel au « cycle du raisonnement » [Ledieu 1882d, 1026] qui se caractérise par quatre phases :

- observations et expériences *a priori*
- induction conduisant à une théorie générale
- déductions obtenues par des raisonnements rigoureux
- vérification expérimentale *a posteriori*.

Le cycle doit être parcouru intégralement et « de façon absolument correcte dans tous ses détails », et pour Ledieu, c'est cette rigueur du raisonnement qui n'est pas réalisée dans l'hypothèse des courants électriques. Les déductions qui découlent de cette hypothèse (qu'il juge erronée) sont pour lui « mécaniquement inadmissibles », et comme la troisième phase de son raisonnement n'est pas réalisée, ceci retire toute valeur démonstrative aux expériences qui sont sensées les vérifier. Tout en regrettant que Decharme n'ait pas discuté de sa théorie de l'électricité, il poursuit par une critique de l'idée d'ondes qu'avance « l'habile physicien » sous l'angle cinématique (mathématique) alors qu'il vaudrait mieux choisir l'angle dynamique. Il ajoute que certaines figures obtenues par Decharme peuvent également s'expliquer dans le cadre de sa théorie et ne constituent donc pas des preuves décisives. L'argument de Decharme à propos de la loi d'Ohm (les formules d'Ohm sont basées sur la notion de flux électrique ou thermique) est également rejeté, car Ledieu considérerait la loi d'Ohm revue sous l'angle de sa théorie, qui rejette l'hypothèse des courants électriques. Mais nous sommes plus concernés par les réflexions sur les phénomènes hydrodynamiques, Ledieu n'y voit que de « simples apparences », une relation de similitude :

Ceux de ces phénomènes pour lesquels il paraît y avoir actions réciproques de courants liquides ne constituent, en particulier, que de simples apparences. Autrement dit, les mouvements résultant des actions et réactions normales des molécules liquides des deux courants ainsi que de leurs vitesses

acquises, sont seulement semblables aux mouvements qui tendraient à se produire, si les veines liquides étaient solidifiées et formaient deux corps rigides s'influençant mutuellement. [Ledieu 1882d, 1028]

La suite de l'argumentaire de Ledieu nous conduit à mettre en cause son raisonnement :

De leur côté, les effets électriques, que M. Decharme prétend être analogues aux dits phénomènes, se manifestent uniquement par les attractions ou répulsions de conducteurs métalliques, que des courants problématiques sont censés parcourir. Ici les influences mutuelles sont des réalités, puisqu'on est en présence de fils à l'état solide. [Ledieu 1882d, 1028]

L'argument de réalité, dans la ligne positiviste, semble lié à l'attraction gravitationnelle dont l'influence devrait pourtant être négligée devant l'action mutuelle des courants.

Par contre, l'explication des faits nécessite *une mécanique conventionnelle*, quand on veut la baser sur la supposition du flux électrique. En conséquence, les deux sortes de phénomènes comparés n'ont qu'une *fausse analogie* dans leurs effets, et n'ont aucune analogie possible dans leurs causes. La double analogie que M. Decharme s'est proposé « de justifier surabondamment », s'évanouit donc devant une série d'évidences de raison. [Ledieu 1882d, 1028]

En reprenant cet argument de fausse analogie, Ledieu ne peut que conclure à l'absence d'analogie de cause. Il récuse ensuite l'accusation de l'impossibilité de contrôle expérimental de ses hypothèses, rappelant que, puisqu'elles se soumettent au cycle du raisonnement, elles prennent un degré de probabilité suffisant. La question de la matérialité des atomes d'éther s'appuie sur la loi de conservation des énergies et comme il peut appliquer à cette question son cycle du raisonnement, Ledieu précise :

En fermant ledit cycle relatif à la matérialité de l'éther au moyen des phénomènes électriques, on obtient un degré de probabilité très satisfaisant pour ma conception de l'énergie potentielle éthéro-pondérable. Car, comme je le dis dans ma Note du 30 octobre, §XI, les déductions rigoureuses de ladite conception mènent aux mêmes formules que les déductions inexactes basées sur le flux électrique, et par suite bénéficient légitimement des vérifications a posteriori bien connues de ces formules. [Ledieu 1882d, 1029]

Si Ledieu a une foi inébranlable dans sa vision des faits, il ne voit pas l'insuffisance de son raisonnement puisqu'il fonde la validation de ses idées sur la coïncidence avec les formules de la théorie contre laquelle il se bat, et qui sont évidemment vérifiées expérimentalement. Or, nous

savons qu'une série de faits expérimentaux peut s'expliquer dans des cadres théoriques différents. Trancher pour une théorie ou pour une autre nécessiterait le recours à une expérience cruciale, ce qui est impossible, selon la thèse de Duhem - Quine.

Decharme revient à la charge à son tour et argue de l'étendue du champ expérimental représenté par ses analogies hydrodynamiques ; [Decharme 1882i]. Il ajoute à l'exactitude de ses imitations l'exemple des anneaux de Nobili,¹⁵ où la correspondance est très grande (« tout est pareil »), y compris l'équation différentielle des courbes obtenues qui « convient à la fois aux courbes équipotentielles d'écoulement hydraulique et électrique ». Il est à noter ici que pour Decharme, l'analogie formelle donne à cette relation un caractère de réalité : pour lui, cet exemple suffit à « prouver la réalité d'analogie entre les deux ordres de phénomènes, c'est à dire l'assimilation du flux électrique à un flux liquide ». Decharme considère que le nombre et la vigueur des analogies, portant jusqu'à des détails, jusqu'à l'identité vont à l'encontre d'une apparence trompeuse. Il utilise ici un raisonnement inductif portant sur la multiplicité des analogies qui justifie ainsi la force de la relation existant entre les deux domaines.

Le réalisme de sa position apparaît quand il affirme :

J'estime toutefois que ces attractions, ces répulsions, ces vibrations énergiques que j'obtiens, ces fantômes hydrauliques si exactement analogues aux fantômes magnétiques, ces anneaux si nettement développés en ondes comme ceux de Nobili, etc., ont bien quelque chose d'aussi réel que les points physiques (sans dimensions) ou centres de force que les atomes doublés de forces, que les transformations de l'énergie potentielle de la matière éthérée, associée à la matière pondérable, une énergie de transport ou de mouvement d'ensemble de l'éther, et que cette distinction subtile entre la matière et la substance ; choses abstraites sur lesquelles s'appuie la conception de M. Ledieu, et qui rappellent naturellement cette excellente règle de Newton : « La grande, la principale affaire qu'on doit se proposer en Physique, c'est de raisonner sur des phénomènes, sans le secours d'hypothèses imaginaires. » [Decharme 1882i, 1274-1275]

Il a une position nettement empirique et il rappelle la formule de Descartes :

Ce qui fait la force de l'esprit moderne, c'est d'avoir vu que l'expérience est tout.¹⁶

15. Leopoldo Nobili (1787-1835), physicien italien, connu pour ses travaux en électricité.

16. Référence donnée dans l'article de Decharme : Descartes, *Traité d'optique*, t. II, 523.

Ledieu bien qu'ayant déclaré à la fin de sa note précédente l'arrêt de toute discussion ne portant pas sur sa théorie, revient sur le problème des anneaux de Nobili [Ledieu 1883, 98-102], en discute les divergences avec les anneaux de Decharme et exclut à nouveau l'analogie car on doit « tenir compte du fait que le potentiel et le courant électriques ne sont que des symboles », alors que leur analogue, la température, est une grandeur dynamique. Ce que Ledieu sous-entend par symbole, c'est qu'il représente une grandeur sans rapport direct au réel, alors que les grandeurs qu'il emploie sont définies uniquement par des relations avec l'énergie qui est, pour lui, bien réelle. Il se place ici dans le cadre positiviste qui interdit l'élaboration d'hypothèses qui n'aient pas un rapport direct au réel. Il est à noter que Decharme se place également dans cette optique puisqu'il utilise des arguments identiques contre Ledieu, mais ne donne pas la même interprétation que son interlocuteur à la notion de réel, les analogies qu'il développe ayant bien ce caractère à ses yeux.

A l'objection d'abstraction, Ledieu oppose le critère de rationalité, refuse le raisonnement fondé uniquement sur l'expérience :

On est exposé à partir d'une induction fausse, puis à se tromper dans la déduction, et enfin à s'illusionner totalement, en arrivant par compensation d'erreurs à la prévision d'expériences parfaitement vérifiables a posteriori. Il importe donc de se mettre en garde contre le principe qui a cours aujourd'hui chez nombre d'auteurs : qu'une loi se justifie par ses conséquences. Cette justification est, à la vérité, nécessaire pour l'existence de la loi ; mais elle n'est pas suffisante. [Ledieu 1883, 101-102]

À la lecture de ces notes, nous reconnaissons deux conceptions qui s'opposent sur le raisonnement scientifique :

- l'une qui privilégie la déduction à partir d'hypothèses à caractère théorique, qui se dit rationnelle et qui annonce une physique axiomatique,
- l'autre qui privilégie l'expérience, non uniquement empiriste mais aussi pragmatique, dont les preuves peuvent être trouvées par l'analogie avec un autre domaine.

Le cycle du raisonnement décrit par Ledieu n'est pas propre à son cadre de pensée, on le retrouve exprimé par Poincaré, mais c'est une de ses phases qui est davantage mise en valeur par l'un ou l'autre des deux protagonistes. L'argumentation de Decharme montre que l'analogie prend un caractère de preuve, par une extension de la notion de preuve expérimentale.

L'usage des modèles mécaniques ou hydrauliques n'est donc pas à limiter à ce caractère démonstratif qu'utilisent les pédagogues à la re-

cherche d'appui à leurs assertions. Ils peuvent prendre chez les savants un rôle heuristique et participer ainsi autant que les classiques preuves expérimentales à la construction de la théorie.

Ce n'est pas du tout l'avis de Pierre Duhem.

3.2 Le point de vue de Duhem

Duhem consacre tout un chapitre de son ouvrage, *La théorie physique, son objet - sa structure*, [Duhem 1906, 77-154], à démontrer cette forme de pensée qui a besoin de garder un contact physique permanent avec une représentation matérielle des théories. Les reproches qu'il avance à l'encontre de ces pratiques sont nombreux :

- Manque de clarté dans l'exposé des théories : « Nous nous trouvons dans une usine » (à propos de l'ouvrage de Lodge). Un effort est ainsi demandé au lecteur français dans la compréhension même de ces artefacts, alors qu'il lui suffirait de pénétrer directement la théorie abstraite, sans cet artifice.
- L'usage des modèles mécaniques montre une « défaillance de la faculté d'abstraire, une victoire de l'imagination sur la raison ». Or, les éléments de la théorie « ne sont nullement semblables aux corps visibles et concrets [. . .], ils sont formés de manière abstraite, idéale [. . .] ». Bâtir une théorie ne peut se faire que dans un processus d'abstraction.¹⁷ Duhem englobe tous les physiciens anglais dans une même famille, ils n'ont qu'un objet : « Créer une image visible et palpable des lois abstraites que son esprit ne pourrait saisir sans le secours de ce modèle. »
- La théorie n'est pas construite rationnellement, conformément à la logique, mais pour le plaisir de l'imagination. Le physicien enclin aux modèles rejette le principe de non-contradiction, notamment quand deux modèles différents représentent la même théorie. Il accuse par ailleurs Poincaré d'être à la source de la diffusion de ces modes de raisonnement des Anglais et rappelle ses écrits dans l'introduction d'*Électricité et Optique* :

On ne doit pas se flatter d'éviter toute contradiction ; mais il faut en prendre son parti. 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, et, peut-être, la lecture de Maxwell serait-elle moins suggestive s'il ne nous

17. Oliver Heaviside exprime le même avis : [Heaviside 1971, §40]

avait pas ouvert tant de voies nouvelles divergentes. [Poincaré 1901, V]

- « Le goût de l'exotisme, le désir d'imiter l'étranger », tendance de « snobs » destinées selon Duhem à faire oublier le manque d'aptitude au raisonnement rigoureux de ceux qui professent ces idées.
- Le travers de l'utilitarisme qui apparaît chez les industriels et les ingénieurs qui se satisfont de ces idées qui parlent à leur imagination. Ledieu avait mis en garde également contre les idées des ingénieurs et sur le fait que leur adoption des résultats des théories ne les justifiait pas pour autant. L'adoption d'une théorie par la communauté d'idées ne la valide pas, mais notamment dans l'exemple de la théorie de Maxwell, elle joue un rôle essentiel dans sa diffusion
- L'illusion d'une souplesse et liberté d'esprit qui seraient fécondes en découvertes. Le modèle présenté par son auteur comme étant à la source de la découverte n'est-il pas au contraire bâti après la théorie abstraite dans une perspective de présentation ?

Mais, à tous les arguments qu'il avance, Duhem ajoute :

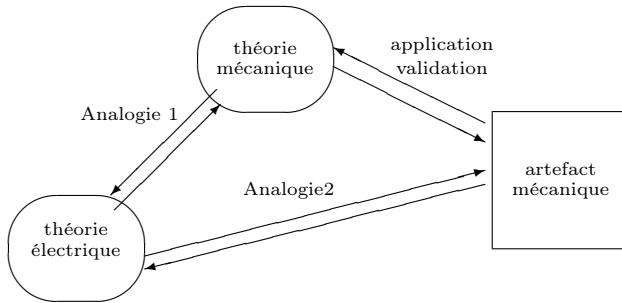
Comment répondrons-nous à cette question, qui, à l'heure actuelle, se pose à nous d'une manière si pressante : Est-il permis de symboliser soit plusieurs groupes distincts de lois expérimentales, soit même un groupe unique de lois, au moyen de plusieurs théories dont aucune repose sur des hypothèses inconciliables avec les hypothèses qui portent les autres ? A cette question, nous n'hésitons pas à répondre ceci : SI L'ON S'ASTREINT A N'INVOQUER QUE DES RAISONS DE LOGIQUE PURE, on ne peut empêcher un physicien de représenter par plusieurs théories inconciliables soit des ensembles divers de lois, soit même un groupe unique de lois ; on ne peut condamner l'incohérence dans la théorie physique. [Duhem 1906, 148]

Le fait est indépendant de la description et plusieurs descriptions peuvent donc coexister. Duhem laisse apparaître ici un certain réalisme, qui lui permet d'établir un lien direct entre la théorie et les faits. Le modèle mécanique est alors inutile dans la représentation de la réalité.

4 Conclusion

Finalement, Duhem ne rejette pas complètement l'usage des modèles, cela peut convenir à certains esprits « amples et faibles ». Notons de plus qu'il admet au contraire l'analogie et la juge fructueuse. On a beaucoup

opposé Duhem à Campbell qui fut un grand défenseur de l'usage des modèles dans les théories scientifiques. En réalité, si nous nous référons aux arguments de D.H. Mellor [Mellor 1968], leurs deux thèses étaient relativement proches. Finalement, le modèle mécanique au sens de Duhem doit être considéré dans un premier temps dans ses relations avec la théorie mécanique dont il dérive directement, puis par l'intermédiaire de cette théorie, dans les relations d'analogie avec la théorie qu'il est sensé illustrer :



relations entre artefact, théorie mécanique et théorie électrique

L'attitude de Duhem est de ne considérer que l'analogie (1) entre les théories et de rejeter celle qui existe (2) entre la théorie *explanandum* et le modèle mécanique issu de l'autre théorie (*explanans*). Nous pouvons quand même remarquer que la construction du modèle ne peut se justifier que comme une application de la théorie mécanique qu'il représente directement par une relation d'application et de validation expérimentales et que cet artefact - modèle n'a de sens comme analogue d'une autre théorie que si une relation d'analogie existe entre les deux théories, ici mécanique et électrique. Marshall Spector donne un point de vue semblable :

Notice that there is no question of identifying the ether with the actual gadgetry in a constructed model, just as for a 19th century physicist there is no question of identifying the molecules of the kinetic theory of gases with actual billiard balls (which are made of ivory, have numbers on them, etc.). The proposed identity would be between the molecules and elastic spheres, which are exemplified by billiard balls ; or between the ether and an array of springs, etc., which is exemplified by the gadget on the laboratory bench. [Spector 1965, 129]

Ce que Marshall Spector donne comme un exemple correspond à cette relation existant entre la théorie mécanique et l'artefact.

Cependant, les réflexions de Duhem le conduisent à cette idée : Que l'on tente d'expliquer le monde, ce qui est le but de la science, doit conduire à une seule explication, mais les chemins, débarrassés d'une contrainte de logique forte, peuvent être multiples. La vérité scientifique est unique pour Duhem et elle ne peut donc être formulée de différentes façons. Ceci va à l'encontre du fait que différentes explications peuvent s'appliquer à un phénomène et qu'une explication analogique pourrait exister.

Finalement, on peut considérer le modèle mécanique ou hydraulique comme une des voies dont certains savants ont éprouvé la nécessité, mais qu'il ne faut pas dévaloriser par rapport à une démarche plus abstraite. Il ne faut surtout pas l'écartier dans ces moments où les sciences progressent, et, comme les analogies de façon plus générale, il faut le considérer dans la phase de découverte, où, contre les affirmations de Duhem, sa faiblesse en constitue la force réelle.

5 Références bibliographiques

BJERKNES, CARL ANTON

- 1877 Remarques historiques sur la théorie du mouvement d'un ou plusieurs corps de formes constantes ou variables, dans un fluide incompressible ; sur les forces apparentes qui en résultent et sur les expériences qui s'y rattachent. *C.R.A.S.*, 84, note présentée par Hermite, 11 juin 1877, 1375-1377.
- 1879a Hydro-électricité et Hydromagnétisme, résultats analytiques. *C.R.A.S.*, 88, 165-167.
- 1879b Hydro-électricité et Hydromagnétisme, résultats expérimentaux. *C.R.A.S.*, 88, 280-282.
- 1879c Expériences hydrodynamiques avec des corps vibrants, et imitation, dans un sens inverse, des forces de l'électricité et du magnétisme. *C.R.A.S.*, 89, 144-146.
- 1881 Sur l'imitation, par la voie hydrodynamique, des actions électriques et magnétiques. *C.R.A.S.*, 93, 303-305.
- 1882 Phénomènes hydrodynamiques inversement analogues à ceux de l'électricité et du magnétisme. Compte-rendu par M. Bertin. *Annales de Chimie et de Physique*, XXV ; 257-284.
- 1915 *Hydrodynamische Fernkräfte*. Leipzig : Engelmann.

BOLMONT, ETIENNE

1999 *Le rôle épistémique des analogies à l'exemple de l'électricité, du magnétisme et de l'électromagnétisme au 19^e siècle*. Thèse soutenue le 4/1/99 à l'Université de Nancy II.

CAMPBELL, NORMAN

1921 *What is Science ?* Cité selon la réédition : New York : Dover, 1953.

DECHARME, CONSTANTIN

1882a Expériences hydrodynamiques : imitation, par les courants liquides, des phénomènes d'électromagnétisme. *C.R.A.S.*, 94, 440-442.

1882b Expériences hydrodynamiques : imitation, par les courants liquides, des phénomènes d'électromagnétisme et d'induction. *C.R.A.S.*, 94, 527-529.

1882c Expériences hydrodynamiques (3^e note) : imitation directe, par les courants liquides, des actions des courants électriques les uns sur les autres. *C.R.A.S.*, 94, 643-646.

1882d Expériences hydrodynamiques (4^e note) : imitation, par les courants liquides, anneaux de Nobili, obtenus avec les courants électriques. *C.R.A.S.*, 94, 722-723.

1882e Expériences hydrodynamiques : imitation, par les courants liquides ou gazeux, des fantômes magnétiques obtenus avec les courants électriques ou les aimants. *C.R.A.S.*, 95, 340-342.

1882f Expériences hydrodynamiques (7^e note) : imitation, par les courants liquides ou gazeux, des stratifications de la lumière électrique dans les gaz raréfiés, et de diverses formes de l'étincelle électrique. *C.R.A.S.*, 95, 387-388.

1882g Expériences hydrodynamiques : Imitation, par les courants liquides, des anneaux de Nobili, obtenus avec les courants électriques. *Annales de Chimie et de Physique*, XXV, 199-216.

1882h Conclusions des expériences hydrodynamiques d'imitation des phénomènes d'électricité et de magnétisme. Réponse à une note de M. Ledieu. *C.R.A.S.*, 95, 913-915.

1882i Réponse à M. Ledieu, au sujet des analogies entre les phénomènes hydrodynamiques et électriques. *C.R.A.S.*, 95, 1273-1275.

1883a Nouvelles expériences d'imitation des anneaux électrochimiques, par les courants d'eau continus. *C.R.A.S.*, 96, 558-559.

1883b Expériences hydrodynamiques : imitation, par les courants liquides ou gazeux, de divers effets physiques obtenus au moyen de

l'électricité ou du magnétisme. *Annales de Chimie et de Physique*, XXIX, 404-427.

1884 Nouvelles expériences d'imitation par voie hydrodynamique des effets de polarité dans les anneaux électrochimiques. *La Lumière Électrique*, XII; 361-364.

DUHEM, PIERRE

1906 *La théorie physique, son objet - sa structure*. Paris : Chevalier et Rivière, cité d'après la réédition de Vrin, 1993.

EULER, LEONHARD

1768 *Lettres à une Princesse d'Allemagne*. Opera omnia, Saint Petersburg, d'après la réédition Speiser, 1960; lettres CLXXVI, CLXXVIII.

FORBES, GEORGE

1881 Hydrodynamic analogies to electricity and magnetism. *Nature*, 18 août 1881, 360-361.

HEAVISIDE, OLIVER

1971 *Electromagnetic Theory*, Third Edition. New-York : Chelsea Publishing Company. Préface de E.T. Whittaker.

HESSE, MARY

1966 *Models and analogies in Science*. Notre-Dame : Notre-Dame Univ. Press.

LEDIEU, ALFRED

1882a Objections d'ordre mécanique à la théorie actuelle de l'électricité. *C.R.A.S.*, 95, 619-623.

1882b Conception rationnelle de la nature et de la propagation de l'électricité, déduite : 1° de la considération de l'énergie potentielle de la matière éthérée, associée à la matière pondérable ; 2° du mode de production et de transmission du travail, provenant des variations de cette énergie. *C.R.A.S.*, 95, 669-673.

1882c Conception rationnelle de la nature et de la propagation de l'électricité, déduite : 1° de la considération de l'énergie potentielle de la matière éthérée, associée à la matière pondérable ; 2° du mode de production et de transmission du travail, provenant des variations de cette énergie (suite). *C.R.A.S.*, 95, 753-757.

1882d Réponse aux objections de M. Decharme sur ma conception rationnelle de la nature de l'électricité. Preuves de la validité des hypothèses servant de base à cette conception. *C.R.A.S.*, 95, 1026-1030.

1883 Examen de l'analogie entre les anneaux électrochimiques et hydrodynamiques et les courbes $DV=0$. Meilleur procédé de discussion dans la méthode expérimentale. *C.R.A.S.*, 96, 98-102.

LODGE, OLIVER

1891 *Les théories modernes de l'électricité, essai d'une théorie nouvelle*. Paris : Gauthier-Villars.

MELLOR, D.H.

1968 Models and Analogies in Science : Duhem versus Campbell? *Isis*, 59 ; 282-290.

NAGEL, ERNEST 1961 *The Structure of Science*. London : Routledge & Kegan Paul.

POINCARÉ, HENRI

1891 *Électricité et Optique*, première édition. Paris : Carré.

1901 *Électricité et Optique*, deuxième édition. Paris. Cité selon la réimpression de 1990. Paris : Jacques Gabay.

LORD RAYLEIGH

1890 On Huyghens's Gearing in illustration of the Induction of Electric Currents. *Philosophical Magazine*, (may 16, 1890), 30-32.

SPECTOR, MARSHALL

1965 Models and Theories. *British Journal for the Philosophy of Science*, 16.

THOMSON, WILLIAM (LORD KELVIN)

1884a *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*. Londres : MacMillan.

1884b *Lectures on Molecular Dynamics, and the Wave Theory of Light*. Baltimore : John Hopkins University.