الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
—
Université
Yahia FARES de MEDEA

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
—
جامعة يحي فارس بالمدية

Faculté des Sciences

كليــة العلــوم

POLYCOPIE DE COURS

« ÉPISTÉMOLOGIE»

Auteur :

HOUATIS Djamel

Destiné aux étudiants de

Discipline : Physique

Spécialité : Physique Théoriquen, Physique des matériaux

Niveau : 1ère année Master

Année : 2020/2021

Approuvé par le Conseil Scientifique de la Faculté en date du : 02/12/2020

Préface

Je crois qu'au-delà des résultats des théories et des modèles de physique appris en classe tout au long de leur carrière académique, les étudiants ne devraient pas limiter leur définition de la compréhension à des règles spécifiques de logique et de preuve, ils ont besoin d'apprendre de quelle nature sont ces connaissances produites, quel est leur statut et comment elles sont élaborées. Pour cela, ce support pédagogique d'épistémologie vient pour atteindre cet objectif.

Ce polycopié, est né d'un besoin urgent lorsque j'enseignais l'épistémologie de la physique à des étudiants en Master physique. Ces étudiants n'ont normalement aucune formation philosophique et épistémologique. Ils ont une certaine connaissance de l'histoire des sciences et de l'histoire de la physique qu'ils ont couverte lors de leur formation en licence. Ces deux disciplines sont très utiles à l'épistémologie, elles sont étroitement liées à l'épistémologie et nombreux concepts physiques nécessitent un apport historique et épistémologique pour être compréhensible.

Ce polycopié de cours sur l'épistémologie est donc destiné aux étudiants de niveau Master première année, filière physique appartenant au domaine « *Sciences de la Matière* », spécialité : *physique théorique* et *physique des matériaux*. Il est en conformité avec les nouveaux programmes après l'opération de "l'harmonisation des formations Masters" et approuvés en 2016 par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique en Algérie.

La structure de ce polycopié est quadripartite. Au premier chapitre, nous souhaitons transmettre une compréhension de ce qu'est l'épistémologie ? Suivi d'une présentation sur les principaux courants épistémologiques. Ensuite, certaines particularités des rapports de l'histoire des sciences et de l'épistémologie y sont données. Le deuxième chapitre est proposé dans l'objectif d'illustrer la structure d'une théorie physique, un exposé est donné sur la signification, le rôle, le statut et les relations entre les différents outils d'acquisition et de structuration des connaissances (les théories, les hypothèses, les principes et les lois…). Le besoin de normes générales de la pensée scientifique est une exigence épistémologique, c'est pourquoi une synthèse de ces critères est donnée étayée par de nombreux exemples de la physique. L'objectif du troisième chapitre est de cerner la nature de la théorie scientifique à travers son lien avec les facultés de perceptions dans leurs pleines acceptions : diversités et amplitudes de degrés d'abstraction. Dans ce contexte, un exposé est donné sur la place de l'expérience et de l'observation dans l'élaboration des connaissances des sciences empiriques.

Les théories et les modèles sont des concepts fondamentaux en sciences physiques. La discussion sur ces concepts est intense parmi les épistémologues et de nombreuses opinions ont été avancées. Au quatrième chapitre, une tentative de

réponse à la question : qu'est-ce qu'un modèle en physique ? y est suggérée. Un exposé est fait des différents sens du mot "modèle" en physique avec illustration par des exemples. Suivi d'une analyse des différents types de modèle en physique précisant leurs rôles et leurs intérêts. Enfin certaines particularités épistémologiques des modèles y sont données, en mettant l'accent sur ce que différencie le terme modèle du concept théorie.

Notez qu'en plus de la rédaction des textes de ce polycopié en langue française, j'ai trouvé utile de laisser certains textes inspirés d'œuvres arabes originales dans leur langue natale car ils contiennent des significations précises et particulières qui peuvent nous apporter incontestablement des enrichissements significatifs.

Table des matières

PREFACE II

TABLE DES MATIERES IV

LISTE DES FIGURES VI

LISTE DES TABLEAUX VII

CHAPITRE I : INTRODUCTION À L'ÉPISTÉMOLOGIE 10

I.1. DEFINITION DE L'EPISTEMOLOGIE 10
I-1.1. Morphologie du mot épistémologie 10
I-1.2. Science et connaissance 11
I-1.3. Épistémologie et épistémologies -essais de définitions- 13
I-1.4. Les objectifs et les champs d'étude de l'épistémologie 14
I-1.5. Bref rappel historique 15

I.2. NECESSITE DE L'EPISTEMOLOGIE 16

I.3. PRINCIPAUX COURANTS EPISTEMOLOGIQUES 18
I-3.1. Le rationalisme. 19
I-3.2. L'empirisme. 22
I-3.3. Le positivisme. 22
I-3.4. Le constructivisme. 24
I-3.5. Le réalisme scientifique. 25

I.4. LES RAPPORTS DE L'HISTOIRE DES SCIENCES ET DE L'EPISTEMOLOGIE 26

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉ SUR LES THÉORIES PHYSIQUES 30

II-1. Définitions : Théorie, Hypothèse et axiome 30
II-1.1. Différences spécifiques entre hypothèse et axiome 32

II-2. Définitions : loi, principe, concept 33
II.2.1. La loi physique 33
II.2.2. Le principe physique 35
II.2.3. Le concept physique 36

II-3. La causalité rationnelle et la causalité empirique 39
II.3.1. Les différentes théories de la causalité 39
II.3.2. Extension et reformulation du concept de causalité. 43

II-4. Déterminisme et Indéterminisme 45
II.4.1. La formulation du déterminisme 46
II.4.2. La formulation du l'indéterminisme 48

II-5. Continuité et Discontinuité 54
II.5.1. Manifestations de la discontinuité 54
II.5.2. Manifestations de la continuité 55

II-6. Physique et expérimentation 57
II.6.1. La démarche scientifique : rupture arabo-musulmane 57
II.6.2. L'expérimentation en physique : 58

II-7. Physique et mathématique 62
II.7.1. Rapports entre la physique et les mathématiques. 62
II.7.2. Réflexion épistémologique des liens entre mathématiques et physique 65

CHAPITRE III : NATURE DES THÉORIES ET DES RAISONNEMENTS EN PHYSIQUE 70

III.1. Science et perception sensitive 70
III.1.1. Lien entre théorie scientifique et perception. 70
III.1.2. La perception extérieure. 73
III.1.3. La perception intérieure. 75

III.2. Sciences rationnelles - jugement rationnel et la déduction 80
III-2.1. Le jugement rationnel et la déduction. 82

III.3. Sciences empiriques – jugement empirique et l'induction 84
III.3.1. Le jugement empirique et l'induction. 84

III.4. Le fondement empirique et la nature de l'observation. 86
III.4.1. L'expérience comme assise empirique. 86
III.4.2. La nature de l'observation. 87

CHAPITRE IV : LA NOTION DE MODÈLE ET MODÉLISATON EN PHYSIQUE 91

IV.1. Définition de concept modèle 91
IV.1.1. Les différents sens du mot « modèle ». 92

IV.2. Les différents types de modèle en physique 108
IV.2.1. Les modèles mécaniques. 108
IV.2.2. Les modèles mathématiques. 112
IV.2.3. Les modèles quantitatifs. 114
IV.2.4. Les modèles qualitatifs. 117

IV.3. Modèles et explications scientifiques. 121
IV.3.1. Les particularités épistémologiques des modèles. 121
IV.3.2. Modèles et explications scientifiques. 124

IV.4. Théorie et modèle 126
Références bibliographiques 127

Liste des figures

FIGURE 1: MORPHOLOGIE DU MOT EPISTEMOLOGIE 10
FIGURE 2: DEFINITION DE L'EPISTEMOLOGIE : 13
FIGURE 3: COURANTS EPISTEMOLOGIQUES 19
FIGURE 4: RAPPORT DE L'HISTOIRE DES SCIENCES ET DE L'EPISTEMOLOGIE 27
FIGURE 5: ÉLEMENTS CONSTITUTIFS D'UNE THEORIE 32
FIGURE 6: LE PHENOMENE DE L'EBULLITION DE L'EAU 41
FIGURE 7: INTERACTION DE DEUX ELECTRONS. UN PHOTON Γ EST EMIS PAR UN ELECTRON ET EST ABSORBE PAR L'AUTRE ELECTRON. LE PHOTON EST VIRTUEL OU EN DEVENIR. 45
FIGURE 8: SYSTEME HARMONIQUE 47
FIGURE 9: DISCONTINUITE DE LA MATIERE. 54
FIGURE 10: DECOMPOSITION DE LA LUMIERE EN ONDELETTES PAR HUYGENS. 56
FIGURE 11: L'EXPERIENCE DE MICHELSON-MORLEY 59
FIGURE 12: EXEMPLE D'ILLUSIONS OPTIQUES 76
FIGURE 13: APPROCHE DEDUCTIVE 84
FIGURE 14: APPROCHE INDUCTIVE 85
FIGURE 15: LE MOUVEMENT BROWNIEN DECRIT PAR LE CENTRE DE GRAVITE D'UNE PARTICULE DE POLLEN EN SUSPENSION 92
FIGURE 16: ILLUSTRATION DU PRINCIPE D'INERTIE A L'AIDE D'UNE BILLE ROULANT LIBREMENT SANS FROTTEMENT 96
FIGURE 17: MOLECULES DE GAZ ENFERMEES DANS L'ENCEINTE CUBIQUE. 97
FIGURE 18: REFERENTIELS INERTIELS EN MOUVEMENT DE TRANSLATION RECTILIGNE UNIFORME L'UN RAPPORT A L'AUTRE 104
FIGURE 19: UN VECTEUR LIE 109
FIGURE 20: MASSE LIEE A UN RESSORT SUR UN PLAN INCLINE 111
FIGURE 21: DEUX EXEMPLES DE CHAMP VECTORIEL 112
FIGURE 22: ANALOGIE ENTRE L'OSCILLATEUR MECANIQUE ET L'OSCILLATEUR ELECTRIQUE 115
FIGURE 23: LE MODELE DE BOHR DE L'ATOME D'HYDROGENE 118
FIGURE 24: LE MODELE DE LA GOUTTE LIQUIDE 119
FIGURE 25: MODELE « CIRCUIT ELECTRIQUE - CIRCUIT HYDRAULIQUE » 120

Liste des tableaux

TABLE 1: DIFFERENCE ENTRE SCIENCE ET CONNAISSANCE. 13
TABLE 2: TABLEAU CHRONOLOGIQUE DE L'HISTOIRE DE LA CONCEPTION DE LA LUMIERE 72
TABLE 3: LES EQUATIONS DE MAXWELL SOUS FORME LOCALE ET INTEGRALE 100

Chapitre I : INTRODUCTION À L'ÉPISTÉMOLOGIE.

1. Définition de l'épistémologie
2. Nécessité de l'épistémologie
3. Principaux courants épistémologiques – Rationalisme – Empirisme – Positivisme - Constructivisme –Réalisme–
4. Les rapports de l'histoire des sciences et de l'épistémologie

Chapitre I : INTRODUCTION À L'ÉPISTÉMOLOGIE

Préambule

Bien que l'histoire des sciences soit jalonnée de débats épistémologiques, parfois très vifs, comme la polémique entre Galilée et les représentants de l'Église chrétienne ou encore le débat entre Ibn Rushd et Al-Ghazālī, *l'épistémologie* demeure encore peu ou mal connue des scientifiques.

Quand vous parler de la genèse de la démarche expérimentale et comparer l'expérimentation dans les sciences hier et aujourd'hui, vous faites de l'épistémologie. Un physicien qui discute l'incompatibilité entre la théorie de la relativité et celle de la mécanique quantique fait de l'épistémologie. Un chimiste qui discute le concept de substance chimique et examine des différences dans la structure et la fonction d'explication en chimie, physique et biologie ; fait de l'épistémologie.

Dans ce chapitre, nous tenterons en premier lieu de répondre à la question : qu'est-ce que l'épistémologie ? En second lieu, un exposé est fait des principaux courants épistémologiques. Enfin certaines particularités des rapports de l'histoire des sciences et de l'épistémologie y sont données.

I.1. Définition de l'épistémologie

Dans le présent paragraphe nous traiterons des questions liées à la signification et à la définition de *l'épistémologie*, nous nous intéresserons à la clarification du vocable *épistémologie* et à la richesse de sa sémantique.

I-1.1. Morphologie du mot épistémologie

Le terme épistémologie dérive de l'ancien mot grecque : ἐπιστήμη/λόγος qui veut dire : (Épistemê/Lógos) (Figure 1)

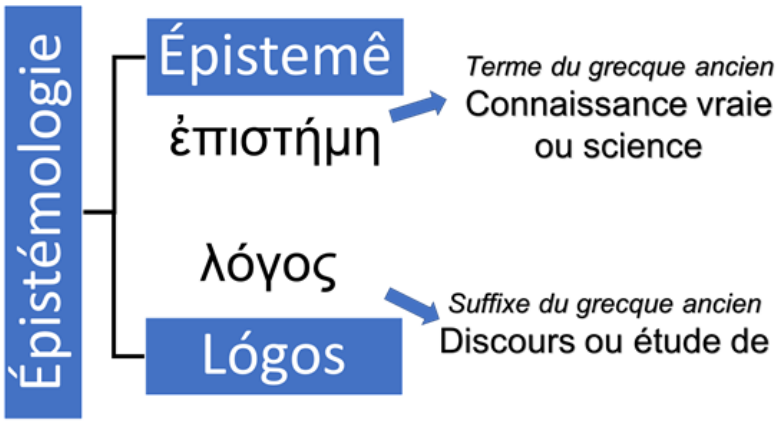


Figure 1: Morphologie du mot épistémologie

L'histoire de ce mot mérite intérêt. Il est assez récent (début du 20ème siècle). Le terme anglais « epistemology » a été composé d'après le grec par James Frederick Ferrier[1] en 1854, et le vocable français « épistémologie » apparait la première fois en 1908 par le chimiste-philosophe Émile Meyerson[2].

وعلى هذا المنوال فإن لفظ "عِلْمِياتِية" هي الكلمة الملائمة لترجمة مصطلح "الابستمولوجية"[3] باعتبارها ملازمة للعلم متعلقة بدراسته تبحث مبادئه وأصوله المنطقية. فعلماء الحضارة العربية الإسلامية إستعملوا هذا الفرع في شتى العلوم، الطبيعية منها و الدينية، دون أن يخصصوه باسم بل وزعوا مسائله على أبحاث النفس والوجود والعاقل والمعقول. حيث وُجِد هذا النوع من الأبحاث والدراسات مُدَون بشكل مبعثر وبصورة دقيقة و مفصلة في شتى العلوم كعلم الكلام، وأصول الفقه وعلم المنطق... فالعرب كغيرهم من علماء الإغريق ومن سبقوهم لم يفصلوا بين العلوم الطبيعية وبين الفلسفة والدين. فالتأملات الفلسفية الأولى في العلوم والمعرفة بشكل عام تعود إلى ما لا يقل عن 25 قرناً.

I-1.2. Science et connaissance

Le petit Robert définit la *«* science *»* comme :

> *"Un ensemble de connaissances, d'études d'une valeur universelle, caractérisées par un objet (domaine) et une méthode déterminée, et fondées sur des relations objectives vérifiables."*

La définition de la science proposée par le Robert attribue à cette forme de connaissance une certaine rigueur et une certaine objectivité. De plus, elle exige que les énoncés de la science soient soumis à une vérification devant se dérouler à deux niveaux:

- au niveau logique (de telle manière que la science possède une cohérence interne).
- au niveau empirique (s'assurer que les énoncés scientifiques sont conformes aux faits expérimentaux).

Il faut remarquer que parler de *« la science »* ou *« des sciences »* cache des sens différents. En effet, parler de la science au singulier, c'est mettre l'accent sur l'unité des sciences tout en mettant sous silence leurs différences. Parler des sciences au pluriel, c'est mettre en avant leur diversité, tant de part leur objet d'étude que par leurs méthodes.

1 Créa le néologisme « epistemology » dans son ouvrage " *Institutes of Metaphysics. The Theory of Knowing and Being"*.

2 Utilisa le vocable « épistémologie » dans son œuvre de philosophie des sciences physiques et chimiques "*Identité et réalité*"

3عبد الحميد، بن تشيكو (1991) : محاضرة، المدرسة العليا للأساتذة.

Le mot *« connaissance »* provient de *« connaître »* dont le sens étymologique est « *naissance simultanée »* (sous-entendu : du sujet et de l'objet de la connaissance) et que le Robert définit par :

> *- "Avoir présent à l'esprit un objet réel ou vrai (concret ou abstrait ; physique ou mental)"*
> *- "Être capable de former l'idée, le concept, l'image de… "*

La définition de la connaissance proposée par le Robert utilise l'expression *« objet réel ou vrai »*. Mais les questions qui se posent sont :

- Comment savoir si un objet est *« réel »* ou *« imaginaire »* ?
- Existe-t-il un critère de vérité ? La véracité n'est-elle pas propre à un système de propositions logiques donné ?

Pour Platon, la connaissance est *« une croyance vraie ».* Russel[4] définit la connaissance comme *« une croyance qui est en accord avec les faits ».* Ces deux dernières définitions s'appliquent, selon al-Jurjānī[5], à la science et non à la connaissance (Cf. les *définitions* ci-dessous).

al-Jurjānī fait une distinction nette entre la *science "العلم" et la connaissance* "المعرفة", il les définit comme suit :

- العلم هو الاعتقاد الجازم المطابق للواقع

i.e. *« La science est une croyance avérée en accord avec la réalité »*

- المعرفة هي إدراك الشيء على ما هو عليه

i.e. « La connaissance, c'est la perception des choses telles qu'elles sont »

نتيجة للتداخل بين مصطلحي العِلْمُ والمَعْرِفَة، لا بد من تَتَبُّع أصولهما اللُّغوية لضبط الفروق بينهما:

فأما العِلْمُ: فهو من العلامة، وهي الدَّلالة والإشارة، ومنه معالم الأرض والثَّوب، والمَعْلَمُ الأثر يُسْتَدَلُّ به على الطريق. والعلم نقيض الجهل قال عنه الفيروزآبادي: العلم حق المعرفة.

وأما المعرفة: فهي من العُرْفِ ضد النَّكْرِ. عَرَف الشيءَ: أدركه بحاسَّةٍ من حواسِّه. والمعرفة تُسْتَخدم للدلالة عما تمّ الوصول إليه بتدبير وتفكير، وتُسْتخدم في الدلالة على الأمر الذي تُدْرَك آثاره لا ذاته.

4 Russel, Bertrand (1914) : Our Knowledge of the External World as a Field for Scientific Method in Philosophy. London: The Open Court Publishing Company.
5 Al-Jurjānī, 'Alī ibn Muḥammad (2004) : كتاب التعريفات. Le Livre des Définitions. Traduction M.S. Manchaoui, Cair : Dar al-Fadhila.

يمكن حصر الفروقات بين العلم والمعرفة فيما يلي:

المعـــــرفـــــــــــة	العـلـــــــم
إدراك جزئي أو بسيط.	إدراك كُلّي أو مُركّب.
تُسْتعمل في التَصَوُّرات. التصور هو الإدراك البسيط لمعاني الأشياء (أو إدراك معنى المفرد) كتصور معنى الحرارة والنّور والصوت	يُسْتعمل في التَصْديقات. التصديق هو الإدراك المنطوي على حكم (أو إدراك معنى الجملة) كالحكم بأن النّار محرقة
يقال فيما يُتَوَصَّل إليه بتَفكّر وتَدَبُّر، وتُسْتعمل فيما تُدْرَك آثاره، ولا يُدْرَك ذاته نقول: عرفت الله وعرفت الدّار.	يُسْتعمل فيما يُدْرَك ذاته، وحال الإبهام نقول: عَرَفْتُ زيدا ولا نقول: عَلِمْت زيدا.
يقابلها في الضد الإنكار والجحود.	يقابله في الضد الجهل والهوى.

Table 1: Différence entre science et connaissance.

I-1.3. Épistémologie et épistémologies -essais de définitions-

La notion d'épistémologie ne fait pas l'objet d'une unique définition, à raison notamment de l'ambiguïté étymologique du terme. Si "**lógos**" se rattache à une discussion plus large sur son utilisation, renvoyant aux «discours», «logique» ou «étude de», "**epistêmê**" fait en revanche l'objet d'interprétations diverses, selon que l'on choisit de le traduire par «connaissance» ou par «science». Ainsi Le terme « épistémologie » a un sens qui peut beaucoup varier d'une tradition philosophique à l'autre. (Figure 2)

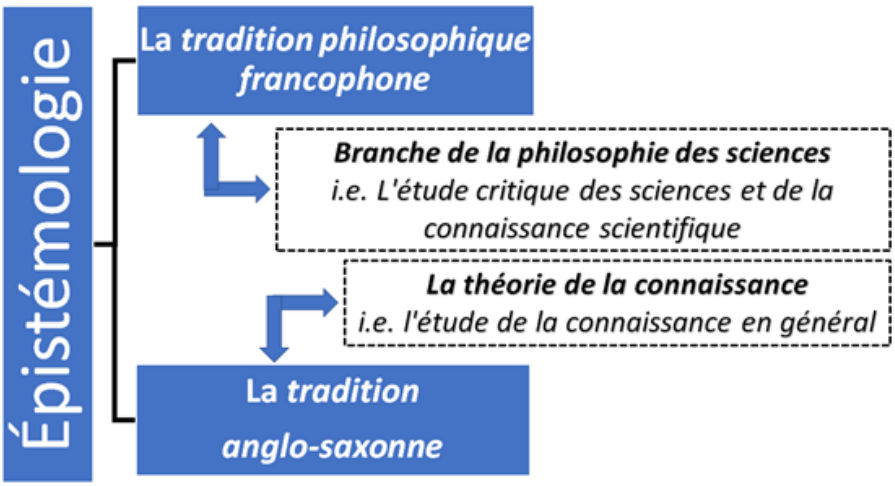


Figure 2: Définition de l'épistémologie :

Selon la **tradition philosophique francophone**, l'épistémologie est une branche de *la philosophie des sciences* qui consiste en l'étude *critique* des fondements de celles-ci. Elle vise l'étude de manière *critique* la *méthode scientifique*, les *formes logiques* et *modes d'inférence* utilisés en science, de même que les *principes*, les *hypothèses*, les *concepts fondamentaux*, les *théories* et les *résultats* des diverses sciences, et ce, afin de déterminer leur *origine logique*, leur *valeur* et leur *portée objective*.

Selon la **tradition anglo-saxonne**, l'épistémologie a un sens plus large et désigne *la théorie de la connaissance* en général et pas uniquement scientifique. Elle s'intéresse aux conditions d'élaboration de la connaissance – en tant que croyance vraie et justifiée –, quel que soit le statut, « ordinaire » ou « scientifique », de cette connaissance. Elle vise l'étude de la nature, de la valeur et des limites de la connaissance humaine.

العِلْمِياتِية هي بحث في المشكلات الناشئة عن العلاقة بين الذَّات العارفة والموضوع المعروف، والبحث عن درجة التشابه بين التصور الذهني والواقع الخارجي. فتعريف العِلْمِياتِية مُتعلِّق بما تحاول أن تَحُلَّ مسائله وترفع إبهاماته فيما يخص حقيقة المعرفة وحقيقة الإدراك والتصورات والتصديقات التي نُكَوِّنها، ومن أين نحصل على المعرفة وكيف نحصل عليها؟ وبصورة أدق وأشمل: العِلْمِياتِية هي دراسة الحقيقة والحق في العلم.[6]

I-1.4. Les objectifs et les champs d'étude de l'épistémologie

Selon Bunge[7], les objectifs de l'épistémologie sont :

- L'étude des processus de la connaissance et l'apport d'une analyse sur leurs logiques et leurs fondements.
- Viser à situer la science parmi les autres sources de la connaissance et à en préciser les limites.
- Critiquer les fondements de la logique et des méthodes scientifiques.
- Apprécier la portée de la science et les retombées des avancées scientifiques sur la société.

L'épistémologie couvre essentiellement quatre champs d'étude :

- La logique de la science : Étudie la nature et la structure des concepts et des théories scientifiques.
- La sémantique de la science : Étudie l'objet, la portée, le langage, la structure et la signification des concepts et des théories scientifiques.
- La méthodologie de la science : Étudie les fondements de la méthode scientifique.
- Les statuts des théories scientifiques : Étudie les limites et la valeur des théories scientifique.

تتلخص مباحث وموضوعات العِلْمِياتِية في الدراسات والأبحاث العربية الإسلامية فيما يلي:

6عبد الحميد، بن تشيكو (2010): محاضرة، المدرسة العليا للأساتذة.

7 Bunge, Mario A., (1960) : La science, sa méthode et sa philosophie. Paris : Vigdor.

طبيعة المعرفة: وتقوم أبحاثها على بيان طبيعة المعرفة وتمييزها من الوهم فالظن فالاعتقاد. وبيان طبيعة العلاقة بين الذات العارفة والشيء المعروف والبحث في المشكلات الناشئة بين الذات المُدْرِكة والشيء المُدْرَك.

إمكان المعرفة: ويبحث في مدى قدرة الإنسان على تحصيل المعرفة. وهل يستطيع الإنسان أن يصل إلى جميع الحقائق، ويطمئن إلى صدق إدراكه وصحة معلوماته.

مصادر المعرفة: يبحث في أسس إدراك العلم كالحواس والعقل، وعلاقتهما ببعض، ويبحث طريق الوحي وطرق أخرى كالإلهام والكشف والحدس.

تصنيف المعرفة: يبحث في أقسام المعرفة والناتجة أساسا من انقسامات العلم كالعلم المحمود والمذموم، الشرعي والعقلي، الحضوري والحصولي، التصور والتصديق، الضروري والكسبي، الفعلي والإنفعالي، الكلي والجزئي، التفصيلي والإجمالي، النظري والعملي، ثم الحقيقي والإعتباري وغيرها من العلوم. ثم البحث في أصولها المنطقية كالأحكام العقلية والحسية والوهمية.

I-1.5. Bref rappel historique

Les sophistes et Platon sont considérés comme des pionniers de la recherche en épistémologie. L'ontologie de la connaissance platonicienne est dualiste en raison de la séparation nette entre le monde sensible et monde des idées. Par contre, Aristote et, plus tard, Saint Thomas d'Aquin professaient que toute connaissance véritable se base sur l'observation du monde sensible. L'homme perçoit une image du monde sensible et conceptualise cette matière.

اهتم علماء العرب والمسلمين بتعريف المعرفة ودراسة موضوعاتها. فلقد تناول المعتزلة والأشاعرة والصوفية مسائل متفرقة تدخل في صميم نظرية المعرفة مثل مسألة الصراع بين الشك واليقين، وتعريف المعرفة وأصنافها ودرجاتها ومبدأ العلية بين الضرورة والحدوث. فابن سينا والغزالي يمثلان اتجاهين متميزين في المعرفة، فلقد بحثا فيها بتفصيل تحت موضوع أحاطا به أكثر من سابقيهم و هو موضوع النفس والعقل. فإذا أردنا إلتماس نظرية المعرفة بالمعنى الدقيق عند علماء العرب والمسلمين فيجب إلتماسها في نظرية الإدراك الحسي والعقلي دون غيرها من نظريات المعرفية الأخرى. فمفاهيم مثل العلم، والمعرفة، والحق، والحقيقة، والإدراك، والوجود، والعقل، والنفس، والوهم، والتصديق، واليقين تعتبر القالب الإصطلاحي والتعريفي للعلمياتية عند علماء العرب والمسلمين.

À partir du 17ème siècle s'opère une profonde restructuration des sciences:

- Avec Galilée et Newton, la physique se mathématise et acquiert alors une grande rigueur et un pouvoir prédictif.
- La philosophie mécaniste et le nouvel atomisme remodèlent la science en profondeur et la réorientent presque exclusivement vers la recherche des « causes efficientes ».

Depuis lors, les philosophes contemporains ont consacré un intérêt essentiel à l'épistémologie qui devint une science autonome et un champ fertile d'interprétations nouvelles. Ceci est illustré dans les philosophies de Descartes, Locke, Hume et Kant.
- L'œuvre philosophique de Locke « L'*Essai sur l'entendement humain »* (en anglais : *An Essay Concerning Human Understanding*) publiée en 1689 signe, selon certains épistémologues, l'acte de naissance de l'épistémologie en Europe, au sens anglo-saxon. Sa théorie de la connaissance est qualifiée d'empiriste car il considère que l'expérience est l'origine de la connaissance.

- Kant et, à sa suite, Fichte et Hegel ouvrent la voie à une connaissance centrée sur le sujet (le connaissant). Ce n'est plus la connaissance qui doit se conformer à son objet mais c'est l'objet qui se conforme à la connaissance.

- Auguste Comte fonda la science positive, selon la doctrine positivisme, l'esprit humain ne peut atteindre l'essence des choses et doit renoncer à l'absolu. Comte estime que « le caractère fondamental de la philosophie positive est de regarder tous les phénomènes comme assujettis à des lois naturelles invariables, dont la découverte précise et la réduction au moindre nombre possible sont le but de tous nos efforts, en considérant comme absolument inaccessible et vide de sens la recherche de ce qu'on appelle les causes soit premières, soit finales. ». Cette conception, qui repose en fait grandement sur la philosophie critique de Kant, a eu une influence majeure jusqu'à notre époque.

- Charles Sanders Peirce, William James et John Dewey fondèrent le pragmatisme. Ce courant épistémologique entreprend de rendre la connaissance un instrument de l'action et rien d'autre.

- Enfin le début 20ème siècle est marqué par la naissance de positivisme logique, appelé encore néopositivisme illustré par le Cercle de Vienne. Sa spécificité a été de concilier empirisme et logique sous l'influence de Frege, Russell et Wittgenstein. Ce courant représenté par Rudolf Carnap (1891-1970) essaie d'énoncer les règles d'un langage scientifique universel, fondé uniquement sur des critères de validité logique.

I.2. Nécessité de l'épistémologie

L'histoire des sciences nous montre que ceux qui ont pratiqué la science sont les mieux placés pour faire de l'épistémologie. En fait, ce que nous appelons aujourd'hui *« science »* s'est longtemps appelé philosophie naturelle.

Tout scientifique, chercheur ou apprenant et dans n'importe quel domaine a besoin de l'épistémologie. Galilée ne fait pas de *« la science »,* mais ce qu'il appelle de la philosophie. Et c'est d'ailleurs pour cela qu'il est amené à dialoguer avec les philosophes et les théologiens de son temps. Selon lui la science est en quête de vérités objectives.

Mais une vérité, pour scientifique quel soit peut risquer de :

- contenir diverses ambiguïtés, obstacles ou incohérences.
- contenir des résultats manquants ou des erreurs.
- être lu de manière douteuse par d'autres.
- manquer de validité scientifique.
- manquer de sens ou de valeur.
- être loin des objectifs de la connaissance.
- قد يتسرب في هذا العلم أمراض مثل الوهم والخيال.
- قد يتسرب لنفس العالم رياء أو شهرة أو غيرها من الأمراض النفسية.
- قد يتسرب لفكر العالم تحيز معرفي معين أو مسبق.
- ...

Si l'épistémologie n'a pas d'effet directe sur l'avancement de la science, elle présente un intérêt dans son application dans différentes disciplines notamment la physique, en raison de ces multiples fonctions parmi lesquelles :

- Analyser comment est-elle constituée ou engendrée.
- Mettre en lumière la signification de l'œuvre scientifique i.e. d'expliciter des relations non immédiatement apparente entre concepts, et faire apparaitre des organisations des concepts qu'elles soient achevées ou imparfaites.
- Analyser le caractère d'une science, notamment en ce qui concerne la notion d'explication.
- Apprécier sa valeur ou sa validité.

Pour montrer la nécessité et l'utilité de l'épistémologie prenons un exemple très connu : La mécanique de Newton

Elle s'exprime au moyen de trois *lois* du mouvement de Newton énoncées dans son ouvrage "***Philosophiae naturalis principia mathematica***"[8]. On les qualifie comme des principes de la grande théorie de Newton.

- La première loi de Newton : Principe d'inertie

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{O} \Leftrightarrow \ Repot\ ou\ Mouvement\ Rectiligne\ Uniforme$$

- La deuxième loi de Newton : Principe Fondamental de la Dynamique.

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m\vec{a}$$

- La troisième loi de Newton : Principe de l'action et de la réaction.

$$\overrightarrow{F_{A\to B}} = -\overrightarrow{F_{B\to A}}$$

8 En français "Principes mathématiques de la philosophie naturelle" écrit par Isaac Newton en 1687

On attribue aux trois expressions mathématiques le nom de "principe". Qu'est-ce qu'un principe ? Comment sont-ils obtenus, et quels sont leurs places, leurs rôles et leurs statuts au sein des sciences ? Pour le principe d'inertie, existe-t-il une possibilité de le confirmer ou de l'infirmer expérimentalement ? Et si on définit le principe comme étant « une proposition *évidente* et *indémontrable* présupposée dans toute opération logique ou déductive ». Pourquoi qualifions-nous la première loi comme principe alors qu'elle est démontrable par la deuxième loi ?

Dans les trois lois apparaissent les concepts (force, masse, …), que signifient ces notions ? et par quel procédé théorique peut-on définir et évaluer ces quantités ?

Encore, cette théorie est exprimée par des lois. Comment on définit une loi ? et qu'est-ce qu'une théorie scientifique ? ces lois sont-elles vraies ? Comment les vérifier ? Et que signifie pour une loi scientifique être vraie ou fausse ? quel lien entre physique et mathématique ?

On parle de mécanique newtonienne appelée aussi mécanique classique. Mais ils existent d'autres, la mécanique relativiste (qui se rapporte à la mécanique compatible avec la relativité restreinte et la relativité générale). Et la mécanique quantique (qui étudie le monde microscopique des particules et des champs). Entre ces différentes mécaniques, la physique a connu des grands changements conceptuels qui ont complètement modifié notre vision de l'univers et du monde. Certain comme Kuhn[9] ont introduit le terme paradigme. Cette transition de la **physique classique** à la **physique moderne** nous amène à poser plusieurs questionnements que seule l'épistémologie peut nous fournir des éclaircissements :

La mécanique de Newton est-elle limitée ou fausse ? Y aurait-il des mécaniques plus vraies (ou fausses) que d'autres ? Ce changement conceptuel représente-il une "révolution scientifique" ou une pratique "normale" de la science ? qu'est-ce qu'un paradigme en science ? qu'est-ce qu'un modèle en science ? comment définir la physique ? et évidemment la question fondamentale comment définir la science ?...

D'autres questions apparaitraient avec l'avènement de la physique moderne nécessitent une réflexion et une analyse épistémologique : le monde physique est-il déterministe ou indéterministe ? quel mode d'interprétation lui faut réaliste ou probabiliste ? quelles sont les facettes et les aspects spécifiques de la notion de causalités dans la physique classique et moderne ? que signifie continuité et discontinuité dans la physique ? …

I.3. Principaux courants épistémologiques

La science a connu, au cours de son développement, divers courants épistémologiques, chaque courant considère son statut cognitif, sa méthode scientifique et ses normes (ce qu'elle se doit à elle-même pour être scientifique) comme meilleures démarches scientifiques conduisant à la meilleure représentation et explication du monde extérieur.

On peut distinguer cinq courants principaux dans l'épistémologie occidentale : le rationalisme, l'empirisme, le positivisme, le constructivisme et le réalisme. On présente

9 Thomas Samuel Kuhn (1962) : La structure des révolutions scientifiques.

ci-après une synthèse claire, précise et relativement simple des cinq courants ou écoles de pensée de l'épistémologie. (Figure 3)

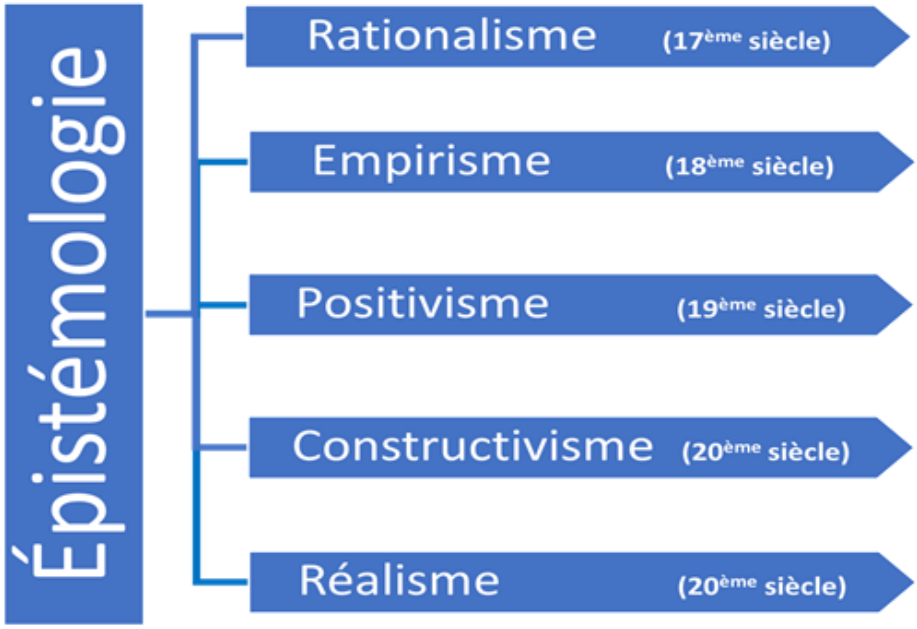


Figure 3: Courants épistémologiques

I-3.1. Le rationalisme.

Le rationalisme est une théorie de la connaissance qui soutient que : "*toute connaissance valide provient soit exclusivement, soit essentiellement de l'usage de la raison*"[10]. Le rationalisme exclut l'expérimentation en tant qu'élément actif dans le développement des connaissances, il pense que la vérité n'est obtenue que par l'acte de raisonnement intellectuel (dans la théorie de la connaissance kantienne on trouve aussi l'intuition intellectuelle). Pour les rationalistes, le seul raisonnement absolument rigoureux est la déduction. Les principaux représentants de rationalisme sont : René Descartes (1596-1650), Gottfried Leibniz (1746-1716) et Emmanuel Kant (1724-1804).

Le rationalisme trouve ses racines dans les anciennes traditions philosophiques, soit grecques soit musulmanes. Il est rattaché à Héraclite (576-480) av JC (l'idée d'un logos universel), Il a émergé dans la philosophie grecque par Socrate (470-399) av JC et Aristote (384-322) av JC puis repris par Zénon de Kition (334-262) av JC (vivre en accord avec la nature et la raison pour atteindre la sagesse et le bonheur.)

Le rationalisme, dans le sens ou la raison est tenu en haute estime, en théorie et en pratique, a été un trait caractéristique de la pensée islamique depuis les temps les plus reculés. Le Mu'tazilisme (المعتزلة) et l'Ash'arisme (الأشعرية) sont considérés comme les plus anciennes écoles rationalistes. Profondément influencés par la philosophie grecque, Ils ont adopté et adapté dans leur propre système plusieurs thèses philosophiques formulées par les penseurs grecs, ils ont appliqué l'argumentation

10 Legendre, Renald (2005) : Dictionnaire actuel de l'éducation, 3ème édition Montréal : Guérin.

rationnelle dans leurs méthodes de démonstration philosophique pour défendre et soutenir la doctrine islamique. Dans le champ des recherches scientifiques et la philosophie, le rationalisme a toujours été l'un des principaux courants de la pensée islamique, dans le discours scientifique on trouve le concept de "*fikr*" (فِكْر) dans le sens de pensée, réflexion ou même méditation. Ibn Khaldûn (1332-1406) exprime la relation entre les sanâia (الصنائع), sciences techniques ou empiriques et la pensée :

> "ووجود الصنائع دون الفكر ممتنع لأنها ثمرته وتابعة له [...] لا يفتر عن الفكر طرفة عين، بل اختلاج الفكر فيه أسرع من لمح البصر. وعن هذا الفكر تنشأ العلوم وما قدمناه من الصنائع."[11]

> *"L'existence de sanâia, (sciences techniques) sans pensée est abstinente car elles représentent son fruit et elles lui sont subordonnées […] L'être humain ne peut pas être indépendant de sa pensée, cette dernière ne connaît pas une seconde d'interruption, son agitation est plus rapide qu'un clin d'œil. La pensée est le siège des sciences et de sanâia."*

Dès l'avènement de l'Islam, le rationalisme dans la civilisation arabo-musulmane apparaissait et devenait une évidence. Les scientifiques arabo musulmans ont même contribué à son progrès. Comme leur religion encourage la méditation et l'usage de la raison, et exige de remettre en question les interprétations mythologiques grecques, leurs préoccupations scientifiques changent et leurs approches acquièrent de nouvelles méthodes. C'est tout un paradigme de la science qui est né « *Al-Ilm* » (العلم) qui a sa propre signification, sa nouvelle vision et son propre usage.

Dans le vocabulaire de la pensée arabe, on trouve de nouveaux concepts qui se déversent dans le cadre du rationalisme citons :

1- القوة الناطقة العقلية : La faculté de raisonnement logique. Faculté infaillible qui nous informe sur nous-même et sur le monde extérieur. Cette faculté toucherait quant à elle à la vérité des choses.
2- الكليات : Idées universelles déduites des choses sensibles applicables en général, indépendamment des individus, de la race, de la nation et du groupe.
3- القياس : La confrontation d'une idée avec le monde extérieur pour prouver sa justesse.
4- الظن : La supputation, le savoir est de la catégorie de la supputation, on commence par la supputation et l'on s'élève d'une façon continue et peu à peu jusqu'à ce que la supputation se transforme en savoir.
5- علم الكلام : Science qui utilise uniquement la raison pour prouver les croyances religieuses en mettant en évidence des arguments logiques.

11 مقدمة ابن خلدون من كتاب العبر، وديوان المبتدأ والخبر في أيام العرب والعجم والبربر، ومن عاصرهم من ذوي السلطان الأكبر.

6- الكشف : Le dévoilement, concept utilisé par le soufisme, c'est un mode d'acquisition des connaissances d'origine divine.

Ibn Khaldûn distingue, comme les Grecs, trois degrés de la raison : (عقل تمييزي) la raison discernant, et (عقل تجريبي) la raison empirique, et (عقل نظري) la raison spéculative. L'homme apprend par voie d'acquisition (الكسب) et de technique (الصناعات), en soumettant sa pensée à des règles précises. La logique (المنطق) est un système de normes permettant de distinguer le vrai du faux, et l'abstraction (التجريد) finit par atteindre l'universel (الكليات).

Jâbir ibn Hayyân (mort en 815) connu au Moyen-Age sous le nom de l'alchimiste Geber, utilise le concept "Akl" (عقل), pour lui, la raison précède l'expérience pratique, il a écrit dans son Kitâb al-khawâs al-kabîr (Grand livre des propriétés) en introduisant l'expérience pratique en laboratoire dans la méthode de recherche scientifique :

"ولقد عملته بيدي وبعقلي من قبل"

"Je l'ai mis à l'épreuve (le savoir) par mes mains (l'expérience) et avant par ma raison (la pensée)."

C'est la position, notamment, de Kant, selon lequel, à priori de la raison correspond une expérience qu'ils définissent et organisent, il admet que c'est notre faculté de connaître qui organise la connaissance, et non pas les objets qui la déterminent[12].

Au sein de l'épistémologie islamique, on retrouve la thèse d'Abû Ḥamid Moḥammed al-Ghazālī (1058-1111), connu en Occident sous le nom d'Algazel qui distingua trois sources de jugement des facultés humaines :

1- Le jugement des sens (الحاكم الحسي) ;
2- Le jugement d'el Wahm (الحاكم الوهمي) ;
3- Le jugement de la raison (الحاكم العقلي).

Dans l'étape de la connaissance sensible, al-Ghazālī accorda une grande importance à la raison, Il l'a mise au sommet de la hiérarchie de ces facultés humaines en lui donnant la primauté et la suprématie[13].

ولتتحقق قبل كل شيء أن فيك حاكما حسيا وحاكما وهميا وحاكما عقليا،
والمصيب من هؤلاء الحكام هو الحاكم العقلي.

Al-Ghazālī, dans son livre : (مشكاة الأنوار) Le tabernacle des lumières, répartit la perception de la connaissance, en étapes ou en degrés (أطوار), d'abord la connaissance sensible, puis l'homme s'élève à une autre étape celle de la raison, enfin au-delà de la

12 Kant, Immanuel (1781) : Critique de la raison pure.
13 Al-Ghazālī, Abû Ḥamid (1983) : معيار العلم في فن المنطق, Critère de la connaissance dans l'art de la logique, Bayrût : Dar El Andalous.

raison existe une autre étape encore, dans laquelle s'ouvre un œil qui permet de voir le monde caché (الغيب) [14].

> وراء العقل طور آخر يظهر فيه ما لا يظهر في العقل، كما لا يبعد كون العقل طورا وراء التمييز والإحساس تنكشف فيه غرائب وعجائب يقصر عنها الإحساس والتمييز.

I-3.2. L'empirisme.

Contrairement au rationalisme, l'empirisme postule que toute connaissance provient principalement de l'expérience. Il considère que la connaissance se fonde sur l'accumulation d'observations et de faits mesurables, dont on peut extraire des lois générales par un raisonnement inductif. Les principaux représentants de l'empirisme sont : Francis Bacon (1561-1626), John Locke (1632-1704) et David Hume (1711-1776).

Selon l'empirisme, le fondement et la première source de la connaissance se trouvent dans l'expérience, par conséquent le caractère principal de la science modelée par l'empirisme est l'observation et l'utilisation de la méthode expérimentale ainsi que la production des idées qui permettront de faire de nouvelles expériences. Pour l'empirisme, le jugement de la validité ou la réfutabilité d'une théorie trouve sa valeur dans l'expérience.

I-3.3. Le positivisme.

Fondé par Auguste Comte (1798-1857), ce courant épistémologique considère que la science est issue de la combinaison de l'expérience et de raisonnement logique autrement dit les données expérimentales et les raisonnements mathématiques sont nécessaires à l'élaboration des théories scientifiques. Ses principaux représentants sont Ernst Mach (1838-1916), Williams Bridgman (1882-1961) et Niels Bohr (1885-1962).

Le positivisme en général est de tendance empiriste, il considère l'expérience comme le seul moyen de vérifier ses connaissances, d'affirmer une vérité ou de valider une hypothèse.

Dans les modèles scientifiques, les positivistes comme les empiristes se concentrent sur les aspects quantitatifs c'est-à-dire des phénomènes mesurables. Ils s'orientent plus vers l'établissement des lois au moyen de l'observation de la nature, puis à les infirmer ou à les confirmer par des expériences. Ils s'opposent catégoriquement à tout ce qui n'est pas directement observable, par exemple, et contrairement aux empiristes, les positivistes s'opposaient à l'existence des atomes, comme modèle nécessaire pour expliquer les résultats expérimentaux.

Les modèles pour eux sont des créations de l'esprit humain, utiles mais ils n'ont aucune valeur en eux-mêmes, ils ne nous apprennent rien de la réalité qui ne soit déjà contenu dans les faits eux-mêmes, raison pour laquelle le positivisme est en faveur de la multiplicité des modèles, contrairement à l'empirisme. Cette conception explique

14 Al-Ghazālī, Abû Ḥamid (1986). مشكاة الأنوار, Le Tabernacle des Lumières. Bayrût : Alam el kotob.

l'existence de plusieurs modèles différents et même contradictoires pour un seul fait comme le modèle corpusculaire et ondulatoire de la lumière.

À l'intérieur du courant positiviste, on distingue d'autres volets de pensée :

I-3.3.1. Le conventionnalisme

Fondé par Henri Poincaré, est une conception philosophique qui soutient que : les théories, les énoncés scientifiques sont des conventions passées entre les scientifiques par raison de commodité ou d'efficacité, et elles résultent de décisions arbitraires. Les lois, les théories ne sont pas obligatoires, et elles auraient pu être autres[15].

I-3.3.2. Le pragmatisme

Fondé par Charles Sanders Peirce (1839-1914) avec William James (1842-1910) aux alentours de 1870, est une conception qui propose, selon Peirce, la philosophie pragmatiste est une méthode de clarification conceptuelle, permettant de résoudre ou de dissoudre les problèmes de la philosophie : Le pragmatisme n'a en soi aucune doctrine de métaphysique, aucune tentative pour déterminer une quelconque vérité des choses. C'est simplement une méthode pour établir la signification des mots difficiles et des concepts abstraits. William James, évoque que "le *vrai consiste simplement en ce qui est avantageux pour la pensée*"[16]. En une simple phrase le sens d'une théorie ou d'un modèle réside dans ses succès opérationnels qui fondent leur légitimité. La physique newtonienne a longtemps été considérée comme vraie par son pouvoir explicatif et par le nombre immense d'applications techniques qu'elle a rendu possibles.

I-3.3.3. Le positivisme logique :

Appelé parfois **néopositivisme** ou **empirisme logique**, est une thèse fondée par le logicien et l'épistémologue Rudolf Carnap (1891-1970) en Europe. Ce courant philosophique a émergé à Vienne (le cercle de Vienne) au début du 20ème siècle sur la base d'une analyse efficace des révolutions scientifiques moderne – la logique mathématique, la théorie de la relativité et la mécanique quantique – Il postule que tout énoncé de connaissance est soit analytique, soit synthétique a posteriori, et donc vérifiable par l'expérience, c'est ce que l'on appelle **le vérificationnisme**. Ce critère "vérificationniste" basé sur une analyse logique du langage (théorie de la signification) établie une démarcation nette entre le véritable domaine de la science et le champ de la métaphysique.

> *"Le sens d'un énoncé est la méthode de sa vérification. Un énoncé ne dit que ce qui est en lui vérifiable. C'est la raison pour laquelle il ne peut affirmer, s'il affirme vraiment*

15 Sagaut, Pierre (2008) : Introduction à la pensée scientifique moderne, p.145, Paris 6 : Université Pierre et Marie Curie.

16 Le Moigne, Jean Louis (1995) : Les épistémologies constructivistes, p. 55, coll. «Que sais-je ? N° 2969».

quelque chose, qu'un fait empirique. Une chose située par principe au-delà de l'expérience (métaphysique) ne saurait être énoncée, pensée, ni questionnée."[17]

I-3.4. Le constructivisme.

Les origines de la pensée constructiviste remontent aux traditions philosophiques bien plus anciennes, depuis le scepticisme de l'antiquité jusqu'au nominalisme du Moyen Âge. Parmi ses partisans grecs, Héraclite, Protagoras et Aristote.

Le constructivisme a également ses racines dans la pensée empiriste de 17ème siècle, on le retrouve en particulier dans la pensée philosophique de Giovan Battista Vico (1686-1744) dans sa formule «le vrai est identique au fait».

Ce courant a connu au 20ème siècle une grande élaboration qui dérive essentiellement de l'épistémologie génétique et de la science cognitive. Jean Piaget (1896-1980) est la figure de proue du constructivisme et de la rupture avec les idées conventionnelles sur l'acquisition des connaissances.

Dans la théorie de la connaissance, le constructivisme s'oppose à l'objectivisme, le premier soutient que la connaissance et la réalité n'ont pas de valeur objective ou absolue et que nous n'avons aucun moyen de connaître cette réalité et les scientifiques construisent activement leurs propres connaissances et interprètent une réalité basée sur leurs expériences lors de leurs interactions avec leur environnement. En revanche le second soutient que le monde est réel, structuré et que cette structure peut être modélisée pour l'apprenant, l'esprit est donc comme un miroir, il "reflète" cette réalité et sa structure à travers des processus de pensée analysables et décomposables.

Le constructivisme n'est pas une position théorique unitaire ; c'est plutôt un continuum, divers courants de constructivisme ont émergés dans le monde scientifique :

I-3.4.1. Le constructivisme cognitif

C'est une théorie d'apprentissage qui a ses racines dans la psychologie cognitive, il est associé au traitement de l'information et à sa dépendance aux processus constitutifs de la cognition. Il postule que la construction de connaissances est considérée avant tout comme un processus technique de création de structures mentales, mais elle a peu d'effet sur la nature de la connaissance subjective dans l'esprit. Cette théorie affirme donc que la réalité est connaissable pour l'individu et l'acquisition des connaissances est un processus adaptatif et résulte de la connaissance active par l'apprenant individuel.

À partir du 20ème siècle ce courant est devenu le courant épistémologique dominant en psychologie cognitif et en didactique, il a conduit à plusieurs découvertes empiriques significatives concernant l'apprentissage, et ces modèles conceptuels théoriques ont conduit à des applications pédagogiques réussies.

17 Carnap, Rudolf (1932) : Le dépassement de la métaphysique, dans Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits, trad. collective sous la direction d'Antonia Soulez, p. 172, Paris : PUF.

I-3.4.2. Le constructivisme radical

Ce courant accepte une réalité objective, mais elle est inconnaissable puisque notre expérience avec les formes externes est médiatisée par nos sens, et nos sens ne sont pas aptes à rendre une représentation précise de ces formes externes. L'acquisition des connaissances est un processus adaptatif qui résulte de la connaissance active par l'apprenant individuel, rendant un esprit basé sur l'expérience et non un esprit qui reflète une réalité externe. Dans le constructivisme radical on trouve la notion de *viabilité* pour exprimer la relation entre connaissance et réalité, la connaissance interne ne correspond pas à la réalité externe, mais elle est plutôt un modèle d'expérience viable. Autrement dit, les concepts, les modèles et les théories sont viables s'ils s'avèrent adéquats dans les contextes dans lesquels ils sont créés. Cependant, quand le modèle d'expérience ne fonctionne pas, en raison de contraintes externes ou internes, causant ainsi un problème, les constructions changent pour essayer et de s'adapter à la nouvelle expérience, l'amélioration de la connaissance signifie l'amélioration de sa viabilité ou son adéquation avec un monde extérieur[18].

I-3.4.3. Le constructivisme social

Le constructivisme social postule que les structures sociales et les structures cognitives se composent et se situent dans l'interaction entre les gens. Ce courant soutient la nature sociale de la connaissance et la conviction que la connaissance est le résultat de l'interaction sociale et de l'usage du langage, la connaissance est donc une expérience partagée plutôt qu'individuelle. Il réduit la construction mentale individuelle considérée relativement insignifiante au détriment de la construction sociale. Les connaissances sont donc liées à un moment et à un lieu précis. Par exemple les choix des scientifiques ne seraient donc pas spécialement contraints par la recherche de la vérité puisque l'accord de la communauté scientifique est un facteur supplémentaire qui peut même précéder et créer les "faits": La vérité, dans ce cas, n'est ni la réalité objective des constructivistes cognitifs ni la réalité expérientielle du constructiviste radical, mais plutôt une vérité socialement construite et acceptée résultant de la «coparticipation à des pratiques culturelles».

I-3.5. Le réalisme scientifique.

Dans un premier plan, Le réalisme scientifique est une thèse qui concerne principalement le statut cognitif des produits de la science. Il affirme que les objets de la connaissance scientifique existent indépendamment des esprits (ou des actes des scientifiques) et que les lois et les théories scientifiques sont vraies dans ce monde objectif (indépendamment de l'observateur). Pour les partisans du *réalisme* scientifique, la théorie scientifique parfaite vers laquelle tend la théorie actuelle décrit exactement la réalité extérieure à l'homme, donc nous renseigne sur le monde en soi (**l'essentialiste**). A l'inverse, *l'antiréalisme* soutient que les théories ne sont que des

18 Von Glasersfeld, Ernst (1995) : Radical Constructivism: A Way of Knowing and Learning, New York: Falmer Press.

instruments commodes pour organiser nos perceptions et agir sur le monde, et qu'elles ne nous apportent rien de plus (**l'instrumentalisme**). Pour le réalisme le scientifique découvre ses objets qui existent indépendamment de lui, à l'inverse, pour l'antiréaliste, le chercheur invente ses objets.

Nous pouvons analyser la posture du réalisme scientifique dans trois thèses :

I-3.5.1. Le réalisme métaphysique

Il stipule qu'il existe une réalité indépendante de toute représentation que la science tente de décrire le plus fidèlement. Au contraire, selon **l'idéalisme**, le monde extérieur n'a pas d'existence autonome, et n'est qu'une représentation des sujets humains.

I-3.5.2. Le réalisme sémantique

Il affirme simplement que la vérité d'une théorie dépend de son adéquation à la réalité indépendamment de l'activité humaine. Pour un réaliste les lois de la physique sont vraies, les phénomènes réels la présentent également, et le caractère vrai ou faux d'un énoncé est absolu, il est attaché uniquement à l'énoncé indépendamment des esprits.

I-3.5.3. Le réalisme épistémologique

Il prétend que nos théories scientifiques nous permettent d'avoir un accès cognitif à la réalité. C'est une thèse qui accepte la possibilité de la connaissance scientifique de faits qui ne peuvent pas être directement observés, contrairement à *l'empirisme* qui nie la possibilité d'avoir une connaissance quand il s'agit d'hypothèses sur des faits inobservables.

I.4. Les rapports de l'histoire des sciences et de l'épistémologie

Toute enquête dans l'histoire des sciences visant à comprendre le progrès scientifique ou comment les idées sont évoluées ne peut se faire sans avoir recourt à l'épistémologie. De même les principales sources d'épistémologie visant à comprendre la genèse ou la dynamique de la science, se situent dans l'histoire des sciences. Plusieurs exemples montrent que l'histoire des sciences est nécessaire à l'épistémologie et que cette dernière peut être très utile à l'histoire des sciences. C'est ainsi les termes épistémologie et histoire des sciences étaient souvent associés et traités comme un ensemble. (Figure 4)

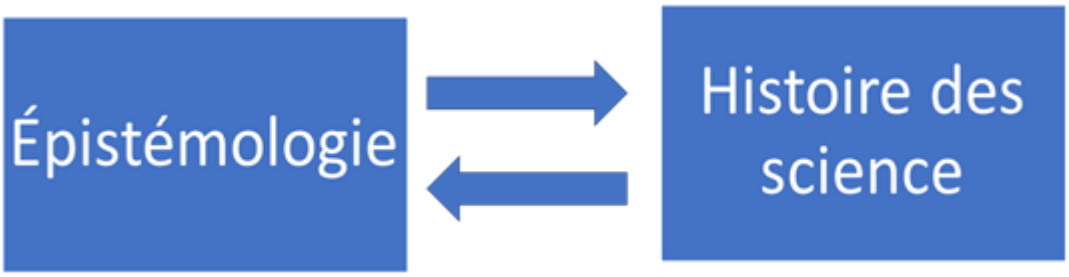


Figure 4: rapport de l'histoire des sciences et de l'épistémologie

Voici quelques exemples qui expriment l'interdépendance de l'épistémologie et l'histoire des sciences :

- L'épistémologie étudie comment fonctionne la science, mais cette analyse critique ne peut pas être accomplie sans évoquer l'histoire de cette science. L'histoire des sciences emprunte à l'épistémologie l'étude des conditions historiques de construction des savoirs scientifiques.
- L'étude d'un concept nécessite parfois un départ de sa construction ou de sa reconstruction historique comme exemple : Les concepts de la relativité restreinte, ou de la mécanique quantique.
- Pour comprendre l'idée de modèle, le statut de l'expérimentation, l'évolution des idées en physique, l'histoire des sciences contribue de manière significative pour clarifier ces concepts.
- Le concept d'obstacle épistémologique a été défini par G. Bachelard à partir de ses études sur l'histoire de la physique et de la chimie et de son expérience d'enseignant de sciences physiques.
- Le concept de paradigme a été défini par T.S. Kuhn, appliquant les hypothèses de la psychologie de la perception à la corrélation de l'histoire des sciences et de l'épistémologie.

يحتوي القرآن الكريم على الكثير من السنن التاريخية، فعلماء الإسلام لم ينظروا للأحداث التاريخية في القرآن مجرد استنساخ للأحداث السابقة بل حاولوا اكتشاف سننها، وإعطاء خصائصها مبرزين دور الإنسان في حركية التاريخ.

فإذا أخذنا المؤرخ ابن خلدون نموذجا، فإننا نلاحظ أنه قام بمحاولة دراسة التاريخ مبرزا سننه وقوانينه، جاعلا من الإنسان عاملا فاعلا باحثا عن هذه القوانين ومتحكما فيها لا العكس. هذه المحاولة كانت دفعا قويا للفكر الأوروبي في عصر النهضة الذي عمل على تجسيد هذه المفاهيم.

يتجلى ذلك منذ بداية تعريفه للتاريخ أين قدمه ابن خلدون مقرونا بفضائل هذا العلم وفوائده على الأمة حيث يقول:

"أما التاريخ فموضوعه الاطِّلاع على الأحوال الماضية البارزة للأشخاص والأمم، وفائدته العِبْرة بتلك الأحوال والتناصُح بها وحُصُول ملكة التجارب للوقوف على تقلُّبات الزّمن ليُحْتَرز من أمثال ما نُقِل من مضار، ويَسْتَجْلِب نظائرها وهو كما قيل عُمْر آخر للنّاظر فهو من علوم الأنبياء التي أُمروا بتعليمها وتبليغها (وذكِّرْهم بأيّام الله) أي التاريخ. وهو أيضا ذاكرة تزيد الذكاء ومن لا ذاكرة له

لا عقل له... إعلم أن فنَّ التاريخ غزير المذهب، جمُّ الفوائد، إذ هو يوقِفُنا على أحوال الماضين من الأمم في أخلاقهم، والأسْياد في سِيَرهم، والمُلُوك في دُوَلِهم وسياستهم"[19]

19مقدمة ابن خلدون من كتاب العبر، وديوان المبتدأ والخبر في أيام العرب والعجم والبربر، ومن عاصرهم من ذوي السلطان الأكبر

Chapitre II :
GÉNÉRALITÉ SUR LES THÉORIES PHYSIQUES.

1. Définitions : Théorie, Hypothèse, Axiome
2. Définitions : Loi, Principe, Concept
3. La causalité rationnelle et la causalité empirique
4. Déterminisme et Indéterminisme
5. Continuité et Discontinuité
6. Physique et expérimentation
7. Physique et mathématique

Chapitre II : GÉNÉRALITÉ SUR LES THÉORIES PHYSIQUES

Préambule

La physique est une science empirique, ses connaissances sont principalement acquises et structurées par les théories, les hypothèses, les principes et les lois… et vérifiées par les expériences.

La signification, le rôle, le statut et les relations entre ces différents outils d'acquisition et de structuration des connaissances ont fait l'objet de nombreuses études épistémologiques dont nous allons donner une synthèse ci-dessous.

II-1. Définitions : Théorie, Hypothèse et axiome

La théorie newtonienne de la gravitation universelle, la théorie électromagnétique de Maxwell, la théorie de la relativité générale d'Einstein, sont autant d'exemples d'aboutissements remarquables de l'enquête scientifique. D'autre part, la théorie du big bang, la théorie des cordes, sont loin d'être confirmées, et pourraient bien être remis en question et supplantées par d'autres théories.

Sans nul doute, une des tâches majeures des scientifiques est de produire des théories, conçues comme des systèmes explicatifs du monde qui nous entoure. Mais qu'entend-on exactement par « théorie » ?

En langage courant, le mot "théorique" est opposé au mot "concret". On qualifie de théorique une "chose abstraite", i.e. sans rapport avec la réalité. Le sens étymologique du mot "abstrait " est "tiré de". L'abstraction désigne alors l'opération mentale consistant à attribuer aux choses perçues une existence réelle et, de ce fait, l'abstraction est nécessaire dans tout processus d'exploration de la réalité. Notons ici, que pour Paul Langevin, la distinction entre le concret et l'abstrait est une affaire de nuance : « Le concret c'est de l'abstrait rendu familier par l'usage »[20].

وتجريد الشيء في اللغة أيّ إزالة ما عليه وتقشيره. والتجريد عند ابن سينا: انتزاع النّفس الكلّيات المُفردة عن الجزئيات على سبيل تجريد معانيها عن المادّة وعلائق المادّة ولَواحقه. ويشير التجريد بالمعنى الفلسفي إلى الجانب الإدراكي، الذي يعزل عقلياً خصائص الموضوع، عن أي موضوع آخر بهدف تجزئة عناصره، وعزل جوانبها الأساسية، وتحليلها من نواحيها المتعددة، وفي صورتها الخالصة.

Nous utilisons le concept d'une théorie essentiellement de deux manières distinctes. Dans certaines situations, nous faisons une distinction entre les propositions théoriques et empiriques, i.e. l'abstraction des observations et les choses qui en sont

20 Langevin, Paul (1934) : La Notion de Corpuscules et d'Atomes, Hermann, Paris, p. 45.

déduites. Dans d'autres situations, le but du concept de théorie est principalement de comparer la théorie à la réalité, observée ou non. C'est dans ce second sens que nous disons d'une théorie que c'est juste une hypothèse, un postulat ou un axiome.

Le mot « théorie » provient du mot grec « θεωρία/*theôría*» qui signifie : contemplation, spéculation, regards sur les choses, ou le verbe « θεορίνη /*theorein* », qui veut dire contempler, observer, examiner, considérer. La théorisation est donc une opération consistant à prendre du recul par rapport aux faits et à placer ceux-ci dans un cadre global où ils sont reliés par des liens bien définis.

En physique, la théorie est définie par Nadeau[21] comme :

> *"Une tentative de décrire et d'expliquer un ensemble de phénomènes d'une façon cohérente". Ou "Ensemble de propositions cohérentes et hiérarchisées représentant un domaine déterminé de phénomènes, et visant à comprendre, expliquer, interpréter, ou prédire des phénomènes".*

والنظرية لغة: من نظر بمعنى بصر وفكّر وتأمّل، وعليه فالكلمة تُستَعْمل في المعاني الحسية والعقلية، فيقال: نظر في الشيء نظرا إذا أبصره وتأمَّله بعينه. كما يُقال: في هذا نَظَرْ، أي أنه ما زال في مجال التفكير لعدم وضوحه. والنظري مقابل العملي. في حين يعرفها ابن منظور في لسان العرب على أنها ترتيب أمور معلومة على وجه يُؤدّي إلى استعلام ما ليس بمعلوم وقيل النظر طلب عن علم. وتُسْتَعمل كلمة نظرية للدلالة على ما هو نقيض للمعرفة السطحية أو العامة.

أما المعجم الفلسفي لالاند فيعرفها على أنها بناء فكري تأملي ترتبط فيها النتائج بالمبادئ. بعبارة أخرى النظرية هي كل تركيب عقلي مؤلف من تصورات مُنسّقة، تقوم على منهج ونظام مرتبط بمفاهيم دقيقة تهدف إلى ربط النتائج بالمقدمات[22].

L'objectif principal des théories physiques est de fournir donc une connaissance synthétique et cohérente, basée sur les faits et sur le raisonnement scientifique. Pour cela, la théorie utilise plusieurs ingrédients (Figure 5) : les hypothèses, les règles, les opinions, les notions, les idées, l'expérimentation, les concepts, les lois, les principes généraux et la généralisation. Une théorie physique se caractérise par une mathématisation, une symbolisation, une formalisation, une abstraction, une cohérence, un choix des faits expérimentaux, une approximation, une modélisation, une description, un pouvoir d'explication et une faculté de prédiction.

21 Robert, Nadeau (1999) : Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie, Paris : PUF.

22جميل صليبا :المعجم الفلسفي، ج2، الشركة العالمية للكتاب، دط، 1994، ص .377

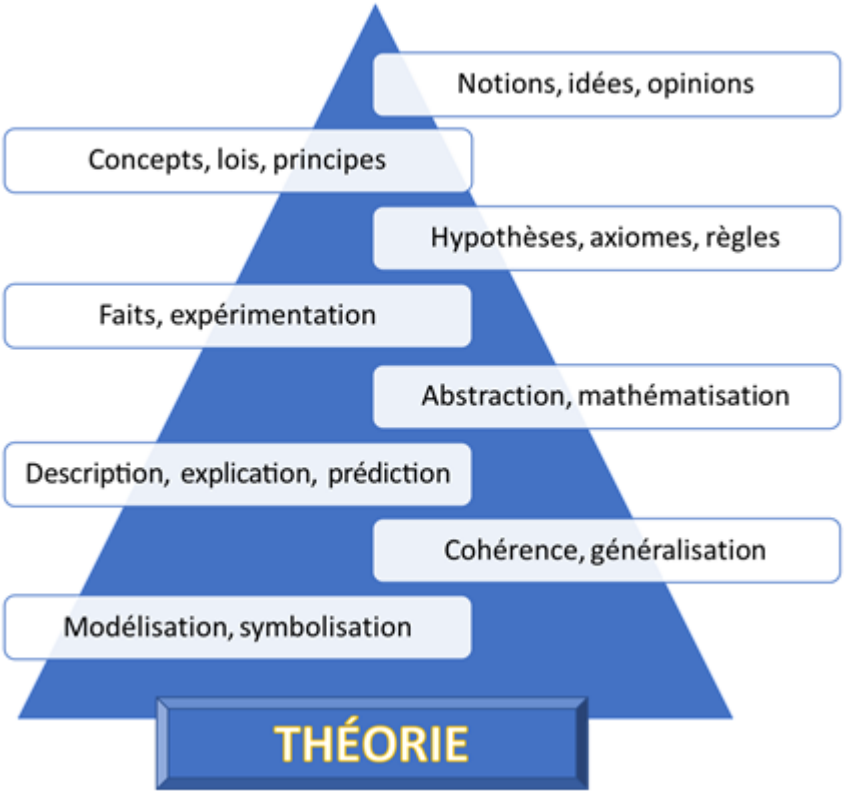


Figure 5: Éléments constitutifs d'une théorie

Une théorie est à la fois une abstraction et une construction de l'esprit. Elle sert à définir, décrire, comprendre, expliquer, représenter et prédire un phénomène particulier et un ensemble de relations propres à ce phénomène suite à la vérification d'un certain nombre d'hypothèses. Elle sert aussi à poser de nouvelles questions, à structurer en partie les observations, à porter un jugement sur la réalité et même, dans certains cas, à prendre des décisions qui influencent le cours des évènements quotidiens.

Une théorie est une manière de concevoir et de percevoir les faits et d'organiser leur représentation. Elle sert à conceptualisé et à expliquer un ensemble d'observations systématiques relatives à des phénomènes et à des comportements complexes. Elle sert aussi à découvrir un fait caché. Il s'agit donc d'une construction de l'esprit élaborée suite à des observations systématiques de quelques aspects de la réalité.

II-1.1. Différences spécifiques entre hypothèse et axiome

En physique *l'axiome* a perdu de sa nécessité relativement à *l'hypothèse,* tout comme *l'hypothèse* relativement à *l'axiome* en mathématique. Chaque concept a acquis une certaine réalité par rapport à l'autre dans sa discipline.

Un axiome désigne une vérité première acceptée sans justification mais exclusivement *à l'intérieur d'une théorie mathématique*. L'ensemble des axiomes d'une

théorie constitue ce que l'on appelle une *axiomatique*. Une axiomatique définit entièrement une théorie mathématique.

En physique des hypothèses doivent être émises pour élaborer une théorie, ces hypothèses prennent la place des axiomes des théories mathématiques. Ce qui les caractérise des axiomes c'est qu'elles contiennent un élément de vérité à même de nous conduire à découvrir une part de la réalité du monde. Ces hypothèses constituent la partie indémontrable de la théorie.

En résumé, les *hypothèses* que l'on formule dans le cadre des raisonnements plausibles sont énoncées donc afin de nous aider à comprendre et gérer notre univers, cependant les *axiomes* sont énoncés dans un cadre extérieur au monde réel et servent de base à la construction de modèles abstraits.

II-2. Définitions : loi, principe, concept

La physique est une science qui vise à connaitre (ou établir) les lois qui gouvernent les phénomènes de la nature et à remonter aux principes fondamentaux sur lesquels reposent ces lois. Cette science n'est pas seulement théorique : c'est aussi une science expérimentale. Ses hypothèses peuvent être vérifiées au moyen des expériences. Mais la physique a trait non seulement à des expériences mais à des concepts. Elle se présente, aux différents stades de la connaissance, comme une description et explication du monde extérieur utilisant à cet effet des concepts bien établit proposés comme universels.

Il est important pour les épistémologues d'analyser les termes : loi, principe, concept et expérience, des significations très précises doivent être prises lors de leur usage scientifique.

II.2.1. La loi physique

Selon Carnap[23], les lois de la physique sont :

> "*des énoncés qui expriment de façon aussi précise que possible les régularités observées dans la nature*".

Si une régularité donnée s'observe en tout temps et en tout lieu, sans exception, alors la loi est dite « universelle ». Les lois universelles font partie des "énoncés conditionnels universels" qu'on peut illustrer comme suit :

Soit une loi dont l'énoncé est :

23 Carnap, Rudolf. (1973). Les fondements Philosophiques de la Physique. Paris : Armand Colin, coll. U.

Quel que soit x, si x est P, alors, x est aussi Q

Cette loi s'écrit Symboliquement :

$(x)(P_x \supset Q_x)$

Où : (x) est un « quantificateur universel »
P_x signifie que x est P ; Q_x signifie que x est Q
$\supset$ est un connecteur signifiant « si... alors »

Quelques exemples de telles lois sont la loi de la chute des corps et la loi de la gravitation de Newton.

Une loi résulte parfois des *généralisations empiriques* qui sont des généralisations directes de faits singuliers et observables.

Exemple : La chute des corps à la surface de la terre.

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

En ce sens, une loi scientifique est une généralisation de régularités observables tout en retenant le caractère stable. Elle est représentée par une expression mathématisée qui modélise une corrélation répétable, un comportement constant ou une fréquence statistique observée parmi un ensemble de faits[24].

Remarquer qu'une seule contre-instance nous oblige à rejeter la généralisation empirique.

La loi de la chute libre est un cas de la gravitation universelle qu'on attribue le statut d'*une loi fondamentale* :

$$F = G\frac{mm'}{r^2}$$

La loi fondamentale n'est pas liée de la même manière à un type de phénomènes observés. Elle est liée à des phénomènes supérieurs. Elle domine la généralisation empirique et lui représente une vérité supérieure. Elle les explique et lui assigne son étendue et marque ses limites.

Un grand nombre de généralisations empiriques se sont avérées être des conséquences logiques de lois plus fondamentales. Un bon exemple est la loi du gaz parfait :

$$PV = nRT$$

24 Sagaut, Pierre (2008) : Introduction à la pensée scientifique moderne, p. 33, Paris 6 : Université Pierre et Marie Curie.

Il est bien connu que cette loi est une conséquence du principe de conservation de l'énergie, compte tenu de certaines hypothèses simplificatrices concernant les particules de gaz.

II.2.2. Le principe physique

Lorsqu'une loi dépasse de très loin les faits qui l'ont suggérée, elle acquière le statut de « *principe* » qui est une loi d'un haut degré de généralité, par exemple, le principe d'inertie, le principe de moindre action, le principe fondamental de la dynamique, le principe d'incertitude de Heisenberg, le principe d'Einstein (connu sous le statut de postulat) selon lequel la vitesse de la lumière est une constante supérieure limite pour toutes les vitesses et les équations de Maxwell.

Il existe une différence significative entre les lois et les principes. Si les lois sont des généralisations directes des faits singuliers, observables, en revanche, les principes ne sont pas liés de la même manière à un type de phénomènes observés, i.e. les lois ne sont pas applicables aux masses de phénomènes autant que les principes s'appliquent à la diversité des phénomènes même disparates, exemples :

- Le principe fondamental de la dynamique couvre plusieurs domaines d'application : Mécanique de système des solides, mécanique céleste, la thermodynamique, la mécanique statistique, l'électricité…
- Le principe de conservation de l'énergie, est si généralement applicable qu'il vaut pour les systèmes les plus disparates. Qu'il s'agisse d'étudier une cellule, un atome, un circuit électrique, un système thermodynamique ou même notre propre système solaire, le principe de la conservation de l'énergie est valable pour tous. En outre, l'énergie est une propriété plus abstraite qui ne peut pas être mesurée directement, bien qu'elle se manifeste sous de nombreuses formes différentes telles que l'énergie potentielle, l'énergie cinétique, la masse, l'électricité, etc.

Les physiciens prennent le terme "principe" comme un élément de base qui s'applique à tout objet et indique tout dans la plage d'applicabilité de théorie. En physique, les principes ressemblent plus à des idées directrices qui sert de base à une chaîne de raisonnement, ils permettent aux physiciens de faire des prédictions sur de nouveaux phénomènes et d'élaborer de nouvelles lois qui expliquent clairement ces phénomènes.

Les principes expriment des stipulations qui doivent être respectées par les physiciens, qui ne sont pas des déclarations sur la réalité physique qui peuvent être vraies ou fausses, mais des définitions qui sont vraies par construction. Les principes sont créés par l'homme et n'ont besoin d'aucune justification.

المَبْدَأُ يدلُّ على كلِّ شيء، وكلُّ شيء يدلُّ عليه[25]، غنيٌّ بوضوح دِلاَلاَتِه عن أن يحتاج إلى دليل أو برهان.

Remarque :

Les principes ne sont généralement pas des règles spécifiques que vous pouvez écrire constamment en termes mathématiques. Ils ont une teinte d'incertitude, résultant principalement de leur manque de définition mathématique claire. Par exemples :

- Le principe d'inertie de Galilée.
- Le principe d'incertitude de Heisenberg

Le principe d'incertitude est un principe de la physique quantique, il stipule que :

> *"Lorsque vous mesurez deux aspects d'une particule physique, comme en mesurant à la fois la position et la vitesse d'un objet, vous ne pouvez jamais connaître les deux aspects avec une parfaite précision."*

Bien que ce principe n'ait pas de forme mathématique propre, il a guidé - comme le principe d'inertie ou tous les autres principes - les physiciens à développer des énoncés mathématiques spécifiques pour des cas spécifiques, tels que la position et l'élan d'une particule se déplaçant dans une boîte.

II.2.3. Le concept physique

Selon Ludwig Wittgenstein[26] (1889-1951) :

> *"Les phénomènes ne sont pas cachés ; c'est le concept qui est caché. Et le concept est environné d'autres concepts. Il intervient dans un champ conceptuel, et ses relations nous donnent du fil à retordre"*
>
> *"Les concepts nous conduisent à faire des recherches. Ils sont l'expression de notre intérêt et le dirigent."*

En physique nous entendons parler souvent "d'objets", soit **concrets** (balance, horloge, poulie, thermomètre, ampèremètre, ...), soit **abstraits** (masse, énergie, force, puissance, différence de potentiel...). Souvent on manipule ces objets en leur attribuant des noms et des significations ainsi qu'en les représentants symboliquement. Manipuler ces objets, c'est penser la physique en créant des **concepts**.

25عبد الحميد، بن تشيكو (1994) : محاضرة، المدرسة العليا للأساتذة.

26 Wittgenstein, Ludwig (2004) : Recherches Philosophiques, Paris, Gallimard

Le petit Larousse défini le concept comme :

> *"Idée générale et abstraite que se fait l'esprit humain d'un objet de pensée concret ou abstrait, et qui lui permet de rattacher à ce même objet les diverses perceptions qu'il en a, et d'en organiser les connaissances."*

Un concept est donc un signifié qui peut être exprimé au moyen d'un signifiant, il possède un caractère généralement abstrait, il est attribué à une catégorie d'objets ayant des caractéristiques communes et il saisit abstraitement ce qui est commun à plusieurs éléments ou événements.

عرفه ابن منظور(630 هـ - 711 هـ) في لسان العرب:

"المفهوم مصدر فهم، والفهم معرفتك بالشيء بالقلب، فهمه فَهْماً، وفَهَماً وفَهَامة: عَلِمه. وتفهّم الكلام: فهمه شيئاً بعد شيء."

وعرَّفه أبو البقاء الكفوي (تـ 1094هـ) في معجمه الكليات بقوله:

"المفهوم: هو الصورة الذهنية، سواء وُضِع بإزائها الألفاظ أو لا."

وجاء في موسوعة كشاف اصطلاحات الفنون والعلوم؛ للتهانوي (تـ بعد 1158 هـ):

"والمفهوم والمعنى متحدان بالذات فإن كل منهما هو الصورة الحاصلة في العقل عنده وهما مختلفان باعتبار القصد والحصول فمن حيث أن الصورة مقصودة بالقصد سميت معنى، ومن حيث أنها حاصلة في العقل سميت مفهوم."

"المفهوم ما حصل في العقل سواء بالقوة أو بالفعل."

Le concept scientifique a des caractéristiques particulières et opposées à celles du concept d'usage courant. Pour satisfaire aux règles de la science, un concept doit être précis, clair, monosémique, i.e. qu'il ne peut avoir qu'un seul sens, et univoque, i.e. qu'il ne peut être interprété que d'une seule manière.

Exemple : le concept force à un sens strict, il modélise une interaction soit de contact (force de frottement) soit à distance (force gravitationnelle).

Une force est représentée par un vecteur $\vec{F}$, elle est liée au mouvement par la relation :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

$\vec{p}$: la quantité de mouvement. $\vec{a}$: l'accélération,

m : la masse et t : le temps

Le concept scientifique résulte donc d'un effort de clarification systématique de la définition, de la compréhension, de la représentation et de l'explication de ce qui existe. C'est pourquoi le concept scientifique est une construction de l'esprit isolant certains aspects particuliers des réalités étudiées.

Le concept scientifique est donc un outil intellectuel qui remplit une fonction opératoire dans l'interprétation, de certaines observations ou expériences, permettant d'appréhender efficacement la réalité, et constituant un "instrument de théorie" pour la compréhension des phénomènes.

Exemples :

- Force, masse, vitesse, quantité de mouvement, accélération, énergie, … et les relations entre ces grandeurs.
- Atomes, quarks, neutrinos, particule élémentaire, trous noirs, galaxie, rayon γ
- Champ, potentiel, onde, fonction d'onde, vitesse de la lumière
- …

Ces concepts ont été portés à notre connaissance d'une manière observationnelle, théorique ou expérimentale, ils sont liés entre eux et justifiés par des raisonnements, des preuves, des déductions, des inférences..., ils sont exprimés mathématiquement et constituent ce qu'on appelle : les connaissances conceptuelles ou le système des concepts physique

Les concepts sont les fondements et la base de la connaissance scientifique dans tous les niveaux. Ils constituent le substrat, la substance, le matériau de construction des connaissances conceptuelles de n'importe quelle science notamment la physique.

Les concepts se construisent par le recueil d'informations, de connaissances ponctuelles, puis la comparaison de différentes informations.

Un concept tisse nécessairement un réseau de relations stables avec d'autres concepts. Un concept fonctionnant toujours en relation avec d'autres concepts théoriques et techniques, il est un nœud dans un réseau de relations, cohérent et organisé, et non un élément disposé à côté d'autres par simple juxtaposition ; la formulation d'un nouveau concept peut révéler des contradictions, permettre de formuler différemment des questions dans d'autres domaines, ce qui implique un "bougé" dans des relations entre concepts, une modification des définitions.

Remarque :

Les concepts utilisés en physique ne sont pas figés, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas définis une fois pour toute, mais évoluent au cours de l'histoire.

Exemples :

- Les concepts d'espace et de temps ont acquis une nouvelle conception avec le principe de la relativité restreinte et générale.
- La relation $E = mc^2$ a donné aux concepts : énergie, masse et vitesse un sens différent de leurs sens initial.

II-3. La causalité rationnelle et la causalité empirique

La causalité est sans doute est l'un des sujets le plus important, car presque toutes les disciplines empiriques, notamment la physique, contiennent dans une certaine mesure une proposition causale explicative et la recherche des causes est leur objectif primordial. Lorsque nous recherchons une explication scientifique d'un phénomène donné, nous recherchons souvent sa cause, c'est une attitude intellectuelle qui pousse à trouver ce qui génère les faits et les événements. Une révolution intellectuelle se manifeste généralement au passage de la description du monde à la recherche des causes. Comme le notait A. Einstein[27] :

> *"Le développement de la science occidentale à eu pour base deux grandes réalisations : l'invention d'un système logico formel par les philosophes Grecs (géométrie euclidienne) et la découverte qu'il est possible de découvrir des relations causales par une expérience systématique."*

II.3.1. Les différentes théories de la causalité

La recherche des causes est l'un des fondements de notre connaissance du monde, mais les problèmes posés par l'idée de causalité sont nombreux.

La causalité est un vieux concept, on la retrouve chez Aristote (384-322 av. J. -C.), qui s'est rendu compte qu'il existe des pouvoirs causaux, des dispositions et des tendances dans la nature. En cherchant la cause du mouvement de toutes les choses dans l'univers, Aristote considère "la cause" comme la raison pour expliquer le "pourquoi". La cause c'est ce qui est à l'origine de quelque chose, la philosophie est une recherche des causes du monde, c'est pourquoi on emploi à l'époque des mots comme produire, propager, interagir. Aristote distinguait, en effet, quatre types de causes :

1. Les causes matérielles (En quoi est faite cette chose ?)
2. Les causes formelles (quelle est sa forme ?)
3. Les causes efficientes (qui produit cette chose ?)
4. Les causes finales (dans quelle finalité cette chose existe ?)

Avec la circonscription de l'ensemble des quatre causes, Aristote a fondé le critère de l'universalité qui caractérise la scientificité susceptible de s'appliquer à toutes les disciplines notamment la physique.

27 Dans une lettre célèbre, datée de 1953.

يرى الغزالي أن العلاقة بين السبب والمسبِّب ليست علاقة **"ضرورية لا تتخلف"**، وإنما هي علاقة **"اقترانية عادِيَّة[28]"**، حيث يقول في مسألة الاقتران بين الأسباب والمسبِّبات:

> "إن الاقتران بين ما يُعتقد في العادة سببا، وما يُعتقد مُسَبّبا ليس ضروريا عندنا، بل كل شيئين ليس هذا ذاك، ولا ذاك هذا، ولا إثبات أحدهما متضمِّن لإثبات الآخر ولا نَفْيُهُ متضمِّن نَفْيَ الآخر فليس من ضرورة وجود أحدهما وجود الآخر، ولا من ضرورة عدم أحدهما عدم الآخر، مثل الرّي والشُرب والشَّبع والأكل والاحتراق ولقاء النار والنور وطلوع الشمس ... وهلمّ جرّا، كل المشاهدات من المقترنات في الطب والنجوم والصناعات والحِرَفِ، وأن اقترانها لما سبق من تقدير الله سبحانه لخلقها على التساوق، لا لكونه ضروريا في نفسه غير قابل للفوت... بل للتقدير وفي المقدور: خلق الشبع دون الأكل وخلق الموت دون جز الرّقبة وهلم جرا إلى جميع المقترنات"[29]

والأسباب التي تعارف عليها الناس قد تتبعها آثارها وقد لا تتبعها، والمقدمات التي يراها الناس حتمية قد تعقبها نتائجها وقد لا تعقبها، فمن الممكن أن تحدث أشياء مخالفة لقانون الأسباب والمسببات. فالأسباب والمقدمات ليست بالضرورة هي التي تنشئ الآثار والنتائج، فقد ترجع هذه العلاقة السببية إلى قوة خارج العالم وهو خالق الأسباب ومبدأ كل الأفعال. "لَا تَدْرِي لَعَلَّ اللَّهَ يُحْدِثُ بَعْدَ ذَلِكَ أَمْرًا" (سورة الطلاق: 1)، "وَمَا تَشَاؤُونَ إِلَّا أَن يَشَاء اللَّهُ" (سورة الإنسان: 30)

ما نراه من الاقتران بين الأسباب والمسبَّبات هو اقترانٌ ظاهريّ شكليّ على سبيل التساوُق، لا لأنه ضروريّ، والمسبَّبات تحدث عند أسبابها لا بها A عند B لا أن A بسبب وجود B

Galilée (1564-1642) considérait une cause comme étant un ensemble de conditions nécessaires et suffisantes pour l'apparition d'un effet. Les physiciens après Galilée comme Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) et Leonhard Euler (1707-1783) formulent explicitement qu'il y a un "ordre temporel" entre un phénomène (nommé cause) qui en produit un autre (nommé effet).

Pour de nombreux physiciens, la causalité physique est également une "dépendance logique" due aux lois de la physique exemple :

- La gravitation *implique* la chute d'un corps
- *S'il y a* la gravitation *alors* le corps chute

Cette causalité a une antériorité logique qualifiée d'implication en logique. Isaac Newton (1643-1727) a fait de l'étude de la causalité une étude quantitative qui est le fondement de la physique

Exemple :

- Pour que la force $\vec{F}$ (cause) est proportionnelle à la variation de la vitesse $\overrightarrow{\Delta v}$ (effet) le coefficient de proportionnalité étant, par définition, la masse inerte m.

28 تخضع للعادة والتجربة

29 أبو حامد الغزالي، تهافت الفلاسفة، تحقيق سليمان دنيا (القاهرة: دار المعارف، 1966)، ص. 240-246.

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

Newton a examiné également que le principe de causalité est une des contraintes réalistes imposées à toute théorie mathématiquement cohérente afin qu'elle soit physiquement admissible. Ainsi, il n'est pas évident de voir la cause et l'effet car les lois de la nature sont symétriques temporellement, la causalité est vu donc comme un symétrique.

Les lois expriment des covariations ou les causes ne peuvent être distinguées des effets.

David Hume (1711-1776) s'est opposé à l'idée d'une relation nécessaire entre cause et effet, selon lui, la causalité existe chez nous, elle est le produit de notre esprit. C'est une projection (de notre esprit) que nous faisons sur le monde empirique. La causalité est une sorte de nécessité dans la nature, elle n'est qu'une relation apparente entre évènements.

Selon Hume, tout ce que nous pouvons observer est le suivant :

1- La cause précède l'effet.
2- La cause et l'effet sont contigus.
3- Il y a une corrélation constante de sorte que chaque fois que nous observons le même type de cause, nous pouvons également trouver le même type d'effet.

On peut caractériser la thèse de Hume comme ayant donné les conditions nécessaires à l'utilisation du terme « cause ».

Prenons un exemple : le phénomène de l'ébullition de l'eau (Figure 6)

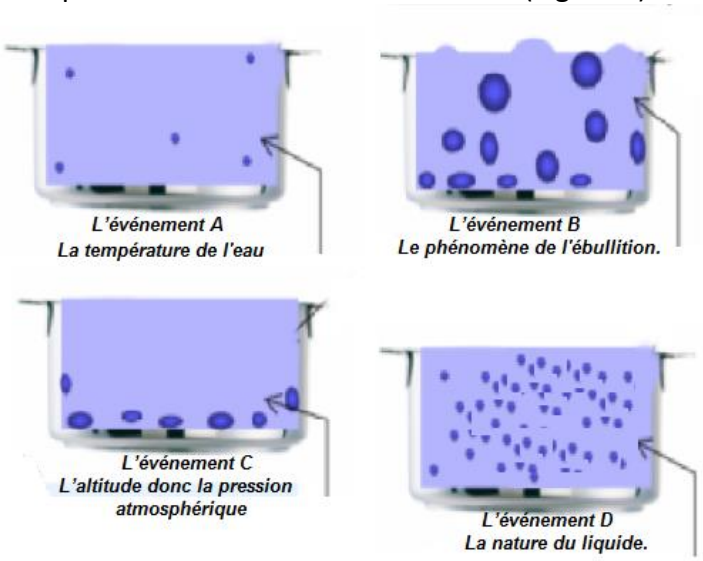


Figure 6: Le phénomène de l'ébullition de l'eau

On a observé, en faisant chauffer de l'eau, qu'elle se mettait à bouillir à partir de 100° Celsius. Cette observation a été faite un nombre incalculable de fois à des altitudes différentes.

Selon Hume, l'idée d'une connexion nécessaire entre l'événement A et l'événement B est une habitude strictement psychologique qui survient après avoir observé la répétition de cas semblables et que l'on a généralisé ces observations, que l'on est passé du particulier au général. Nous devenons conditionnés à attendre que l'événement B subséquent d'un certain type découle de l'événement A, et c'est cette attente qui crée notre croyance en une corrélation nécessaire entre la cause et l'effet.

C'est la perception répétée de la régularité qui engendre la connexion causale qui n'existe qu'entre les idées. Une fois cette connexion acquise, elle engendre à son tour une anticipation.

La causalité pour Hume est une simple conjonction constante : B cause de A si A survient toujours si B advient précédemment.

Pour Emmanuel Kant (1724-1804), la causalité n'est pas une habitude de l'esprit, ou une autre façon de parler de la régularité. La causalité ne peut reposer sur une perception *subjective* car "la simple perception laisse indéterminé le *rapport objectif* des phénomènes qui se succèdent."[30] En d'autres termes, tout ce dont j'ai conscience, ce que mon imagination place l'un avant, l'autre après, mais non que dans l'objet un état précède l'autre.

Dans l'école kantienne, la nécessité de ce principe est d'ordre subjectif : le principe de causalité est l'expression d'une forme a priori de la pensée. La causalité, chez Kant, est une catégorie[31] nécessaire de l'esprit, qui ne peut percevoir directement le temps, qui n'est perçu qu'à travers les changements. La causalité est la catégorie de la pensée qui permet à l'esprit de déterminer le rapport objectif qui existe entre les phénomènes, et non la succession temporelle. La causalité est donc fondatrice de notre connaissance du monde : ce n'est que "*parce que nous soumettons la succession des phénomènes, et, par suite, tout changement, à la loi de la causalité qu'est possible l'expérience même, i.e. la connaissance empirique des phénomènes*."[32] Cette nécessité induit la nécessité de l'existence d'une cause pour tout changement dans le monde.

Le principe de causalité induit donc un ordre dans le temps entre les phénomènes. Mais il n'induit pas le cours du temps : en effet, la cause et l'effet peuvent être simultanés, c'est à dire exister au même temps, sans faire intervenir le **principe des actions retardées**, qui implique l'antériorité de la cause par rapport à l'effet.

Kant considère donc la causalité comme une structure essentielle pour organiser le monde, pour lui on ne peut pas faire une expérience sans concept causal. Le monde

30 Emmanuel Kant (1905) : Critique de la raison pure, Alcan, p. 20.

31 Kant a restreint le sens du mot catégorie, en l'appliquant uniquement aux concepts a priori, aux formes pures de l'entendement, qu'il oppose aux concepts empiriques, c'est-à-dire acquis par l'expérience.

32 Emmanuel Kant (1905) : Critique de la raison pure, Alcan, p. 183.

phénoménal ne serait pas intelligible sans la causalité. Pour Kant, la causalité est donc une dépendance contrefactuelle entre deux évènements :

Si la cause n'avait pas existé, l'effet n'aurait pas existé non plus.

Pour Bertrand Russell (1872-1970), la causalité est définitivement un concept obsolète, il a recommandé aux philosophes d'écarter le mot "cause" de leur vocabulaire et de leur répertoire conceptuel. Parmi ces arguments, la physique moderne ne connaît même plus de lois de succession du tout mais seulement des lois de coexistence ou d'équivalence qui forment le contenu des équations exprimant des dépendances fonctionnelles.

Selon Russell la causalité n'a pas sa place dans une conception scientifique du monde : il faut l'abandonner au profit des lois de la nature.

Prenons par exemple la loi de la gravitation universelle:

$$\vec{F} = G\frac{mm'}{r^2}$$

C'est une loi fondamentale parmi les multitudes des lois de la physique qui sont des lois mathématiques covariantes. Dans cette loi qui exprime l'action à distance, il n'existe rien qui puisse être appelé une cause et rien qui puisse être appelé un effet[33] ; il y a seulement une formule. On ne connait pas donc la cause et l'effet. Si l'action et la réaction sont deux phénomènes strictement simultanés alors leur rapport n'est pas de type causal et si l'effet occupe le même espace que la cause il ne s'agit pas à proprement de parler de causalité.

II.3.2. Extension et reformulation du concept de causalité.

Nous avons vu que la notion de causalité a progressivement disparu en physique, même si le mot cause revient ici ou là : il ne s'agit plus que d'un principe d'antécédence ou de protection chronologique. La notion de cause s'est d'abord dissoute dans la notion de loi et le déclin s'est ensuite poursuivi surtout avec l'apparition des probabilités en physique statistique et la mécanique quantique.

Remarque :

La disparition de la notion de cause ne veut pas dire que le principe de causalité est abandonné, il est simplement épuré de l'idée de cause i.e. sa formulation peut se faire sans l'idée de cause ne soit évoquée. Citons les exemples :

- La mécanique classique : Le principe de causalité implique que le temps contient implicitement une topologie, il doit être linéaire et non cyclique.

33 Bertrand Russell (1986) : On the Notion of Cause, in Mysticism and logic.

- La théorie de relativité restreinte : Le principe de causalité implique l'impossibilité pour une particule matérielle d'atteindre ou dépasser la vitesse de la lumière.
- La Physique quantique non relativiste : Le principe de causalité est garanti par la structure même de l'équation de Schrödinger.
- La Physique quantique relativiste : le principe de causalité requiert la nécessité de l'existence des antiparticules, invariantes dans l'opération CPT (qui consiste à remplacer chaque particule par son antiparticule, à changer les signes de toutes les coordonnées d'espace et à changer le sens du temps.)

Examinons le second exemple :

La théorie de la relativité restreinte a remis en cause des notions de simultanéité et d'espace absolus, elle a élargi le principe de relativité de Galilée en introduisant de nouvelles formules de changement de référentiel galiléen, déduites de l'existence d'une vitesse indépassable (et l'invariance des lois physique), les transformations de Lorentz :

$$t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x)$$
$$x' = \gamma(x - vt) \qquad \text{avec} \qquad \beta = \frac{v}{c} \quad \text{et } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$

La théorie de la relativité restreinte est basée sur l'existence d'une vitesse limite c pour la transmission d'information, transmission qui ne peut se faire que dans l'ordre croissant du temps. Un signale qui se déplace plus vite que c (en avançant dans le temps), d'après les observateurs qui font partie d'un référentiel inertiel, ce signale peut, dans certaines circonstances, reculer dans le temps d'après les observateurs qui font partie d'un autre référentiel inertiel, ce qui implique la violation du principe de causalité.

Cette théorie exige que le principe de causalité soit respecté dans tous les référentiels galiléens. Il faut alors introduire une formulation plus forte du principe de causalité :

Tout effet a une cause et la cause précède l'effet dans tout référentiel galiléen, d'un délai au moins égal à la durée nécessaire pour aller du lieu de la cause au lieu de l'effet à la vitesse indépassable.

Le concept de causalité a été reconstruit pour être à la fois objectif et adapté à la science contemporaine. Un certain nombre d'auteurs ont effectivement placé le concept de cause dans leur vision scientifique du monde en concevant le lien entre la cause et l'effet comme de nature physique, i.e. une quantité d'une grandeur conservée ou basée sur l'un des quatre types fondamentaux d'interaction trouvés dans la nature.

Nous proposons comme exemple la théorie de causalité de Max Kistler[34], dite de « transfert »

> *"Deux évènements c et e sont liés comme cause et effet, si et seulement s'il existe au moins une grandeur physique P, soumise à une loi de conservation, exemplifiée dans c et e, dont une quantité déterminée est transférée entre c et e."*

La théorie du transfert réduit la causalité à la transmission de quantités physiques conservées, comme l'énergie ou les impulsions .C'est une approche qui rend compte de la causalité en tant que processus physique. Cette théorie de la causalité s'applique vraisemblablement à tous les domaines de la physique, comme la mécanique classique, la physique relativiste ainsi que la physique quantique.

Exemple : Selon la théorie de l'électrodynamique quantique les interactions entre les particules chargées peuvent s'exprimer par échange de photons. (Figure 7)

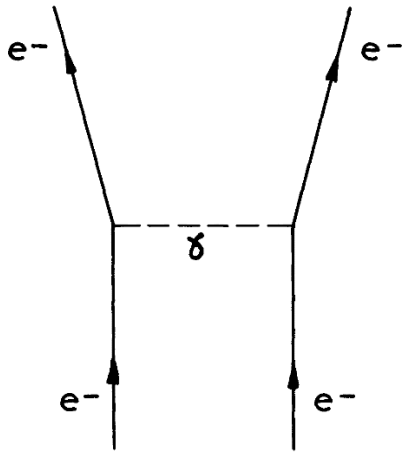


Figure 7: Interaction de deux électrons. Un photon γ est émis par un électron et est absorbé par l'autre électron. Le photon est virtuel ou en devenir.

Si les deux charges électriques sont séparées par une distance finie et sont pris en même moment, alors il ne peut exister de transfert entre ces évènements. La théorie de la relativité interdit en effet le transfert instantané.

Si on considère les deux charges au contraire à des instants suffisamment éloignés par rapport à leur distance spatiale, ils peuvent interagir causalement grâce à l'échange de photon, processus qui établit de même coup l'existence d'une relation causale par transfert et qui est couvert par une loi de propagation propre aux charges électriques[35].

II-4. Déterminisme et Indéterminisme

La notion de déterminisme physique est proposée pour étendre et généraliser la causalité physique. Les deux concepts ont été développés en parallèle et sont souvent

34 Max Kistler, causalité et lois de la nature, Vrin
35 Ibid.

confus. Ils ont accompagné la formation des sciences modernes, et en premier lieu celle de la physique. Nous tentons dans ce paragraphe de clarifier quelques questions épistémologiques relative au déterminisme (ou de l'indéterminisme) et examiner certaines de leurs formes en restreignant la focalisation sur la physique et la philosophie de la physique. Notons que la question du déterminisme est ancienne - elle remonte au temps de la Grèce antique - et touche à un vaste spectre de domaines cognitifs; elle pourrait être étudiée sous divers angles.

II.4.1. La formulation du déterminisme

La plupart des penseurs contemporains sur le thème du déterminisme se sont référés au texte de Pierre-Simon De Laplace (1749-1827) qui a explicité clairement et officiellement une nouvelle conception du monde accessible à la recherche scientifique et reposant sur la croyance en des principes et des lois inflexibles et universelles.

> *"Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en mécanique et en géométrie, jointes à celles de la pesanteur universelle, l'ont mis à portée de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde."*[36]

Le déterminisme comporte deux aspects :

a- Le principe de raison suffisante ou la causalité.
b- La possibilité de prédire de façon exacte.

Le concept de déterminisme n'est donc pas équivalent à celui de causalité, car il stipule quelque chose de complémentaire (la prédiction). Pour qu'il y ait déterminisme, il faut vérifier les deux aspects, sinon nous avons de l'indéterminisme.

<u>Exemple 1</u> : Déterminisme rigoureux des phénomènes mécaniques

36 Pierre-Simon de Laplace, Essai philosophique sur les probabilités, écrit en 1814

Soit un point matériel, elle est regardée en mécanique classique comme parfaitement localisé à chaque instant dans l'espace. i.e. à chaque instant t le point M possède des coordonnées $M(x, y, z)$ parfaitement déterminées. Son état est défini par son énergie E et sa quantité de mouvement p ces grandeurs se déduisent par sa vitesse v et sa masse m qui ont à tout moment une valeur parfaitement déterminée.

Si à t_0 on connait E_0, p_0, x_0, y_0, z_0 et si on connait la cause qui est le champ de force $\overrightarrow{F}$, les lois de la mécanique permettrons de dire qu'a l'instant ultérieur t il occupera telle position x, y, z avec telle valeur de l'énergie E et de quantité de mouvement p.

On dira qu'un système est rigoureusement déterminé si, en raison de l'inévitabilité des lois naturelles, son état futur résulte nécessairement et exclusivement de son état actuel. La connaissance de l'état actuel supposée complète devrait permettre de prévoir intégralement et exactement l'état futur résultant. La Mécanique Céleste, l'Astronomie et la loi d'attraction universelle sont la forteresse du déterminisme.

Exemple 2 : Les équations différentielles déterministes

Les équations différentielles permettent, lorsqu'on connait l'état initial d'un système, de prédire son état d'une manière unique à tout instant ultérieur.

Exemple : Pour établir l'expression de la tension $\vec{T}$ en fonction du temps du système mécanique harmonique suivant : (Figure 8)

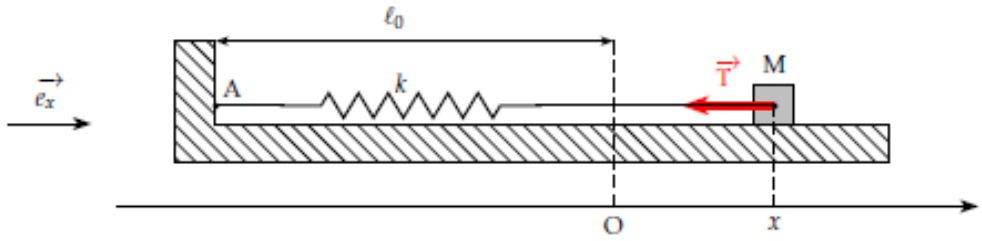


Figure 8: Système harmonique

Le point M est abandonné sans vitesse initiale à l'instant $t = 0\ s$ du point M_0 d'abscisse x_0. D'après le second principe de la dynamique :

$$M\vec{a} = -kx\vec{e}$$

La projection sur l'axe des abscisses donne :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

Le régime est donc périodique : $x = x_0 \cos(\omega_0 t)$ $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

$$\overrightarrow{T(t)} = -kx_0 \cos(\omega_0 t)$$

Si le point M était soumis à une force de frottement proportionnelle à la vitesse, l'équation différentielle serait alors :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0 x = 0$$

Le régime est donc pseudopériodique : γ correspond à l'amortissement

En posant $\omega_p = \sqrt{\omega_0 - \gamma}$ on aurait $x(t) = x_0 \cos(\omega_p t) e^{-\gamma t}$

$$\overrightarrow{T(t)} = -kx_0 \cos(\omega_p t) e^{-\gamma t}$$

Lorsqu'on a un état initial d'un système, l'équation différentielle nous permet d'avoir le déroulement de l'état du système tout au long du future. En suivant l'équation différentiel d'un système, Il y a donc la possibilité unique dans laquelle le hasard n'intervient pas, et le déroulement de comportement du système est totalement déterminé par l'équation qui régit son fonctionnement.

Un phénomène obéit au déterminisme, lorsque étant soumis à une loi il ne peut être autre que ce qu'il est. Il est donc nécessaire de tel sorte que la connaissance supposée complète de l'ensemble des causes et conditions qui le produisent implique la connaissance du phénomène lui-même en tant qu'effet i.e. la connaissance de l'état actuelle du système permet alors de prévoir la reproduction future du même phénomène et cela dans la mesure où elle résultera de la reproduction des mêmes conditions.

En ce sens le déterminisme postule inévitabilité des lois naturelle et leur suffisance pour rendre compte du phénomène. Mais l'idée de déterminisme n'est pas seulement l'idée de soumission à un ensemble de lois causales mais plutôt l'idée d'une nécessité avec laquelle la cause s'exerce.

II.4.2. La formulation du l'indéterminisme

Jusqu'au la fin du 19ème siècle, les scientifiques avaient une vision d'ordre parfait où tout est régit par des lois qui nous sont accessibles et qui permettent de calculer et de comprendre, en principe, l'évolution de tout système et même l'univers dans son ensemble pour l'éternité.

Cette vision a été ébranlée par plusieurs évènements, les plus célèbres sont :

1- Les mouvements chaotiques : Henri Poincaré (1854-1912) montre comment la moindre déviation dans les conditions initiales, la moindre perturbation, la moindre erreur d'arrondi dans les calculs peuvent s'amplifier et empêcher toute prévision à long terme. Mathématiquement le processus est parfaitement déterministe ; physiquement, sur une durée suffisamment longue, il est « chaotique », imprévisible. Le problème des trois corps : c'est un problème qui consiste de calculer la trajectoire de trois masses en interaction gravitationnelle. Les équations de Newton appliquées à ces trois corps conduisent à une équation différentielle impossible à résoudre. Poincaré a démontré en 1893, qu'Il n'y avait pas de fonctions analytiques qui étaient la solution du problème de trois corps[37].
2- Sensibilité aux conditions initiales : Le météorologiste, Edward Lorentz (1917-2008) a redécouvert en 1960 de manière empirique les résultats de Poincaré, il a étudié les solutions d'un ensemble de trois équations différentielles ordinaires, qui représentaient un modèle très simplifié des écoulements dans l'atmosphère, remarqua que, en partant de conditions initiales légèrement différentes, il obtenait des solutions tout à fait dissemblables au bout d'un même temps d'évolution.
3- Le principe d'incertitude : En mécanique quantique le principe d'incertitude de Heisenberg désigne toute inégalité mathématique affirmant qu'il existe une limite fondamentale à la précision avec laquelle il est possible de connaître simultanément deux propriétés physiques d'une même particule ; ces deux variables dites complémentaires peuvent être sa position et sa quantité de mouvement.

$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

La mécanique quantique a apporté la preuve que le déterminisme rigoureux n'est pas viable, elle est considérée par les scientifiques contemporains comme la forteresse de l'indéterminisme. Elle a introduit un changement radical et perspective dans notre manière de voir la nature. Les lois de la nature elles-mêmes comportent une part de hasard qui n'est pas associé à notre méconnaissance des lois physiques ou de la mauvaise qualité de nos instruments de mesure, mais qui a une part intrinsèque au fonctionnement de la nature.

En effet, l'équation de Schrödinger, qui est une des formules fondamentales de la mécanique quantique, est parfaitement déterministe.

37 Poincaré, Henri (1893) : Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste, Tome 2.

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\overrightarrow{\nabla^2}\,\Psi(\mathrm{t},\vec{r}) + V(\mathrm{t},\vec{r})\Psi(\mathrm{t},\vec{r}) = i\hbar\frac{\partial\Psi(\mathrm{t},\vec{r})}{\partial t}$$

$\Psi(\mathrm{t},\vec{r})$ est la fonction d'onde d'un système, elle contient toutes les informations possibles sur cet état à l'instant t et pendant toute l'évolution. Elle caractérise donc le déterminisme quantique de son état.

La fonction $\Psi(\mathrm{t},\vec{r})$ prend ses valeurs dans le corps des nombres complexes. Elle est interprétée comme une amplitude de probabilité de présence.

La probabilité $dp(\mathrm{t},\vec{r})$ pour qu'une particule soit à l'instant t dans un volume $d^3r = dxdydz$ autour de la position $\vec{r} = (r_x, r_y, r_z)$

$$dp(\mathrm{t},\vec{r}) = C|\Psi(\mathrm{t},\vec{r})|^2 d^3r$$

Où C est une constante de normalisation.

En physique quantique, une particule est décrite par une fonction d'onde, souvent notée $|\Psi>$.

$|\Psi>$ est objet mathématique qui nous permet de calculer les propriétés de la particule tels que la position x, la quantité de mouvement p ou l'énergie E.

Soient E_1 et E_2 les énergies possibles que peut avoir la particule, elles sont associées à deux états $|e_1>$ et $|e_2>$.

La fonction d'onde de la particule s'écrit comme une superposition de ces deux états :

$$|\Psi> = a_1|e_1> + a_2\,|e_2>$$

Tels que a_1 et a_2 sont les « amplitudes de probabilité » associées aux deux états.

D'après l'un des axiomes de la théorie quantique, les résultats de mesure des énergies E_1 et E_2 sont obtenues avec des probabilités respectivement égales à $|a_1|^2$ et $|a_2|^2$ avec

$$|a_1|^2 + |a_2|^2 = 1$$

La description quantique des phénomènes physiques n'est plus déterministe, car il n'est possible de calculer que des probabilités de réalisation de prédictions. Ces probabilités en question, selon l'interprétation de Copenhague, sont intrinsèques et le caractère d'indéterminisme observé dans la nature est donc affirmé comme absolument fondamental.

La physique quantique se caractérise par une approche différente de celle que l'on conçoit en physique classique. En comparant le comportement de son système avec

celui de la mécanique classique, plusieurs remarques d'apparence indéterministes peuvent être faites en mécanique quantique :

1- Le caractère probabiliste de la description implique que les prévisions individuelles exactes et complètes y sont en principe impossibles puisqu'une même cause paraissent correspondre plusieurs effets différents[38].
2- La M.Q. ne peut pas donner des valeurs pour une seule particule, mais pour un nombre élevé de particules i.e. elle donne des valeurs statistiques à des variables pour un moment précis et pour tout moment ultérieur ce qu'on appelle "*déterminisme statistique*".
3- C'est l'observation elle-même qui va déterminer les résultats de la mesure d'un système quantique, il y a l'ordre d'observation. Si on mesure de plus en plus exactement une propriété physique, l'autre devient de plus en plus difficile à déterminer et réciproquement.
4- L'expérience ne comporte plus le caractère d'objectivité car l'influence de l'observateur interfère avec le processus de prévision. Les résultats de l'expérience quant à la nature du système apparaissent dépendre de point de vu de l'observateur.
5- En mécanique quantique, avant que la mesure ne soit faite, la fonction d'onde Ψ est effondrée i.e. la mesure modifie la fonction d'onde brusquement et de manière discontinue. Cet effondrement est imprévisible. Par conséquent, le processus de mesure lui-même ne peut cependant pas être décrit par l'équation de Schrödinger.
6- En reproduisant très exactement la même expérience, il est possible que les résultats de ces expériences successives et strictement identiques ne soient pas les mêmes.

On peut caractériser l'indéterminisme comme la négation du déterminisme. Cette théorie épistémologique remet en cause le fait que tout événement soit prévisible en vertu d'une loi physique ou mathématique. Ces lois causales sont remplacées par des lois de probabilités. La physique quantique conduirait à une modification plus ou moins profonde de notre conception de la réalité. Elle postule que l'indéterminisme règne au niveau de l'infiniment petit et que la matière n'obéisse plus au déterminisme bien qu'il y ait causalité. Louis de Broglie asserte :

> *"En physique quantique il n'y a plus de déterminisme, mais il y a encore causalité [...], une causalité sans déterminisme, où la prévisibilité exacte ne réapparaît que dans des cas exceptionnels « purs » [...] Supposer qu'il existe un déterminisme fondamental des phénomènes qui nous resterait caché est une hypothèse métaphysique, un acte de foi, et ce déterminisme ne serait pas celui que le*

38 Kojève, Alexandre (1990) : L'idée du déterminisme dans la physique classique et dans la physique moderne, Éd. Le Livre de Poche, Biblio / Essai, Paris, pp. 48-49

physicien a seul le droit d'envisager et que nous avons défini par la prévisibilité rigoureuse."[39]

Mais après l'avènement de la mécanique quantique, l'épistémologie devrait-elle remettre en question ces catégories traditionnelles de causalité et de déterminisme ? Quel statut confère-t-elle au hasard qui intervient dans la détermination de ces résultats ? Donnons brièvement les postures théoriques de certains physiciens :

L'interprétation de Copenhague de la théorie quantique, représentée par Werner Heisenberg (1901-1976), Niels Bohr (1885-1962), Paul Dirac (1902-1984) et Max Born (1882-1970) rejette le déterminisme et préfère l'explication probabiliste de la mécanique quantique. Pour eux, la réalité quantique est en partie une réalité crée par l'observateur, car parler des propriétés physiques d'un objet quantique sans spécifier très précisément le dispositif expérimental grâce auquel nous souhaitons le mesurer n'a pas de sens.

Pour Louis de Broglie (1892-1987), Erwin Schrödinger (1887-1961), et Albert Einstein (1879-1955), avec l'indéterminisme, la physique était en train de s'engager dans une mauvaise voie : elle n'a plus comme ambition de décrire la réalité mais uniquement de prévoir des événements.

> "Einstein, de Broglie et Schrödinger n'ont cessé d'insister sur ce que l'interprétation statistique de la mécanique quantique avait de peu satisfaisant, de réclamer un retour aux conceptions de la physique classique newtonienne et de proposer des moyens d'y arriver sans contredire aux faits expérimentaux."[40]

Einstein a expliqué les prédictions indéterminées de la mécanique quantique par l'incomplétude du modèle.

Le paradoxe d'EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) a été proposé en 1935 comme un argument pour infirmer le principe d'indétermination. Il a montré que la théorie quantique est soit incomplète, soit elle viole le principe de causalité́ locale, elle doit avoir de certains éléments objectifs. Les auteurs de l'argument EPR ont commencé par émettre des critères qui doivent caractériser toute théorie physique[41]

i) Chaque élément de la réalité́ physique doit avoir sa contrepartie dans une théorie complète.

39 Louis de Broglie (1941) : Réflexions sur l'indéterminisme en physique quantique, in Continu et discontinu en physique moderne.
40 Discours de Max Born, colauréat du prix Nobel de physique, 1954.
41 Einstein, A., Podolsky, B. and Rosen, N. (1935) : Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Physical Review, 47, 777-780.

ii) Si le système n'est perturbé d'aucune manière et qu'on peut prédire exactement la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de la réalité qui correspond à cette quantité physique.

Une théorie des "variables cachées"[42] locales fut alors introduite dans la perspective de revenir à une situation plus traditionnelle et de restaurer, dans le domaine quantique, un déterminisme et une causalité au sens classique tout en préservant les prévisions de la physique quantique. Ces variables cachées sont ajoutées aux variables décrivant les systèmes quantiques indéterministes des paramètres supplémentaires dans le sens d'un déterminisme strictes. Les travaux de Louis de Broglie (1892-1987) et ceux de David Bohm (1917-1992), concernant la théorie "l'onde-pilote" inspirée du principe de la dualité onde-corpuscule et la théorie "la double solution", allaient indéniablement dans ce sens : Une vision déterministe de la mécanique quantique où des variables cachées.

John Stewart Bell (1928-1990), démontra en 1964, un théorème permettant de départager la mécanique quantique (version École de Copenhague) et les théories à variables cachées. Selon ce théorème, les prévisions de la théorie des variables cachées coïncident avec ceux de la mécanique quantique seulement pour certaines orientations de l'appareil de mesure.

Alain Aspect en 1981, et son équipe firent une série d'expériences (dans des conditions similaires à celles d'EPR) qui leur permirent de confirmer les prévisions de la mécanique quantique tout en infirmant les théories à variables cachées locales.

A l'issue de la courte étude qui précède, nous en déduisons que les notions de déterminisme et d'indéterminisme ont constitué un enjeu stratégique majeur au cours de l'évolution de la physique

La physique quantique explique la nature en utilisant les particules élémentaires de la matière : électrons, bosons, gluons, neutrons, etc…, elle étend la physique classique là où cette dernière atteint ses limites. Chaque physique explique les choses avec ses outils à elle. Les lois causales et les objets bien localisés et à mouvement bien défini en physique classique sont remplacés respectivement en mécanique quantique par des lois de probabilité, des phénomènes de délocalisations, et des mouvements qui refusent de se laisser représenter simplement selon l'expression de de Broglie.

Les deux physiques n'ont pas le même rapport au réel qu'ils étudient. Une approche sémantique de leurs théories est nécessaire afin de mieux comprendre les notions de déterminisme et l'indéterminisme. Elle nous permet également de se pencher sur les enjeux épistémologiques et les usages que ces deux notions scietifico-philosophiques ont trouvé dans la pratique scientifique.

42 Les variables cachées sont des paramètres physiques qui n'étaient pas pris en compte lors des expérimentations et qui contribuaient à fausser les résultats.

II-5. Continuité et Discontinuité

L'hypothèse de la discontinuité ou de la continuité de la matière est un débat qui semble-t-il avoir commencé avec les philosophes grecs Empédocle, Démocrite, Leucippe, Epicure puis Aristote. De même, la discussion continue / discontinue de la nature de la lumière était le discours des érudits depuis le 17ème siècle. Nous tentons dans ce paragraphe de parcourir quelques étapes des analyses successives sur le thème de la discontinuité ou de la continuité en répondants aux questions suivantes : Qu'est-ce que la continuité et la discontinuité ? Quelles raisons aurions-nous de concevoir la matière ou le rayonnement comme continue ou discontinue ?

II.5.1. Manifestations de la discontinuité

La discontinuité est souvent définie comme l'absence ou l'interruption de la continuité. Le modèle particulaire de la matière manifeste une discontinuité fondamentale. Cette discontinuité renvoie à la "granularité" et à la "discrétion", elle est fondée sur la "divisibilité" de la matière. Elle repose également sur l'existence relativement indépendante des éléments stables qui constituent la matière : les particules élémentaires, les noyaux, les atomes, les molécules etc. formant une structure lacunaire constituée essentiellement de "vide".

Nous regarderons, du point de vue discontinuité les exemples suivants :

L'atomisme s'est fondé au 5ème siècle avec Leucippe (vers 460 av. J.C.) et Démocrite d'Abdère (460-370) av. J.C. Ce courant philosophique soutient que l'univers est discontinu, composé de matière et de vide. Les atomistes pensent que la matière est constituée d'atomes insécables, solides, pleins et éternels. (Figure 9). Le concept de parties indivisibles était analogue à une poigné de sable, sans connexion, sans consistance et sans continuité. Cette pensée philosophique fut plus tard particulièrement soutenue par Épicure (341-270) av. J.-C., puis par Lucrèce (vers 100 av. J.C.)

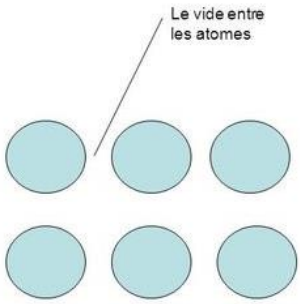


Figure 9: Discontinuité de la matière.

بانفتاح العرب والمسلمين على الفكر الإغريقي، انتقلت النظرية الذرية التي قال بها الفيلسوف الطبيعي اليوناني ديموقريطس إلى الفكر العربي الإسلامي واقترنت باسم المتكلمين من المعتزلة

(الممثلة بأبي الهذيل العلاف، والقاضي عبد الجبار وابن المتوية النجراني) والأشاعرة (الممثلة بالأشعري، الباقلاني، الجويني والشهرستاني)، وقد عُرفت باسم أصيل يختلف عن مصطلح Atome اليوناني و هو مصطلح "جوهر الفرد" أو "الجزء الذي لا يتجزأ". ولإثبات أن العالم مُحْدَث غير أزلي، عمدوا إلى برهان عقلي يُبيّن أن الأجسام مؤلفة من أجزاء لا تتجزأ إلى ما لا نهاية وأنه لابد أن تقف فيها التجزئة عند جزء لا يتجزأ. غير أن المتكلمين لم يقفوا بهذه الفكرة عند هذا المستوى، بل راحوا، في إطار مجادلاتهم في "دقيق الكلام"، يناقشون مختلف جوانبها ويتتبعون كل ما يلزم عنها حتى أصبحت أساسا لنظرية في "الوجود": في المكان والزمان والحركة والفعل... وبالتالي أساسا لرؤية معينة للعالم، رؤية بيانية ذات خصائص مميزة.

Au début du 19 siècle, John Dalton (1766-1844) proposa une théorie atomique fondée sur des bases scientifiques. Les faits expérimentaux montrent que la discontinuité de la matière elle-même provoque la discontinuité observée dans les proportions selon lesquelles les éléments se combinent (les proportions stœchiométriques). Une succession de découvertes expérimentales dans les premières décennies de 20ème siècle a validé cette conception corpusculaire donc discontinue.

La physique newtonienne est vue comme une physique continue, elle a introduit un espace et un temps continus, cependant, elle considère la matière, décrite en terme corpusculaire, comme discontinue. Newton a attribué également à la nature de la lumière un caractère discontinu en proposant une lumière constituée de corpuscules, émis par les corps lumineux, l'air et les corps transparents et homogènes. Les différentes couleurs correspondraient à des vitesses de propagations différentes.

La mécanique quantique a introduit tant de manifestation de la discontinuité fondamentale. Max Planck (1858-1947) est l'un des premiers à inclure des discontinuités à caractère purement mathématique : le concept d'énergie qui ne peut être absorbée ou émise que par paquets ($E = h\nu$ ou h est la constante de Planck). Ce concept de quantification de l'énergie qui est à la base de la mécanique quantique a introduit le discontinu dans la description des phénomènes élémentaires comme l'effet photoélectrique et le rayonnement électromagnétique du corps noir.

Les quanta de lumière d'Einstein, le modèle de Bohr avec les niveaux discrets de l'énergie et des sauts quantiques qui accompagnent l'émission d'un photon, les perturbations dues à la mesure, le spectre discret sont autant des concepts qui convergent vers l'idée de discontinuité.

II.5.2. Manifestations de la continuité

La continuité exprime l'unité, cela renvoie donc à l'inséparabilité, l'ininterruption ou l'interconnexion. Elle indique également la dépendance mutuelle des éléments constituant l'un ou l'autre système ayant un degré de complexité spécifique. Ce qui est continu est stable et indivisible formant un objet ou une structure vue comme un ensemble déterminé qualitativement. L'existence et le développement du continuum résident dans l'unité de ses parties dans leur ensemble.

Nous regarderons, du point de vue continuité les exemples suivants :

Le rejet de l'Atomisme par Aristote (485-323) av. J.C. au profit de la théorie des quatre éléments peut être vu comme une transition de la discontinuité à la continuité.

La théorie des quatre éléments comme unités constitutives de la matière a été proposée par Empédocle d'Agrigente (vers 494 av. J.C.). Pour lui l'univers est constitué de quatre éléments : terre, eau, air et feu qui sont présents dans chaque corps dans des proportions différentes. Aristote, en rejetant la représentation de la matière en parties indivisibles, professait la divisibilité infinie de la matière comme l'espace et le temps. Pour lui l'univers est continu, et le continu ne peut être constitué de petits éléments séparés les uns des autres.

L'espace et le temps de la physique classique sont modélisés par un cadre géométrique précis décrit par l'espace Euclidien R^3 et le temps. Ce cadre présente la propriété essentielle d'être continu. Malgré les changements de concepts, l'espace-temps continu, ainsi construit dans la théorie de la relativité pour rendre compte d'un certains nouveaux phénomènes physiques, adopte toujours le point de vue de la continuité. Cette nouvelle physique utilise toujours les objets mathématiques qui présentent cette notion de continuité – espace, surfaces, lignes, espace de Minkowski, métrique, ligne d'univers, courbure, connexion…

Comme alternative à l'aspect corpusculaire de la lumière adopté par Newton, le physicien et astronome hollandais Christiaan Huygens (1629-1695) a décrit la lumière comme la propagation d'une onde, un phénomène physique continu (Figure 10)[43].

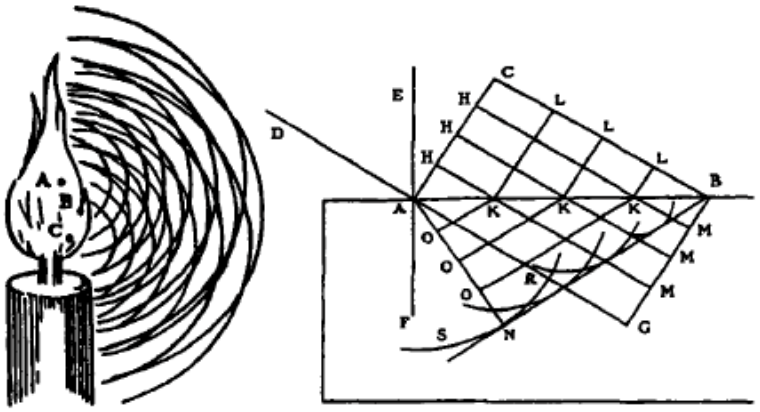


Figure 10: Décomposition de la lumière en ondelettes par Huygens.

La physique classique distingue donc deux catégories d'objets inconciliables[44] : les corpuscules (le discontinu) et les ondes (le continu). Le corpuscule est divisible et occupe un ensemble discret de point dans l'espace, tandis que l'onde est indivisible et occupe à un instant donné, la totalité de l'espace.

La théorie de la gravitation universelle de Newton, la théorie ondulatoire de l'électromagnétisme de Maxwell, la théorie quantique des champs et la fonction d'onde d'un système quantique sont fondées sur un postulat de continuité pour les interactions, les ondes et les champs.

En conclusion, nous dirons que la physique s'exprime en termes de continu et de discontinu, bien que ces deux termes soient contradictoires. La continuité et les

43 Christiaan Huygens, Traité de la Lumière paru en 1690.
44 Bernard Maitte (2005) : la lumière, Seuil

discontinuités qui apparaissent aux physiciens sont relatives à leurs points de vue. Elles n'ont pas nécessairement le statut de réalité mais sont purement formelle, les questions de continuité et de discontinuité en physique sont étroitement liées avec celles qui se posent en mathématiques. C'est le cadre mathématique appliqué qui détermine la propriété essentielle d'un phénomène physique d'être continu ou discontinu. Le débat continu / discontinu n'est pas encore terminé, les deux aspects sont toujours présents dans les différents domaines de la physique.

II-6. Physique et expérimentation

La physique est une science expérimentale, elle est caractérisée par la mise en œuvre d'une démarche particulière "la méthode expérimentale". Cette propriété nous a fait accorder à ses connaissances une valeur particulière ce qui lui a valu un statut privilégié dans notre société.

Les questions qui nous intéressent dans ce paragraphe sont : Quand la méthode expérimentale a-t-elle été introduite pour la première fois dans la science ? Quel rapport d'une expérience privilégiée à la nature de la théorie qu'elle est censée valider ? Quel statut est attribué à l'expérience dans l'acquisition des connaissances ?

II.6.1. La démarche scientifique : rupture arabo-musulmane

L'histoire de la physique montre que la physique grecque était qualitative, intuitive et basée sur le sens commun. Les grecs ont accordé à la raison un rôle primordial. À cet effet, l'utilisation de raisonnements logiques très spéculatifs basés essentiellement sur le langage est prépondérante dans leur activité scientifique. Les grecs sont avant tout d'excellents dialecticiens, leur époque est caractérisée par un grand manque d'expérience.

Par contre, l'élaboration de la méthode expérimentale comme base de la recherche, s'appuyant sur (l'observation, la définition du problème, la formulation de l'hypothèse, sa vérification au moyen de l'expérimentation, l'analyse des résultats, l'interprétation et la publication des résultats), a été une contribution majeure de la civilisation islamique à l'évolution de la science.

Jâbir ibn Hayyân (721-815), le chimiste qui fit de la méthode scientifique un processus de production des connaissances scientifiques, écrivait :

"فمن كان دَرِبًا كان عالمًا حقًا، ومن لم يكن دَرِبًا لم يكن عالمًا، وحسبُك بالدُربة في جميع الصنائع أن الصَّانع الدَّرِب يحذق، وغير الدَّرِب يعطل[45]"

45 جابر بن حيان: كتاب السبعين ص464، ضمن مجموعة كراوس

"Le véritable savant est celui dont le savoir se base sur l'expérience, tandis que celui qui n'a pas mis son savoir à l'épreuve de l'expérience n'est pas un savant".

ومِلاك كمال هذه الصنعة العمل والتجربة؛ فمن لم يعمل ولم يجرِّب لم يظفر بشيء أبدًا[46]"

"L'essentiel de cette science réside dans la pratique et l'expérience. Celui qui ne pratique pas et n'expérimente pas n'aboutira jamais à rien."

"إننا نذكر في هذه الكتب خواص ما رأيناه فقط دون ما سمعناه، أو قيل لنا وقرأناه، بعد أن امتحنّاه وجرَّبناه، فما صحَّ أوردناه، وما بطل رفضناه، وما استخرجناه نحن أيضًا قايسناه على أحوال هؤلاء القوم[47]"

"Nous recenserons uniquement dans ces écrits nos propres observations et ce que nous avons vérifié par l'expérience, et non pas ce que nous avons entendu ou lu ou qu'on nous a relaté. Nous ferons état de ce que nous aurons pu confirmer, et rejetterons ce qui aura été prouvé faux. Nous comparerons alors nos conclusions à leurs affirmations."

En physique, al-Hasan Ibn al-Haytham (965-1039), fondateur de l'optique moderne, pratiqua l'expérimentation contrôlée et raisonnée dans son laboratoire d'optique créé à cet effet. Abu Rayhan al-Biruni (973-1048) observateur attentif et l'un des principaux représentants de la méthode scientifique, fit usage de cette démarche s'appuyait sur le raisonnement mathématique (géométrie) pour le calcul de la circonférence de la terre.

II.6.2. L'expérimentation en physique :

En physique, une expérimentation consiste à réaliser un montage expérimental dans le but, soit d'étudier un phénomène, soit de tester une loi ou une théorie, soit d'accroitre la précision d'une grandeur physique. Selon la définition proposée par Hempel[48],

"l'expérimentation est un examen synthétique d'un ou plusieurs phénomènes et leur observation méticuleuse pour obtenir un résultat précis (vérification d'une hypothèse)".

On distingue trois niveaux dans l'expérimentation :

46 جابر بن حيان: كتاب التجريد، ضمن مجموعة حققها ونشرها هولميارد بعنوان: مصنفات في علم الكيمياء للحكيم جابر بن حيان، باريس 1928م.

47 جابر بن حيان: كتاب الخواص الكبير ص232، ضمن مجموعة كراوس.

48 Hempel, Carl. (1996) : Éléments d'épistémologie. Armand Colin.

- L'observation et la description
- L'induction[49] (généralisation)
- La déduction[50]

La démarche expérimentale vise à observer et expliquer des faits, vérifier des hypothèses et formuler des lois. Expérimenter c'est penser puis mettre en place un protocole artificiel visant la vérification d'une hypothèse en contrôlant les paramètres d'apparition d'un fait. On vise alors la construction de faits exactes par recourt à l'expérience provoquée et contrôlée.

Prenons comme exemple : l'expérience de Michelson et Morley :

L'hypothèse de cette expérience est l'existence d'un "courant" d'éther créé par le déplacement de la terre au travers de celui-ci. Albert A. Michelson (1852-1931) et Edward W. Morley (1838-1923) tente à travers un protocole d'expérimentation de mettre en évidence le mouvement de la terre par rapport à l'éther (considéré comme le support matériel pour la propagation des ondes électromagnétiques selon la théorie de Maxwell). Ils visent donc la mesure de la vitesse de la lumière dans son support supposé (l'éther) et en se basant sur la loi classique d'addition des vitesses.

Le principe de cette expérience est de comparer les temps mis par deux rayons lumineux provenant d'une même source monochromatique pour faire des allers et retours de longueurs identiques dans des directions parallèle et perpendiculaire à celle du mouvement de la terre autour du soleil à la vitesse v. (Figure 11)

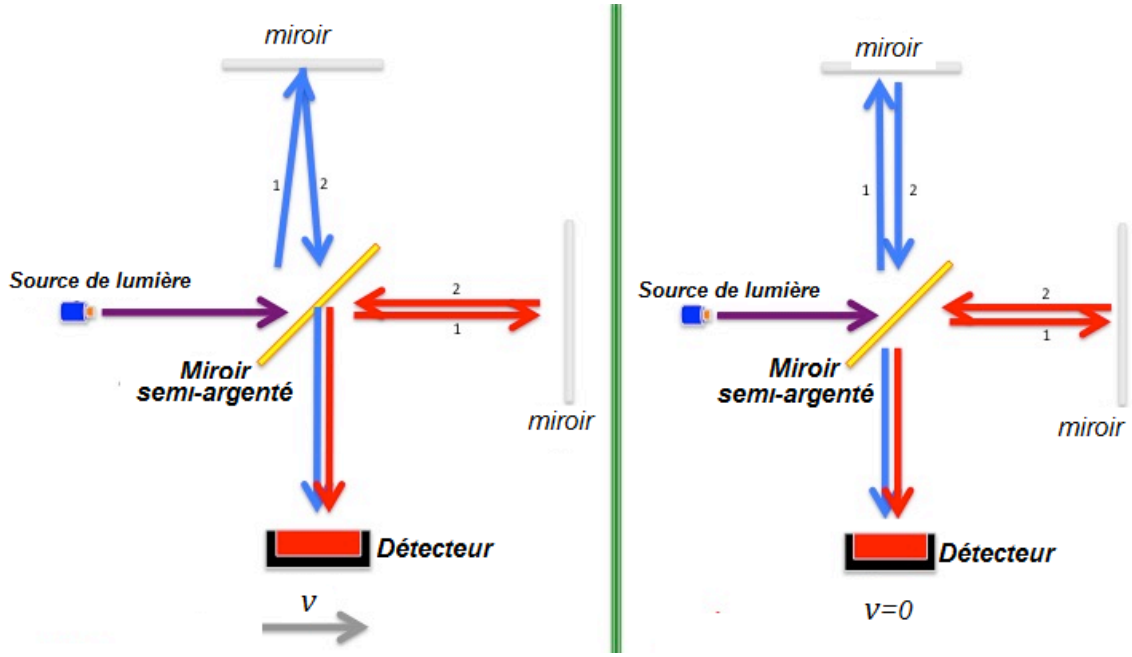


Figure 11: l'expérience de Michelson-Morley

49 Induction : procédure de généralisation qui, à partir de l'observation répétée de certains phénomènes, formule une loi s'appliquant à tous les phénomènes de même genre.

50 Déduction : c'est une inférence dans laquelle, si les prémisses ou les hypothèses ou le cadre théorique sont vraies, la conclusion est nécessairement vraie.

La différence de temps de parcours entre les deux trajets est alors :

$$t_1 = \frac{d}{c-v} + \frac{d}{c+v} = \frac{2d}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} = \frac{2d}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$t_2 = \frac{2d}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = \frac{2d}{c}\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 \approx \frac{2d}{c}\left[1 + \frac{v^2}{c^2} - 1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right]$$

$$\Delta t \approx \frac{d}{c}\frac{v^2}{c^2}$$

Lorsque l'appareil est tourné de 90° ; la différence de temps totale de parcours entre les deux rayons dans les deux expériences double :

$$\Delta\tau = 2\Delta t = 2\frac{d}{c}\frac{v^2}{c^2}$$

Théoriquement le nombre de franges d'interférences déplacé est donné par la relation :

$$\frac{\Delta\tau}{T} = \frac{\Delta\tau}{\lambda}c = 0.44$$

En appliquant cette relation et en y introduisant les valeurs suivantes :

$d = 11m$ $\lambda = 500nm$ $c = 3 \times 10^8\ m/s$ $v = 30\ km/s$

On trouve :

$$\frac{\Delta\tau}{T} = 0.44$$

Mais l'expérience de Michelson-Morley, reproduite de nombreuse fois depuis et avec notables progrès dans la précision des mesures, n'a jamais mis en évidence ce déplacement lors de la rotation d'interféromètre. La lumière se comporte comme s'il n'y avait pas de vent d'éther (indétectable).

Cette expérience est sans doute la plus célèbre des expériences négatives donnant un résultat contraire à ce qui était recherché et ces résultats sont inexplicables dans le cadre théorique de l'époque. Par contre vingt ans plus tard, cette expérience retrouve sa célébrité avec les hypothèses de la relativité restreinte. Elle a été considérée avec cette théorie son explication intrinsèques et son application immédiates et constitue ses fondements de base.

L'expérience n'a pas donc un statut unique, il diffère en fonction des conceptions des scientifiques concerné et leur regard épistémologique sur les sciences i.e. leur prise de position par l'un des cinq grands courants principaux (rationalisme, empirisme,

positivisme, constructivisme et réalisme). Nous centrons ici notre attention sur certains positionnements épistémologiques :

- **Selon l'approche empiriste et l'approche inductive :** l'expérience est considérée comme étant *le point de départ des connaissances*. Les lois et les théories ne sont que des formulations abrégées d'expérience. Selon ces approches, il n'existe pas quelque chose qui s'appelle « loi de la nature » et il faut s'en tenir, par conséquent aux résultats des expériences. L'approche inductive peut être résumée par le schéma OHERIC (Observation, Hypothèse, Expérience, Résultat, Interprétation, Conclusion). Selon ces approches, l'expérience de Michelson-Morley montre que la vitesse de la terre par rapport à l'éther était donc nulle ou rejette son existence. Cette expérience n'a pas donc de signification, c'est une expérience négative pour valider l'existence de l'éther.

- Selon l'approche rationaliste et l'approche hypothético-déductive : L'expérience ne sert qu'à *vérifier les hypothèses de départ*, ce sont les principes de base qui sont à la base des connaissances. Selon ces approches, les résultats de l'expérience de Michelson et Morley sont en faveur de la théorie de la relativité restreinte. Les hypothèses théoriques telles que, la contraction des longueurs de Fitzgerald-Lorentz, l'invariance de la vitesse de la lumière c ont permis d'expliquer l'étonnant résultat de cette expérience. On note qu'Einstein n'a pas mentionné dans son texte cette expérience comme preuve de sa relativité restreinte. Selon lui il est possible d'aboutir à la constance de la vitesse de la lumière de manière *déductive* et ceci pratiquement sans effort, en partant d'un phénomène familier de l'électrodynamique de son temps.

- Selon l'approche constructivisme : Le scientifique doit agir sur les résultats de l'expérience en appliquant divers processus d'abstraction tels que l'abstraction logico-mathématique. Ainsi, l'interprétation de l'expérience de Michelson Morley après vingt ans de sa réalisation indique que l'objet de connaissance n'est pas divulgué mais construit. Pour les constructivistes aucun résultat expérimental n'éliminera jamais une théorie. Elle peut notamment être réinterprétée.

- Selon l'approche Kantienne : Kant considère que toute connaissance provient de l'expérience. C'est seulement à partir de celle-ci qu'une réflexion est possible. Par ailleurs, l'expérience n'est pas exhaustive et ne fournit pas directement tout ce qui est nécessaire pour qu'une connaissance se mette en place. Les caractères d'universalité et de nécessité n'étant pas dans l'expérience, ils doivent, de quelque manière, appartenir à la pensée. Ainsi, c'est avec les formes *a priori* de l'intuition pure[51] de l'espace et de temps et l'apparition des nouveaux corpus théoriques (transformation de Lorentz, l'espace-temps de Minkowski) en plus de l'expérience de Michelson-Morley que les connaissances de la physique classique ont subi des transformations profondes.

- Selon l'approche falsificationnisme méthodologique de Karl Popper : L'évolution de la science a pu se produire au sein de tout processus scientifique, et notamment sur les problèmes rencontrés dans les différentes étapes : collecte de données et insuffisances de l'observation, échec d'expérience. Selon Karl Popper "Le critère du statut scientifique

51 à l'opposé des connaissance empiriques,

d'une théorie est sa falsifiabilité, ou réfutabilité, ou testabilité"[52]. Pour le falsificationnisme, l'échec d'une expérience scientifique influe le développent de la science car la science progresse par les conjectures et les réfutations et donc par essais et erreurs. Ainsi l'échec de l'expérience de Michelson-Morley a déclenché une chaîne d'événements qui conduisent inexorablement à une relativité restreinte.

II-7. Physique et mathématique

Science très ancienne, la physique a énormément évolué au cours de son histoire. Son évolution a concerné à la fois, ses connaissances, ses idées, ses objectifs et sa méthodologie. La physique aristotélicienne était qualitative et intuitive basée sur le sens commun, par contre, sous la civilisation islamique, la physique est devenue une science quantitative et expérimentale[53] à base d'expériences, d'inductions et de raisonnements. À partir de Galilée et Newton, la physique devint mathématisée. Elle s'exprime par des lois générales universellement applicables, qui prennent l'expression de relations mathématiques entre diverses quantités physiques.

Bien que la physique utilise abondamment les mathématiques, cette utilisation est souvent mal comprise. Partant du constat que les cours de physique, renferment de nombreuses relations mathématiques, on peut poser la question : quel est le rôle des mathématiques en physique ?

II.7.1. Rapports entre la physique et les mathématiques.

Il est indéniable qu'il existe une relation particulière universellement reconnue entre la physique et les mathématiques. De nombreux scientifiques célèbres ont explicitement été témoins de ce lien au point qu'ils admettent qu'il n'est pas possible de vraiment penser et comprendre la physique sans faire appel au langage mathématique. Les citations suivantes en attestent :

Galilée :

> *"La philosophie est écrite dans cet immense livre qui continuellement reste ouvert devant les yeux (ce livre qui est l'Univers), mais on ne peut le comprendre si, d'abord, on ne s'exerce pas à en connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. II est écrit dans une langue mathématique, et les caractères en sont les triangles, les cercles, et d'autres figures géométriques, sans lesquelles il est impossible humainement d'en saisir le moindre mot;*

52 Karl Popper (1963) : Conjectures and Refutations

53 Seul Archimède et, plus tard, Ptolémée, chez les Grecs, ont eu une démarche de ce type. Les autres ont eu essentiellement une démarche qualitative.

sans ces moyens, on risque de s'égarer dans un labyrinthe obscur."[54]

Poincaré :

"Toutes les lois sont tirées de l'expérience, mais, pour les énoncer, il faut une langue spéciale ; le langage ordinaire est trop pauvre, il est d'ailleurs trop vague, pour exprimer des rapports si délicats, si riches et si précis. Voilà donc une première raison pour laquelle le physicien ne peut se passer des mathématiques ; elles lui fournissent la seule langue qu'il puisse parler."[55]

Einstein :

"D'après notre expérience à ce jour, nous avons le droit d'être convaincus que la nature est la réalisation de ce qu'on peut imaginer de plus simple mathématiquement. Je suis persuadé que la construction purement mathématique nous permet de trouver ces concepts et les principes les reliant entre eux, qui nous livrent la clef de la compréhension des phénomènes naturels."[56]

"Riemann parvint ainsi, par la pure spéculation mathématique, à la pensée de l'indissociabilité de la géométrie et de la physique, dont l'idée, soixante-dix ans plus tard, devint réalité avec la théorie de la relativité générale, par laquelle la géométrie et la théorie de la gravitation se fondent en une seule entité."[57]

Heisenberg :

"Les mathématiques constituent pour ainsi dire le langage à l'aide duquel une question peut être posée et résolue […] Les formules mathématiques ne représentent plus la nature, mais la connaissance que nous en possédons […] L'idée que les mathématiques peuvent s'adapter aux objets de notre expérience est remarquable et passionnante ;

54 Galileo (1980) : Il Saggiatore; traduction française de Christiane Chauviré, L'Essayeur, Paris : Les Belles-Lettres. p.232.
55 Poincaré, Henri (1911) : La Valeur de la Science, Paris : Flammarion. p141.
56 Einstein, Albert Cité par Lévy Leblond dans penser les mathématique, p.195
57 Einstein, Albert (1926) : Géométrie non-euclidienne et physique.

notre connaissance de la nature est représentée par des formules."[58]

Les physiciens ne peuvent donc s'en passer des mathématiques car elles leur permettent de modéliser et ainsi d'étudier des phénomènes qui sont généralement très complexes. La plupart des branches et des concepts des mathématiques sont devenu des outils fréquents de la physique, à noter, l'analyse, l'algèbre, la géométrie, la topologie, les probabilités et l'arithmétique.

Comme exemples, les équations différentielles ordinaires ainsi que les équations aux dérivées partielles modélisent divers phénomènes physiques dans des situations très variées, la résolution algébrique de ces équations donne la fonction solution modélisant le phénomène, cette fonction peut être représentée graphiquement par la courbe intégrale. Les fonctions périodiques notamment les fonctions trigonométriques sont des outils de modélisation des phénomènes cycliques et des phénomènes oscillatoires et périodiques.

Les fonctions d'une variable complexe sont aussi très utiles pour modéliser et décrire les propriétés physiques telles que, les phénomènes dynamiques, qu'ils soient mécaniques ou électromagnétiques, thermiques ou associés à une diffusion de particules, possédant une fonction de réponse suite à une sollicitation extérieure. Les nombres complexes, qui n'ont pas été tirés de l'expérience, offrent la possibilité de construire un formalisme mathématique abstrait qui peut servir à modéliser et prédire des phénomènes physiques.[59]

La théorie des probabilités permet de modéliser les phénomènes aléatoires, elle est très utilisée en mécanique quantique et en physique statistique. L'algèbre linéaire forme le langage de base dans lequel la mécanique quantique est exprimée, c'est un outil indispensable à l'étude rigoureuse de l'évolution d'un système quantique. La théorie des groupes sert de fondement à la classification des états de la matière. La topologie connaît un élan considérable en mécanique quantique et relativiste comme en physique des hautes énergies, le modèle standard et la cosmologie. La géométrie différentielle possède un intérêt considérable pour la physique, elle propose un cadre de réflexion où l'on fait ressortir l'identité géométrique des objets manipulés et la formulation de nombreuses théories physiques : l'électromagnétisme, la relativité générale, les théories de Jauge.

Les mathématiques interviennent, à la fois, comme outil, et sont constitutives de concepts de la physique, tous les concepts de la physique trouvent leurs représentations mathématiques et aucun domaine des mathématiques n'est dispensé par la physique.

58 Heisenberg, Werner (2000) : La nature dans la physique contemporaine, Paris : Gallimard Folio Essais. p.67.

59 Bächtold, M. & Hausberger, T. (2013) : Les nombres complexes : entre mathématiques, physique et philosophie. IREM de Paris - Université Paris Diderot. pp. 78-88.

Le physicien crée parfois les mathématiques qui lui sont nécessaires, d'ailleurs, bon nombre de mathématiciens ont été aussi physiciens.

II.7.2. Réflexion épistémologique des liens entre mathématiques et physique

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à la nature de la relation entre mathématiques et physique. Comment l'appréhender ? Étant la science la plus liée aux mathématiques par rapport aux autres sciences, la physique utilise avec succès les mathématiques. Quelles sont les causes de ce succès ?

Ces questions nous amènent à définir les sciences de la physique et des mathématiques ainsi qu'à étudier certains des textes d'éminents auteurs scientifiques en physique qui ont marqué les grandes étapes de son évolution, comme Galilée, Poincaré, Einstein et Heisenberg dont leurs textes ont été cités dans le paragraphe précédent.

La physique est la "science qui étudie les propriétés générales de la matière et établit des lois qui rendent compte des phénomènes matériels."[60]. Quant aux mathématiques sont "l'ensemble des sciences qui ont pour objet la quantité et l'ordre, l'étude des êtres abstraits (nombre, figure, fonction, etc.), ainsi que les relations qui existent entre eux."[61]

La physique apparait donc comme la science qui étudie les êtres naturels, tandis que les mathématiques étudient les êtres abstraits. A première vue, il semble que les objets d'études des deux disciplines sont assez éloignés. Quel lien existe-t-il entre l'être abstrait, immuable et subjectif qui n'est ni naturel ni artificiel et l'être concret avec une telle ontologie objective ?

La physique contemporaine est une science expérimentale, la mesure[62] est le principal moyen de trouver les lois de la nature. La mesure traduit l'expérience en un tableau de nombre, ces données sont traduites en symboles abstraits qui subissent des opérations purement intellectuelles pour donner des règles précises qui s'adaptent aux phénomènes naturels. Parfois, les calculs permettent de dire à l'avance une mesure. Selon le texte de Galilée, la question qui se pose : Le langage mathématique est-il un langage humain imposé à la nature comme une vision, ou un langage de la nature découvert par les humains ? C'est le statut de la mesure[63] ou de l'expérience qui détermine la réponse à cette question.

60 Le Petit Robert (1993).
61 ibid.
62 La mesure est le fait de correspondre aux opérations de calcul effectuées dans un corps de nombre, des opérations empiriques bien définies pour le phénomène considéré.
63 Le physicien Lord Kelvin écrivait "La physique c'est la science de la mesure."

Malgré leurs méthodes différentes, les mathématiques et la physique sont de plus en plus étroitement liées. Le mathématicien invente lui-même les règles et les concepts propres à sa méthode et à son domaine tandis que le physicien trouve par un certain artifice les règles offertes par la nature. Au fil du temps, les règles des mathématiciens trouvées se révèlent être les mêmes que celles que la nature a choisies. Exemples :

Les équations aux dérivées partielles du premier ordre inventées vers 1770 par Clairaut Alexis-Claude (1713-1765) et Euler Leonhard (1707-1783) :

$$df = \frac{\partial f}{\partial x}(x, y)\, dx + \frac{\partial f}{\partial y}(x, y)\, dy$$

Les dérivées partielles secondes développées par d'Alembert Jean Le Rond (1717-1783) puis par JACOBI Carl Gustav Jacob (1804-1851) :

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$$

Ces équations apparaissent naturellement dans la modélisation de nombreux problèmes en physique telles que : les équations d'Euler puis ceux de Navier et Stokes, pour les équations de la mécanique des fluides, ceux de Fourier pour l'équation de la chaleur, de Maxwell pour celles de l'électromagnétisme, de Schrödinger et Heisenberg pour les équations de la mécanique quantique, et bien sûr d'Einstein pour les équations de la théorie de la relativité générale.

Les mathématiques constituent pour la physique des instruments de représentation et de prédiction (et de retro-diction). James Clerk Maxwell (1831-1879) a perçu, grâce aux mathématiques, les ondes électromagnétiques se propageant dans l'espace vide, sans support matériel, et a déduit de ses équations la vitesse théorique c à laquelle elles sont censées se propager. Les expériences du physicien Heinrich Hertz (1857-1894) valident plus tard sa prédiction.

Les mathématiques ont une grande aptitude de fournir des structures explicatives, en particulier pour les sciences physiques. Plusieurs branches des mathématiques forment la base explicative des nouvelles théories physique. L'idée du champ est une construction purement mathématique, et les équations de Maxwell forment le cadre par lequel nous arrivions à unifier l'électricité et le magnétisme, elles montrent également que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'ondes et à la vitesse de la lumière, d'où l'explication des phénomènes électromagnétiques. Les transformations de Lorentz expliquent l'espace-temps de la relativité restreinte. La théorie gravitationnelle se manifeste par une courbure de l'espace-temps, qui est une nouvelle vision de l'espace et du temps, elle est décrite par l'équation d'Einstein, encore appelée équation du champ gravitationnel, qui s'exprime sous la forme globale suivante :

$$\boldsymbol{G}_{ij} = \chi \boldsymbol{T}_{ij}$$

$\boldsymbol{G_{ij}}$: tenseur d'Einstein qui représente la courbure de l'espace-temps en un point.
$\boldsymbol{T_{ij}}$: tenseur énergie impulsion représentant la contribution de toute la matière (et énergie) à la densité d'énergie en ce point du champ gravitationnel.

Cette équation aux dérivées partielles décrit la manière dont la matière et l'énergie modifient la géométrie de l'espace-temps.

Mathématiquement articulée, la physique agit décidément comme un "treuil ontologique"[64] : à partir d'argument mathématique on peut prédire l'existence de nouvelles sortes d'objets physiques. Les mathématiques sont donc un instrument qui révèle de nouveaux éléments de réalité qui seraient inaccessibles autrement : Exemples :

- Découverte de Neptune (première planète découverte par le calcul).
- Découverte des trous noirs, les étoiles à neutrons, la matière noire… les ondes gravitationnelles.
- Découvertes de nouvelle sorte de particules : positron, photons, antimatière, les neutrinos, boson de Higgs, les quarks…

Le physicien Eugène Paul Wigner (1902-1995) utilise le terme "miracle"pour exprimer l'efficacité des mathématiques en physique, et ce miracle permet un dévoilement de la nature aussi impressionnant qu'émouvant[65].

Le lien entre les mathématiques et la physique se manifeste parfois par "une générativité conceptuelle", i.e. un grand nombre de concepts nouveaux mathématiques sont générés par la physique, tout comme les mathématiques révèlent des concepts physiques. Les deux sciences progressent grâce à des outils que chacune fournit à l'autre. Prenons l'exemple de vecteur, les origines de ce concept ne sont ni exclusivement mathématiques, ni liées aux domaines de la physique. En effet, elles sont le fruit d'une contribution solidaire de ces deux disciplines. De nombreux scientifiques mathématiciens et physiciens ont contribué à l'évolution progressive du concept de vecteur et de l'analyse vectorielle citons : William Rowan Hamilton, Simon Stevin, Caspard Wessel, Peter Guthrie Tait, Gaspard Gustave Coriolis, Hermann Günther Grassmann, Giuseppe Peano, James Clark Maxwell, Oliver Heaviside, Cesare Burali Forti…

D'autre part, une autre perspective distincte qui concerne des relations envisageables entre mathématiques et physique, illustrée dans l'utilisation des mathématiques "riche en invariant " en physique. Cette perspective, manquante dans les autres sciences, intervient de manière essentielle en physique, elle attribue à ses lois une portée ontologique générale, universelle, objective et indépendante des phénomènes étudiés. Exemple : Les groupes de transformations de Galilée, de Lorentz, les invariances par les différentes symétries et antisymétries (les théorèmes de Noether)

64 Selon l'expression d'Étienne Klein (2011) : Comment dire ce dont parle la physique ? champ lacanien,2(10), pp 181-194
65 ibid.

et les covariances et contra-variances qui sont fréquemment utilisés dans l'électromagnétisme, la relativité restreinte, la relativité générale, la mécanique quantique.

En conclusion, Bien que les mathématiques soient également liées à d'autres sciences autres que la physique, ils existent des relations distinctes entre les mathématiques et la physique. Le lien des mathématiques avec la physique est très subtil. Les mathématiques interviennent dans plusieurs étapes fondamentales de la physique. Mais ce lien n'est pas seulement un lien fonctionnel tel que la modélisation, l'élaboration des théories ou la réalisation des différents processus de calcul, aujourd'hui le lien entre physique et mathématiques a atteint une telle diversité, un tel degré d'intensité au point de le voir comme relation à caractère constitutive et formative qui doit être étudiée en profondeur.

Chapitre III :
NATURE DES THÉORIES ET DES RAISONNEMENTS EN PHYSIQUE.

1. Science et perception sensitive.
2. Sciences rationnelles – jugement rationnel et la déduction.
3. Sciences empiriques – jugement empirique et l'induction.
4. Le fondement empirique et la nature de l'observation.
5. La dynamique des théories scientifiques et la croissance de la connaissance.

Chapitre III : NATURE DES THÉORIES ET DES RAISONNEMENTS EN PHYSIQUE

Préambule

Nous nous proposons dans ce chapitre de cerner la nature de la théorie scientifique à travers son lien avec les facultés de perceptions (قوى مدركة) dans leurs pleines acceptions : diversités et amplitudes de degrés d'abstraction (مراتب التجريد).

Ces facultés de perceptions, selon un nombre de philosophes et penseurs sont au fondement de l'acquisition de la connaissance scientifique de l'univers sensible. Citons à titre d'exemple : Ibn Khaldun, Locke, Leibnitz, al-Ghazālī …

Notre étude sera essentiellement centrée sur deux de ces facultés : Al-hiss al-mushtarak (الحس المشترك) et Al-wahm (الوهم) qui nous ont paru revêtir, selon nous, une importance toute primordiale.

Il nous parait cependant nécessaire d'attirer l'attention du lecteur, avant le début de ce chapitre, que ces deux facultés ont une signification précise et particulière, dans les doctrines philosophiques arabo-musulmanes qui n'a point d'équivalent dans les différentes approches épistémologiques contemporaines qui peuvent en conséquence lui apporter incontestablement, un enrichissement susceptible de répondre à certains questionnements d'actualité.

III.1. Science et perception sensitive

Les diverses perceptions sont à l'origine de toute connaissance possible "avoir des idées et avoir des perceptions est une seule et même chose".[66]

III.1.1. Lien entre théorie scientifique et perception.

Les sciences empiriques que nous qualifions d'habituelles débutent par les perceptions sensitives étant donné qu'elles émanent du monde extérieur à travers les sens, autrement dit : L'être humain est dénué de toute information (extérieure) et ce sont ses cinq sens qui l'informent de ce qu'il y a en dehors de son mental. On ne peut pas imaginer un être humain privé dès sa naissance de tous ces cinq sens, et si c'était le cas, sa vie mentale n'évoluerait plus.

Ces perceptions extérieures sont consignées à des percepteurs intérieurs qui aperçoivent d'autres imperceptibles par les sens. Ces diverses perceptions sont encore ordonnées pour dévoiler l'inconnu. Autrement dit, il y a deux sources d'où proviennent toutes les idées et donc toute notre connaissance : la perception (extérieure) qui est la sensation et la perception (intérieure).

66 Locke, J., (2000) : An essay concerning human understanding

On aboutit à cette fin grâce à l'acte de pensée, selon Ibn Khaldun :

"لا يفتر عن الفكر فيه طرفة عين، بل اختلاج الفكر أسرع من لمح البصر. وعن هذا الفكر تنشأ العلوم وما قدمناه من الصنائع"[67].

"L'être humain ne peut pas être indépendant de sa pensée. Cette dernière ne connaît pas une seconde d'interruption, son agitation est plus rapide qu'un clin d'œil. Et de la pensée que les sciences naissent".

A titre d'exemple ; faisons une analyse des modèles théoriques proposés pour la conception de la lumière, un phénomène lié au sens le plus puissant : la vision, qui joue un rôle fondamental dans l'acquisition des connaissances humaines. L'objectif est d'examiner les modes de production des connaissances scientifiques, en précisant le rôle des facultés de perception et leurs degrés d'abstraction dans leurs constructions (Table 2).

Scientifiques	**Période**	**Théories proposées**
Pythagore	-570/-480	Proposent la théorie du feu visuel ou intérieur – le Quid-
Euclide	-330/-270	
Démocrite	-460/-370	Propose la théorie – Eidola – la lumière est émise par le corps.
Platon	-428/-348	La rencontre de 2 particules, l'une émise par l'œil, 1'autre par l'objet observé.
Aristote	-384/-322	Mouvement se propageant entre l'objet et l'œil au travers l'éther.
Ibn Sahl	940/1000	Première mention de la loi de la réfraction. Caractérisation des milieux transparents par un certain rapport constant propre.
Ibn Al-Haytham (Alhazen)	965/1039	Propose l'existence indépendante de la lumière de l'œil et de l'objet et se propage rectilignement avec une grande vitesse. Il établit une véritable théorie corpusculaire de la lumière.
Descartes	1596/1650	Fait connaître les lois de la réfraction établies par Ibn Sahl et Snell (1591/1626). Et propose que la lumière résulte de frottements entre tourbillons qui font naître de la lumière qui se propage avec une vitesse infinie.
Fermat	1601/1665	Propose le principe de moindre temps.
Newton	1642/1727	Pense que la lumière est constituée de corpuscules qui se propagent à une grande vitesse.

67إبن خلدون: المقدمة، ألفه سنة 1377م الموسوم "كتاب العبر، وديوان المبتدأ والخبر في أيام العرب والعجم والبربر، ومن عاصرهم من ذوي السلطان الأكبر."

Christian Huygens	1629/1695	Propose la nature ondulatoire de la lumière.
Louis Malus	1775/1812	Confirme la nature ondulatoire et pose les prémisses de la polarisation de la lumière.
Thomas Young	1793/1829	Confirme par l'interférence la nature ondulatoire de la lumière.
James C. Maxwell	1831/1879	Les ondes lumineuses ne sont qu'un cas particulier des ondes électromagnétiques.
Hendrick Antoon Lorentz	1853/1928	Interprète l'expérience de Albert Michelson (1852/1931 Etats-Unis) sur la mesure du vent d'Ether du à la rotation de la terre, Lorentz montre l'impossibilité de l'existence de l'Ether.
Heinrich Hertz	1857/1894	Découvre l'effet photoélectrique en 1887.
Max Planck	1858/1947	Introduit la notion de quantum.
Albert Einstein	1879/1955	Montre que la lumière est bien formée de photons d'énergie égale à un quantum (hν) qui se propagent à la vitesse de la lumière.
Louis de Broglie	1892/1987	Propose la dualité onde – corpuscule de la lumière.

Table 2: Tableau chronologique de l'histoire de la conception de la lumière.

Et, comme résultat d'analyse des diverses théories associées à la réalité de la vision et à la nature de la lumière, nous constatons que :

- Ces théories sont structurées sur la base de la perception directe du sens de vision (observation de la lumière, du feu, du soleil, de l'arc en ciel…) ou à travers des appareils expérimentaux (formation d'images à l'aide de lentilles, prismes, miroirs sphériques, franges de diffraction, la décomposition de la lumière blanche, télescope, spectroscope, instruments extrêmement sensibles…) que nous les considérons comme des extensions de ce sens.
- Ces théories sont exprimées par des unités de plus en plus abstraites tels que : rayon lumineux, propagation rectiligne, vitesse, indice de réfraction, flux, onde, corpuscule, principe de moindre temps, polarisation, champ électromagnétique, densité spectrale, fréquence, longueur d'onde, énergie, quantification, constante de Planck, continuité et discontinuité.
- Ces théories sont différentes et parfois contradictoires bien qu'ils représentent la conception d'un même phénomène.
- Tous les jugements associés à ces théories sont des jugements partiels. La théorie de Pythagore n'explique pas pourquoi nous ne verrions pas la nuit. La théorie de Newton n'explique pas les interférences de Young, et la double réfraction. L'expérience de Michelson nie l'existence de l'éther qui est le fondement de la théorie ondulatoire ; ce dernier n'explique pas l'effet

photoélectrique, et la dualité parait paradoxale qu'une même chose peut avoir deux natures différentes etc…

Les sciences empiriques se structurent en passant des données sensitives à l'édification des théories plus abstraites et plus éloignées du monde tangible

En structurant nos théories du monde extérieur, nous débutons généralement par les faits, en s'élevant à des stades de plus en plus abstraits et loin du monde tangible où les facultés de perception humaines jouent un rôle primordial dans l'édification de ces modèles.

L'être humain perçoit les réalités sensibles au travers des sens et les réalités abstraites avec le mentale. Les unes et les autres sont conditionnées par la perception humaine. Ainsi toute réalité sensible est conditionnée par l'existence de la perception sensible de même que les réalités abstraites non tangibles sont conditionnées par l'existence de l'appréhension mentale.

Donc le savant s'élèvera de ses observations sensorielles qui s'appuient sur les perceptions sensitives pour accéder à la structuration des conceptions différentes de la réalité des choses et que l'on appelle *théories*.

III.1.2. La perception extérieure.

Les objets de la nature peuvent être perçus dans différentes modalités sensorielles. C'est par les cinq sièges sensoriels que nous appréhendons perceptivement le monde extérieur : la vision, l'ouïe, le toucher, le goût, l'odorat. La lumière est donc le phénomène physique qui agit sur l'œil, le son sur l'ouïe, la température sur le sens de tact…

> *"La sensation est la source à partir de laquelle coule notre pensée, il n'existe rien dans l'intellect qui n'ait été auparavant dans le sens"*[68]

La perception extérieure est accomplie par l'interaction de l'appareil sensoriel avec l'objet perçu ; par conséquent, elle apparaît comme une puissance qui scelle l'image du concevable sur l'appareil percepteur : l'image du perçu est imprimée sur cet appareil ; l'œil perçoit une image visuelle ; l'ouïe, une image sonore et le toucher une image tactile. Les cinq sens reçoivent donc une image et non la matière. On définit cette perception extérieure comme étant l'acquisition d'une image par le sens exempte de sa matière. Pour Aristote l'organe sensible reçoit les formes sensibles qui sont leurs images mais non leur matière, comme la cire reçoit l'empreinte de l'anneau sans fer ou l'or dont l'anneau est composé.

De là, on aperçoit la première image qui s'imprime sur l'être humain. Cette image abstraite (de la matière) représente l'empreinte ou le modèle de la réalité extérieure, et

68 Locke, J., (2000) : An essay concerning human understanding

la sensation n'est qu'une faculté (parsemé dans le sens) qui modélise cette perception lorsqu'il y a interaction sens-sensible où le premier accepte l'image de l'autre.

La sensibilité ne se limite pas aux relations qui impliquent une excitation venue du milieu extérieur et l'intervention des sens, proprement dits ; elle se manifeste également dans les relations intérieures entre organes profonds que leur autonomie végétative met en quelque sorte, hors de surveillance de la conscience. De plus, les pièces de l'appareil locomoteur : muscle, tendons, ligaments, os, articulations sont douées de sensibilité et pour cela, dotées de récepteurs appropriés aux excitants mécaniques.

En discutant la théorie de la matière et la théorie de l'esprit, Henri Bergson ne s'est trouvé que face à des images :

> *"Les nerfs afférents sont des images, le cerveau est une image, les ébranlements transmis par les nerfs sensitifs et propagés dans le cerveau sont des images encore."*[69]

Les caractéristiques de nos appareils sensoriels imposent que l'image perçue est :

- **Incomplète :** vu la limite de nos récepteurs. Une quantité considérable d'information est perdue. Ce déficit peut être enrichi par l'invention d'instruments perfectionnés.
- **Fragmentaire** et **isolée** ou élémentaire vu l'autonomie de chaque sens :

> *"Chacun de nos sens ne connaissant jamais ce que connaissent les autres sens, jamais ce qui est commun à tous les sens, comme l'égal ou l'inégal, l'un et le plusieurs, et, en bref, le monde unique que nous croyons connaître par leur moyen, jamais rien de tout cela ne sera connu par un des sens, ni par aucune autre partie du corps, aucune partie ne pouvant être ce que sont les autres."*[70]

L'image unifiée et globale d'un objet extérieur nécessite donc un autre pouvoir de perception.

- **Instantanée** et **immédiate** vu la nécessité de la présence du perceptible d'une part, et de l'appareil percepteur d'autre part. En absence de l'un ou de l'autre, la perception cesse.
- **Abstraite** de la matière mais accompagné par les attributs ou les appartenances du sensible tels que : la quantité, la forme, le mouvement, le repos, l'intensité, la localisation dans l'espace, la distance et ce que nous considérons comme premier degré d'abstraction est uniquement l'absence de la matière.
- Parfois **erroné**. L'œil voit le grand petit, le mouvant immobile, il existe divers exemples d'illusions optiques.

69 Bergson, H., (1911) : Matter and Memory: An Essay on the Relation of the Body to the Mind.
70 Chartier, E., (1902) : L'idée d'objet. Revue de métaphysique et de morale, 10, 409-421.

Toutes ces images provenant des sens constituent le soubassement de la connaissance, mais cette connaissance est partielle et insuffisante. En plus de ces images instantanées, ils existent d'autres qui seront perçues après réflexion.

Les facultés de perception extérieures ont une limite à ne pas franchir et cèdent la fonction à d'autres facultés perceptibles qui s'interagissent avec ces images primitives.

À elle seule donc, la perception extérieure ne peut constituer une connaissance, il est nécessaire que les images récoltées par celle-ci, se réunissent dans une autre faculté perceptrice qui les discerne, les synthétise, les combine, les joint… et les sauvegarde en absence des sensibles…

Les facultés de perception extérieures abstrayaient une catégorie d'abstraction en modélisant les images de l'objet dans les sens. Ibn Sīnā et al-Ghazālī appellent l'abstraction la disjonction ou le décollement de l'image du sensible :

" الإدراك أخذ مثال حقيقة الشيء لا الحقيقة الخارجية، فإن الصورة الخارجية لا تحل المدرك بل مثال منها."[71]

"La perception est l'acquisition ou le prélèvement du modèle de la réalité de l'objet et non la réalité extérieure. Ce n'est pas l'image extérieure qui s'établit dans le percepteur mais uniquement son modèle."

III.1.3. La perception intérieure.

La perception intérieure est une ascension de la perception extérieure, son sujet est les images abstraites saisies par les cinq sens accompagnées par ses attributs.

On se limite dans ce présent chapitre à détailler l'abstraction de deux facultés perceptrices qui jouent selon notre jugement un rôle plus important ou plus étendu dans l'édifice du savoir scientifique, surtout en physique, qui est une science empirique, c'est-à-dire, qui est fondée sur l'observation et sur l'expérience et non sur le raisonnement seul.

a) Al-hiss al-mushtarak[72] : ou phantasia qui dérive d'un mot grec qui signifie l'imagination) qui se localise d'après Avicenne dans la première cavité du cerveau au niveau du lobe frontal[73].

b) Al-wahm[74] : situé derrière la cavité cérébrale centrale.

---

71 al-Ghazālī, Abû Ḥamid, (1981) : معارج القدس في مدارج معرفة النفس, Échelons de la sainteté dans les degrés de la connaissance de l'âme. Bayrût : Dar al Afak al Jadida.

72 La traduction linguistique d' "Al-hiss al-mushtarak" est le mot "sens commun", mais ces deux terminologies n'ont aucun lien sémantique. Notre concept a le sens du centre des facultés de perception extérieure.

73 Avicenna (1988) : Psychology of ibn Sina According to His Work النّفس من كتاب الشّفاء. Arabic text. Paris : Patrimoine Arabe et Islamique

74 On a trouvé le nom de cette faculté dans la doctrine avicennienne de la perception qui se prononce en arabe " القوة الوهمية ", puis repris par d'autres savants musulmans, tels que al-Ghazālī, Averroès et Ibn Al-Arabi, Al Fârâbî. Il n'y a aucun rapport de sens entre ce concept et sa traduction "illusion", qui donne un aspect négatif à cette faculté, et rejette la qualité positive précisée au sous-paragraphe III.1.3.2.

III-1.3.1. Al-hiss al-mushtarak

Selon Avicenne et al-Ghazālī, al-hiss al-mushtarak est le sens intérieur dans lequel se réunit l'ensemble de toutes les sensations assignées dans les sens apparents. Il leur tient de centre. Il regroupe les images de perceptions identiques, telles les deux images reçues par chacun des deux yeux, tels les deux sons perçus par chacune des deux oreilles, mais aussi de perceptions différentes telles que l'image et le son, le son et le tact, l'image et l'odeur et le tact... d'une sensation donnée. C'est le centre des facultés de perception extérieure.

C'est par al-hiss al-mushtarak qu'on perçoit que ce mouvement appartient à tel corps, que telle chute est celle de telle balle qui a telle couleur et qui provoque sur la terre tel son. Il est donc l'unificateur des perceptions extérieures. Sans lui nous serions incapables de mettre le lien entre les divers phénomènes. Al-hiss al-mushtarak est une faculté dont le rôle n'est que la perception des images émanant des sens apparents, du fait qu'elle n'agit pas sur elles et ne les conservent pas. Al-hiss al-mushtarak est une faculté qui gouverne les cinq sens en les dirigeant ou les orientant ou les guidant, et en lui se conjuguent les perceptions.

Exemples :

- Un point tournant ou tombant nous parait comme ayant une forme circulaire ou une ligne droite. L'empreinte du mobile est fixée dans al-hiss al-mushtarak et, avant que cette image ne s'en efface, une image nouvelle apparaît ainsi. Sans al-hiss al-mushtarak, on n'aura perçu ni la droite ni le cercle.
- Dans l'expérience "Toupie multicolore" d'Ibn el Haytham ou l'expérience de Newton, on voit que le disque multicolore est blanc. En effet al-hiss al-mushtarak unifie ces couleurs.
- Les illusions optiques sont dues généralement à l'agroupement d'un ensemble de figures. Lorsqu'al-hiss al-mushtarak unifie ces figures, il en forme d'autres et impose à l'œil de les percevoir. (Figure 12)



Figure 12: Exemple d'illusions optiques

Al-hiss al-mushtarak unifie les cercles noirs manquants et formant les sommets du triangle qui apparaît concrètement plus éclatant que la feuille. Dans la figure 2a, il apparait clairement un triangle plus éclatant et dans la figure 2b, le triangle apparaît comme un triangle aux cotés curvilignes.

Au niveau d'al-hiss al-mushtarak, la transmission des sensibles peut s'effectuer de l'intérieur (al-hiss al-mushtarak) vers l'extérieur (les cinq sens) de sorte que ces derniers soient guidés ou gouvernés ou dirigés par lui. Pour montrer la puissance de cette faculté et sa maîtrise des cinq sens, citons l'expérience du physicien Stratton à la fin de 19ème siècle[75], qui avait imaginé de porter des lunettes sur lesquelles il avait fixé des prismes qui lui donnaient une vision inversée du monde dans lequel il circulait, de sorte que le ciel se trouvait en bas, que l'eau sortant du robinet s'élevait vers le haut, etc... ; au troisième jour d'une expérience qui devait être éprouvante et malgré le port des lunettes inversant la vue, le monde perçu s'est remis à l'endroit.

Cette expérience d'inversion a été reproduite par Kohler (1964) : Le sujet porte de façon permanente un dispositif composé d'un miroir qui réfléchit les objets situés en bas et les faits appariaient inversés en haut. En pareil cas, cette inversion est corrigée pendant ce laps de temps très courts, puis de façon permanente au bout de neuf jours : par la suite quand le sujet enlève les lunettes, il voit d'abord le monde à l'envers, avant de pouvoir à nouveau le percevoir tel qu'il est dans son orientation normale[76].

C'est des vues réelles et non pas des imaginations. Al-hiss al-mushtarak qui gouverne les sens apparents, oblige l'œil de percevoir le monde dans son état original.

Les images unifiées par cette faculté expriment une forme abstraite de la matière. Elles ne se trouvent pas dans la réalité sensible. Elles conservent toutes les particularités de l'objet sensible, mais ces images cessent dès que le sensible est absent des sens extérieurs. Elles constituent donc un nouveau modèle, plus exhaustif et plus intéressant à l'édification de la connaissance scientifique. Ce nouveau modèle (qui est l'image) est abstrait de la matière mais toujours liée aux appartenant du sensible.

III-1.3.2. Al-wahm

Cette faculté est citée par divers savants arabo-musulmans dans leur doctrine de la perception, tels qu'Avicenne dans ses traités consacrés à l'âme. Nous n'avons pas trouvé son équivalent en français ; c'est pourquoi on l'appelle al-wahm[77].

On peut percevoir à côté des objets sensibles partiels des sens partiels qu'aucun de nos sens ni al-hiss al-mushtarak ne peuvent percevoir, tels que le courage, la peur, la générosité, la sympathie...

Selon Avicenne[78] :

---

75 Expérience citée par Tiry, G. (1994) : Connaître le réel mythe ou réalité. Lyon : Chronique sociale.

76 Expérience citée par Rigal, R. (2003) : Motricité humaine : fondements et applications pédagogiques. In tome 2 développements moteurs, Canada : Presses de l'Université de Québec.

77 H. Wolfson montre qu'il y a une traduction assez bien choisie de "wahm-aestimativa". A l'époque classique le mot latin "aestimare" avait le sens de juger ou penser ou croire. Il est utilisé par les philosophes et théologiens au cours de 12ème siècle. Le substantif "aestimatio" exprime une connaissance inférieure. Pour Saint Bernard de Clairvaux, l'aestimatio est le mode de connaissance propre aux sceptiques qui ne possèdent aucune connaissance sûre et doutent de toutes choses. Wolfson dans une série de publications, The Internal senses . . . (In Harvard theological Review. XXVII (1935) précise bien l'équivalence wahm-aestimatio qui signifie : connaissance inférieure à celle obtenue par le raisonnement et connaissance qui évalue quelque chose.

78 Avicenna (1988) : Psychology of ibn Sina According to His Work النّفس من كتاب الشّفاء. Arabic text. Paris : Patrimoine Arabe et Islamique

"القوة الوهمية وهي قوة مرتبة في نهاية التجويف الأوسط من الدماغ تدرك المعاني غير المحسوسة الموجودة في المحسوسات الجزئية كالقوة الموجودة في الشاة الحاكمة بأن هذا الذئب مهروب عنه وأن هذا الولد هو المعطوف عليه."

"La faculté d'al-wahm est une faculté corporelle située derrière la cavité cérébrale centrale et qui perçoit les sens partiels liés aux sensibles partiels. C'est cette faculté qui incite la brebis à sentir que ce chacal est à fuir et que cet enfant est tendre."

En effet, les sens perçus par cette faculté sont partiels et existent dans les sensibles partiels d'une façon liée directement aux objets ou par analogie. Ainsi la brebis qui perçoit l'agressivité du chacal perçoit une agressivité partielle. On entend par la perception partielle du sens, la liaison du sens à l'existence de l'objet qui le concerne directement. Autrement dit la perception du sens est conditionnée non pas par l'existence de l'objet dans sa totalité ou généralité mais une partie seulement ou une spécificité: l'agressivité perçue par la brebis n'est pas liée à notion du chacal en général mais liée à l'aspect du chacal ou son image ou quelque chose en lui. Si l'un de ces aspects est caché, comme le fait de dissimuler l'image du chacal, la perception cesse malgré l'existence du chacal, et le sentiment d'agressivité augmente ou diminue selon la pluralité ou l'exiguïté du nombre de chacals, son éloignement et son rapprochement...

La faculté d'al-wahm a une fonction autre que la perception, nous la considérons comme le fondement de l'édifice du savoir scientifique : c'est la source de tous les jugements ou les opinions ou les points de vue dont la vérité n'est pas affirmée par la raison ; autrement dit, les jugements injustifiables ou inexplicables ; par exemple notre conception du vide entre les atomes. Si le vide "absolu" existe comment le perçoit-on ? Et que veut dire l'existence du vide à l'extérieur ? Et quelles sont ses caractéristiques ? Le vide n'existe pas à l'extérieur, il a une ontologie mentale au niveau de la faculté d'al-wahm.

Bien que les jugements de la faculté d'al-wahm proviennent des sensations, elle peut feindre d'accorder un jugement de la raison sur ces sensations. Al-wahm n'accepte pas l'indivisibilité infinie de la matière mais elle y met une limite, et cette faculté ne concède pas de localiser un corps, son mouvement, son odeur, sa couleur et sa forme... dans un même espace mais elle adopte la disjonction en disposant entre eux un voile[79].

Les jugements de la faculté d'al-wahm dérivent du concevable sensible, autrement dit, par sa nature elle est plus proche des sensibles ; par conséquent, ces jugements sont partiels et peuvent être incertains et adverbiaux.

C'est cette faculté qui génère des "jugements incompatibles" pour des mêmes données observables, autrement dit, elle est l'origine de l'existence de conceptions allélomorphes pour un même phénomène. C'est donc le siège de diverses ontologies

79 al-Ghazālī, Abû Ḥamid (1983) : معيار العلم في فن المنطق, Critère de la connaissance dans l'art de la logique, pp29-30, Bayrût : Dar El Andalous.

devenus relatives chez les scientifiques de même discipline. La thèse de Quine de la sous détermination de la théorie par l'expérience en témoigne [80]

> *"La théorie physique peut varier même lorsque toutes les observations possibles demeurent fixes. Les théories physiques peuvent être inconciliables et cependant compatibles avec toutes les données possibles, même au sens le plus large. En un mot, elles peuvent être logiquement incompatibles et empiriquement équivalentes.".*

La faculté d'al-wahm est la source des "jugements ambigus et inexplicables" qui sont très nombreux, et c'est à cause d'elle qu'on ne peut pas concevoir des réalités perçues par des relations mathématiques telles que l'énergie et les ondes électromagnétiques.

Est-ce donc al-wahm qui nous empêche de comprendre la réalité de la théorie de quantification donnée par Max Planck ? N'est-elle pas l'obstacle qui nous entrave de passer outre la dualité onde -corpuscule.

En répondant à la question "Qu'est-ce que l'énergie ?", Feynman a dit :

> *"Il est important de réaliser que dans la physique d'aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie. Nous n'avons pas de représentation comme quoi l'énergie viendrait en petits paquets d'une certaine quantité."*[81]

L'énergie n'a-t-elle pas un autre degré d'existence qui échappe à la perception d'al-wahm ? Et en essayant de donner une description approximative des ondes électromagnétiques, il atteste :

> "Je suis navré, mais je ne peux pas, je ne sais pas comment, je n'ai aucune image de ce champ électromagnétique, Je ne peux vraiment pas me construire une image qui se rapproche même à peu près des vraies ondes."[15]

Ces ondes ne sont-elles pas des perçus inimaginables, plus élevés, plus abstrait dont la faculté d'al-wahm, ne peut ni les concevoir ni les représenter, telles que l'idée, l'humanité et l'animalité… et qui nécessite un autre pouvoir de perception.

De là, on perçoit qu'al-wahm passe à un autre degré d'abstraction. En effet l'image acquise est un sens qui est, dans son essence, une entité abstraite. Cependant il est toujours lié aux attributs du concevable.

---

80 Quine, W. V. O. (2015) : Word and Object. New edition, with a foreword by Patricia Churchland, Cambridge Mass. : MIT Press.

81 Feynman, Richard (1979) : Le cours de physique de Feynman, mécanique1. p.150, Paris : InterEditions

En conclusion Les facultés de perception sont ordonnées dans un enchainement gradué. Elles s'amorcent par la faculté la plus simple contiguë à la matière, et se complètent par des facultés plus élevées et plus éloignées d'elle, puis elles s'élèvent à la raison.

Les cinq sens et, par l'orientation d'al-hiss al-mushtarak, ôtent l'image de la matière avec ses attributs. L'image est partiellement enlevée; en effet elle nécessite la présence du sensible pour sa perception. Cependant l'imagination la libère totalement de la matière, et la présence du sensible n'est plus indispensable pour la perception. L'image et ses attributs sont maintenus à son absence, c'est pourquoi cet enlèvement est plus robuste, tandis que la faculté d'al-wahm passe à un autre degré d'abstraction plus élevé, car elle acquiert les sens qui sont dans leur essence des entités abstraites. L'abstraction à ce niveau est plus robuste et vigoureuse mais l'image reste toujours attachée à ses attributs.

L'opération d'abstraction est une activité native de l'être humain. Elle débute par la perception extérieure gouvernée par al-hiss al-mushtarak, puis vient la perception intérieure qui passe à un degré plus élevé où elles sont gouvernées par la faculté d'al-wahm qui couronne tous les percepteurs corporels et les emploie.

Les facultés d'al-hiss al-mushtarak et al-wahm ont un rôle constitutif et prépondérant dans l'édifice du savoir scientifique. Le premier engendre l'image unique et l'octroi aux percepteurs intérieurs qui l'abstraient de plus en plus à de différents degrés jusqu'à ce que la faculté d'al-wahm émette son jugement. Ces jugements sont empiriques qui s'appuient sur les perceptions extérieures.

Le monde extérieur est la source de la connaissance humaine, et l'être humain est prédestiné à recevoir cette réalité objective en s'appuyant sur ses facultés de perception sensitives et sur sa raison pour parvenir à une théorie plus abstraite qui est le modèle de la réalité objective.

III.2. Sciences rationnelles - jugement rationnel et la déduction

La science rationnelle est une tentative d'explication des choses pour obtenir un résultat solide sans s'appuyer directement sur l'observation et l'expérimentation. En sciences rationnelles, l'esprit cherche à formuler quelques relations constantes existant dans les phénomènes indépendamment de toutes circonstances variables de temps, de lieu, de personnes.

Ibn Khaldûn définit la science rationnelle comme un ordre de connaissance naturel à l'homme, auquel il parvient par sa propre réflexion :

" وأما العلوم العقلية التي هي طبيعة الإنسان من حيث أنه ذو فكر فهي غير مختصة بملة بل يوجه النظر فيها إلى أهل الملل كلهم ويستوون في مداركها وهي موجودة في النوع الإنساني منذ كان عمران الخليقة "[82]

"Les sciences rationnelles que l'être humain acquiert naturellement par l'exercice de sa réflexion ne sont pas spécifiques à une communauté. Elles ne se manifestent que dans l'espèce humain, cependant toutes leurs communautés sont égales dans sa perception."

Les sciences rationnelles sont fondées sur la raison, i.e. qui proviennent de la raison, qui procèdent par un raisonnement logique indépendant de l'expérience ou de l'observation extérieure.

Cependant, tout au long de l'histoire de la science, la définition de sa rationalité a fait l'objet de diverses interprétations :

1- Les scientifiques grecs considéraient la métaphysique comme la connaissance rationnelle par excellence. Pour Aristote, la physique n'était que "seconde" par rapport à la métaphysique, i.e. qu'elle en était dépendante, qu'elle n'était au fond qu'une application au domaine de la nature, des principes supérieurs à la nature se reflètent dans ces lois.
2- Les scientifiques arabo-musulmans considéraient les sciences rationnelles (علوم عقلية) les connaissances que l'homme les dérive de sa raison (عقل) grâce à son interaction continue avec les phénomènes naturels, sociaux, politiques, économiques et urbains… En revanche, les sciences imposées ou positives (علوم وضعية نقلية) sont fournies par la loi islamique (الشريعة) ou la tradition et n'ont pas de place pour la raison. Parmi les sciences, qu'Ibn Khaldûn les classées comme sciences rationnelles dans son livre prolégomènes (المقدمة), nous mentionnons : La logique, la physique (les minéraux, les végétaux, les animaux, les corps célestes et les mouvements naturels), La métaphysique, Les Mathématiques (la géométrie, l'arithmétique, la musique et l'astronomie).
3- Les scientifiques contemporains n'envisagent les sciences rationnelles que les êtres logiques, le savoir théorique ou les théories formelles, les principes généraux, les schémas abstraits ou modèles, les idéals, les concepts cohérents, les axiomatiques, les systèmes hypothético-déductif de relations nécessaires… Il existe des variantes de la rationalité, chaque domaine et chaque

82ابن خلذون: المقدمة، ألفه سنة 1377م الموسوم "كتاب العبر، وديوان المبتدأ والخبر في أيام العرب والعجم والبربر، ومن عاصرهم من ذوي السلطان الأكبر."

discipline a ses propres postulats et modes de raisonnement qu'il considère comme rationnels.

Mais si on définit les sciences rationnelles comme celles qui relèvent de l'exercice de la raison, ou qui sont conformes à la raison et à ses normes, alors, on doit définir précisément la raison et donner ses normes.

La raison est une faculté universelle, c'est une propriété distinctive de l'être humain. Selon le dictionnaire Larousse, la raison désigne la faculté de raisonner (former les concepts et es idées abstraites), de juger (distinguer ce qui est vrai de ce qui est faux, discerner le bien du mal), de connaitre (source de connaissances universelles et nécessaires), de penser, de concevoir, d'expliquer, de fixer des critères de vérité et d'erreur…

العقل عند علماء العرب والمسلمين هو حقيقة الانسان الأولى يُدْرِكُ بها نفسه ويُدْرِكُ بها غيره وهو صفة يتأتَّى بها إدراك العلوم وقيل: هو قُوَّة للنفس بها تَسْتَعِدُّ للعلوم والإدراكات. فالعقل الكامل يهتم بالحسِّ والمعنى وماهيَّته:

1- هو ما يُدرِك به العلوم.
2- هو ما يُميِّز بين الحقّ والبّاطل.
3- هو ما يُفرّق بين الضَّار والنَّافع.
4- هو ما يَعرِف المُهمَّ والأَهمَّ.
5- وهو الذي يقول الأنا أي هو المسؤول والمُجازى والمُخاطب والمُحاسب.

تتحدد طبيعته وتسميته حسب أفعاله ونشاطاته ومُدْرَكَاتِه:
فباستعداده المحض لإدراك المعقولات يسمى العقل الهيولي، وباستعداده لقبول العلوم النظرية، وتدبير الصناعات الخفية الفكرية يسمى العقل الغريزي، وكونه يدرك الماهيات المجردة للأشياء فهو العقل النظري وكونه يعرف الضار والنافع ويحكم بحُسْن الحَسَن وقُبْح القبيح وما إلى ذلك فهو العقل العملي وكونه ينقش العلوم في الصَّدْر يُسمَّى لُبا ومن حيث أنه يُبلِّغ الانسان أوامر الله يُسمَّى ملاكا وباعتباره يدرك حقائق الدِّين يُسمَّى البصيرة الباطنة أو نور الإيمان.

III-2.1. Le jugement rationnel et la déduction.

Un jugement est l'acte "mental" par lequel une chose est affirmée ou niée par une autre.

يُعرِّف الإمام السنوسي الحُكْمَ في شرحه لأم البراهين على أنه: "إثبات أمر لأمر أو نفي أمر عن أمر. والحاكم بذلك إما الشرع أو العقل أو العادة، فلهذا انقسم الحكم إلى ثلاثة أقسام: شرعي، عادي وعقلي."[83]

C'est un acte de l'esprit par lequel deux notions ou idées qui sont appréhendées comme distinctes sont comparées dans le but de vérifier leur accord ou leur désaccord.

83 أبو عبد الله محمد بن يوسف السنوسي، شرح أم البراهين في علم الكلام، تحقيق: مصطفى محمد الغماري، المؤسسة الوطنية للكتاب، الجزائر، د(ط)، 1989، ص21.

أمَّا معنى الحكم العقلي "فهو إثبات أمر أو نفيه من غير توقف على تكرر ولا وضع واضع" [84]

وَحُكْمُنَا العَقْلِي قَضِيَّةٌ بِلاَ وَقْفٍ عَلَى عَادَةٍ أَوْ وَضْعٍ جَلاَ [85]

Le jugement rationnel, c'est l'affirmation ou le déni d'une chose par une autre indépendamment de la répétabilité (l'expérience) ou de la tradition (chari'a ou loi islamique).

الحكم العقلي منحصر في ثلاثة أقسام: "الوجوب والاستحالة والجواز. فالواجب ما لا يُتَصَوَّرُ في العقل عَدمُه، والمُستحيل ما لا يُتَصَوَّرُ في العقل وجوده، والجائز ما يُتَصَوَّرُ في العقل وجوده وعدمه. [86]"

Tout jugement rationnel ou perception de la raison n'est pas dépourvue de ces trois statuts, il doit être caractérisé par l'un d'eux :

- **l'obligation (الوجوب):** Ce que l'on ne peut pas concevoir dans la raison sa non existence.

Exemple : Parmi les liens existants entre le temps, l'espace et l'objet matériel. À chaque moment de son existence, un objet occupe un emplacement dans l'espace. Le statut de l'obligation postule que la raison n'accepte pas l'inexistence d'une localisation dans l'espace avec l'existence de l'objet.

- **L'impossibilité (الإستحالة) :** Ce que l'on ne peut pas concevoir dans la raison son existence.

Exemple : c'est dans l'impossibilité que la raison perçoit l'existence de deux objets différents, en même temps sur le même emplacement spatial.

- **La possibilité (الجواز) :** Ce que l'on peut concevoir dans la raison son existence et sa non existence.

Exemple : Le statut de la possibilité postule que la raison perçoit l'existence de mouvement de l'objet, et la validité de son absence.

Les résultats de ces jugements rationnels découlent d'une procédure de raisonnement appelée : "*déduction*". Elle permet de conclure une assertion à partir d'hypothèses, de prémisses ou d'un cadre théorique : les conclusions résultent formellement de ces prémisses ou de cette théorie. Le processus de l'induction nous permet de passer donc du générale (loi, théorie, connaissance universelle ou générale…)

84أبو عبد الله محمد بن يوسف السنوسي، شرح المقدمات في علم التوحيد، تحقيق: سليم فهد شبعانية، دار البيروتي، دمشق، ط1، 2009، ص 53.

85عبد الواحد بن عاشر الأندلسي الفاسي، المُرْشِدِ المُعِينِ على الضروري من علوم الدين.

86 أبو عبد الله محمد بن يوسف السنوسي، العقيدة الوسطى وشرحها، تح: السيد يوسف أحمد، دار الكتب العلمية، بيروت، ط1، 2006، ص78 .

au particulier (faits observés, cas singuliers, données expérimentales, situations, connaissances particulières …) i.e. l'induction accorde la primauté au cadre théorique, puis par l'utilisation du syllogisme[87], des connaissances plus spécifiques s'ensuivent nécessairement. (Figure 13)

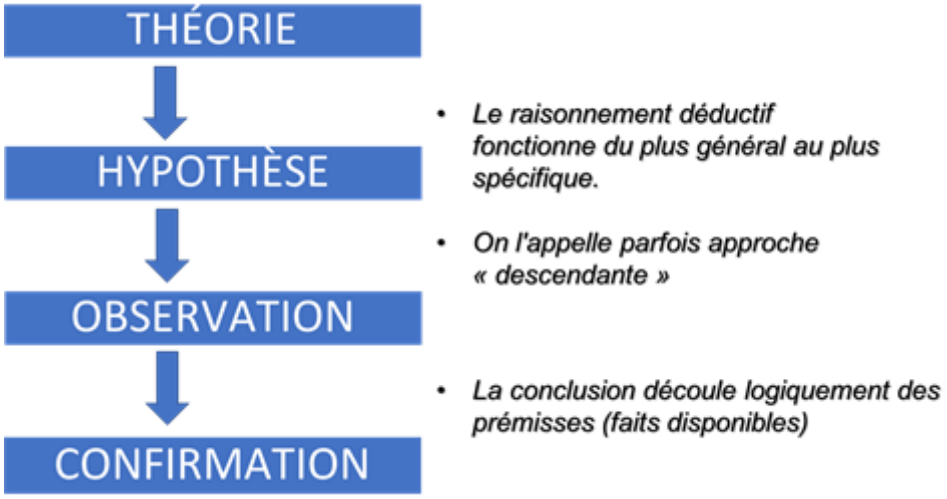


Figure 13: Approche déductive

III.3. Sciences empiriques – jugement empirique et l'induction

La science empirique est une science qui s'appuie sur les perceptions sensitives pour bâtir ses théories, i.e. toutes ses connaissances sont dérivées des éléments de l'expérience sensorielle. Parmi les sciences empiriques, on compte : physique, chimie, biologie. Les sciences empiriques à l'opposé des sciences rationnelles rejettent toute connaissance à priori et repose uniquement sur l'observation, l'expérimentation et l'induction.

Le caractère principal de la science empirique est donc l'observation et l'utilisation de la méthode expérimentale ainsi que la production des idées qui permettront de faire de nouvelles expériences. Le sens d'une théorie dans les sciences empiriques est la méthode de sa vérification ; i.e. une théorie n'a de sens que dans la mesure où ce qu'elle prétend peut faire l'objet d'observation et d'expérimentation.

III.3.1. Le jugement empirique et l'induction.

Un jugement empirique est un jugement qui vient de l'expérience, qui se fonde sur l'expérience, ou qui a trait à l'expérience. Pour valider ou réfuter une idée, le jugement empirique trouve sa valeur dans l'expérience sensible. Le jugement empirique impose donc toujours une pratique qu'il s'agisse d'une expérience, d'une observation ou d'autre méthode appropriée, qui confronte vraiment et efficacement l'idée au réel.

87 terme inventé par Aristote qui signifie colliger, comparer, mettre ensemble des connaissances déjà possédées afin d'en tirer de nouvelles.

يَحُدُّهُ الشيخ أبو عبد الله السنوسي على النحو التالي: "فحقيقته إثبات الرّبط بين أمر وأمر وجودا أو عدما بواسطة تكرر الأمرين بينهما على الحس."[88]

Un jugement empirique est l'affirmation ou le déni d'une chose par une autre en s'appuyant sur la répétabilité et l'expérience sensible.

Les résultats de ces jugements empiriques découlent d'une procédure de raisonnement appelée : "*induction*". C'est un type de raisonnement consistant à remonter, par une suite d'opérations cognitives, de données particulières (faits, expériences, énoncés) à des propositions plus générales, de cas particuliers à la loi qui les régit, des effets à la cause, des conséquences au principe, de l'expérience à la théorie.

De nombreux dictionnaires définissent le raisonnement inductif comme la dérivation de principes généraux à partir d'observations spécifiques (argumentant du spécifique au général), bien qu'il existe de nombreux arguments inductifs qui n'ont pas cette forme.

Le raisonnement inductif est distinct du raisonnement déductif. Bien que la conclusion d'un argument déductif soit certaine, la vérité de la conclusion d'un argument inductif est probable, sur la base des preuves fournies (Figure 14)

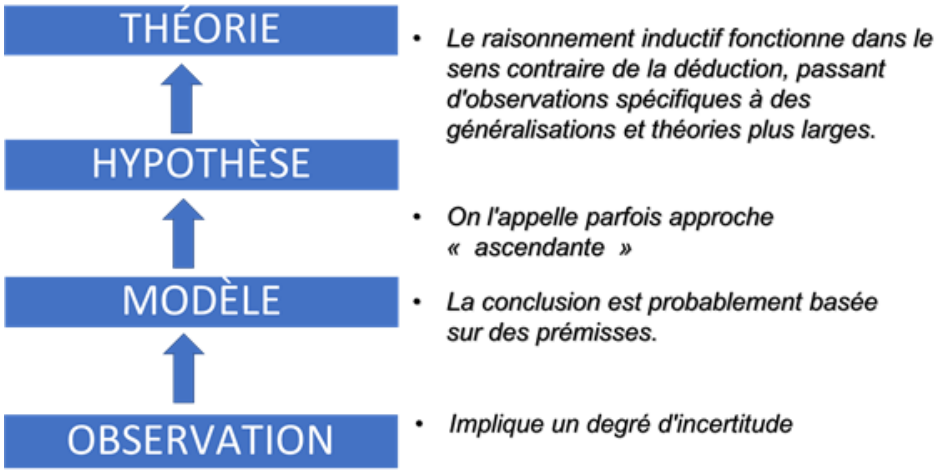


Figure 14: Approche inductive

L'induction est généralement décrite comme le passage du spécifique au général, tandis que la déduction commence par le général et se termine par le spécifique.

88 أبو عبد الله محمد بن يوسف السنوسي، شرح أم البراهين في علم الكلام، تحقيق: مصطفى محمد الغماري، المؤسسة الوطنية للكتاب، الجزائر، د(ط)، 1989، ص22.

Les arguments basés sur les lois, les règles et les principes acceptés sont généralement utilisés pour le raisonnement déductif. Les observations ont tendance à être utilisées pour les arguments inductifs.

III.4. Le fondement empirique et la nature de l'observation.

L'observation et l'expérience sensible représente la source de la connaissance des sciences empirique, elles ont donc un fondement *a posteriori*, elles jouent un rôle central dans l'acquisition, la justification et la validation des connaissances scientifiques. Quelle que soit l'objet de la connaissance que nous transmet l'expérience, et quelle que soit sa signification, l'expérience a quelque chose à voir avec le savoir. Quelle est alors la place de l'expérience et de l'observation dans l'élaboration des connaissances des sciences empiriques ?

III.4.1. L'expérience comme assise empirique.

Les sciences empiriques ont fait de l'expérience leur raison d'être, elle est son laboratoire et son critère de vérité scientifique. En d'autres termes, l'expérience est son empirisme de fond, son empirisme de dernière instance, non seulement comme banc d'essai, mais aussi comme matériel de construction.

Les sciences empiriques exercent plusieurs catégories d'expérience :

- *Expérience pour voir* (ce qui se passe dans telles conditions, pour faire naître ou préciser une hypothèse.
- *Expérience de contrôle* ou expérience-test, de mise à l'épreuve d'une hypothèse.
- *Expérience de détermination* quantitative (mesure) ou qualitative (mise en évidence).
- *Expérience pour produire un effet visé* (engendrer tel phénomène, parvenir à tel résultat pratique).
- *Expérience analogique* (substitut à une expérience directe hors d'atteinte). Les simulations entrent dans cette catégorie.
- L'expérience de pensée (substitut à une expérience dont les conditions de l'expérimentation ne sont pas réalisables). C'est une manière de résoudre un problème en utilisant l'imagination humaine

L'expérience scientifique, ou l'expérimentation, apparait comme un dispositif mis en place pour :

- Fournir ou instruire de nouvelles connaissances.
- Faire une adéquation entre les idées et les choses.
- Établir une vérité de fait.

- Tirer l'idée qu'un phénomène A est cause d'un phénomène B.
- Expliquer les concepts scientifiques.

Or toute expérience :

- N'est pas nécessairement porteuse de vérité.
- Ne peut pas donner de vérités absolues.
- Ne connaît pas le "pourquoi" mais uniquement le "comment" d'un phénomène.
- Ne permet pas de formuler des rapports nécessaire et universels comme une loi scientifique.
- Ne peut en établir la certitude d'une connaissance.
- Ne démontre rien mais elle montre quelque chose uniquement.
- Ne peut être cruciale pour établir cette certitude.
- Ne peut pas rendre compte d'une vérité objective, ces jugements sont purement subjectifs.
- Ne suffit pas à fonder la connaissance.
- Ne peut pas être indépendante de méthode et de raison.

III.4.2. La nature de l'observation.

Dans les sciences empiriques, toute connaissance de la nature repose sur l'observation, c'est une question pratique, méthodologique et théorique incontournable. Elle est indispensable pour rendre compte de l'acquisition, de la justification et de l'organisation de la connaissance scientifique. L'observation est l'une des activités fondamentales par laquelle la connaissance scientifique est ancrée dans les faits.

Pour le philosophe et physicien Bunge "*l'observation est la procédure empirique de base*"[89], il distingue deux types d'observations par lesquelles les données sont fournies :

- L'observation directe : qui consiste à observer un objet directement perceptible. Exemple observation des images formées par les différents systèmes optiques.
- L'observation indirecte : qui prend pour objet les phénomènes non directement observables, mais sur lesquels on peut réaliser un certain nombre d'inférences. Inférences hypothétiques, utilisant à la fois des données d'observation et des hypothèses. Exemple : détermination du pouvoir rotatoire spécifique d'une substance ou la concentration d'une

89 Bunge, Mario A. (1984). L'observation. In M.P. Michiels-Philippe (Ed.), *L'observation* p. 47. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.

solution en observant l'angle de rotation du plan de polarisation d'un faisceau lumineux traversant une substance optiquement active.

Dans les deux cas, l'observation est dite :

- **Sélective** : parce qu'elle prend appui sur un corps de connaissances qui détermine l'observation.
- **Interprétative** : parce qu'elle tend à atteindre un but.

Ces deux caractéristiques s'entremêlent dans l'action d'observation, de sorte que "nous sélectionnerons seulement les percepts qui nous paraissent pertinents par rapport à notre objectif et nous les replacerons dans nos connaissances".[90]

Le cycle de l'observation scientifique s'établit alors en deux procédures [91]:

1) La construction de connaissances sur l'objet.
2) Son observation toujours plus spécifique, à partir des connaissances acquises.

Les approches observationnelles varient selon la nature de la science : en physique une observation peut parfois être chargée de théorie. Certains philosophes des sciences comme Norwood Russell Hanson (1924-1967) et Thomas Samuel Kuhn (1922-1996) affirment que la portée théorique est une caractéristique essentielle de l'observation, ils défendent l'idée que l'observation ne peut pas être indépendante à la théorie à un point tel qu'un compte rendu d'observation scientifique est "lesté de théorie". Selon Hanson, cette charge de la théorie est une caractéristique problématique qui, idéalement, devrait être éliminée car elle est considérée nuisible à l'objectivité de nos observations. De manière générale, la philosophie de la deuxième moitié du 20ème siècle a abouti à de nombreux travaux visant à élaborer la notion de « charge théorique » de l'observation. La charge théorique de l'observation désigne la part nécessaire de connaissance requise chez le sujet pour parvenir à une observation concluante.

Outre cela, les physiciens utilisent des instruments pour observer des entités non accessibles aux sens, comme les lunettes astronomiques pour observer les planètes et les objets célestes, les détecteurs de neutrinos pour observer l'intérieur du soleil. Leurs observations nécessitent parfois des ordinateurs, des simulations numériques ou informatiques, des codes de calculs et des méthodes computationnelles… Aujourd'hui presque toutes nos observations passent par des instruments, une présence massive d'instruments venant dominer l'observation dans la pratique scientifique. La réponse à la question quel statut de ces instruments dans l'observation ? nous permet d'avoir une conception pertinente et complète de l'observation. Ainsi, certains philosophes pensent que l'observation doit reposer sur les moyens les plus épurés possible, et qu'aucun instrument ne devrait venir assister la perception. Alors que d'autres pensent que faire

90 ibid.

91 A. Bonnemain, E. Perrot et K. Kostulski, (2015) : Le processus d'observation, son développement et ses effets dans la méthode des autoconfrontations croisées en clinique de l'activité URL : http://journals.openedition.org/activites/1111

une observation sans partir des instruments n'aurait aucun sens, cette observation ne s'appuierait sur rien et n'aurait valeur que d'exercice intellectuel stérile.

Dans ce cadre, de nombreuses nouvelles interrogations ont été posées et traitées par les philosophes des sciences, notamment :

- En voulant intégrer les instruments dans les pratiques observationnelles, ne se condamne-t-on pas à charger nos observations de la théorie de l'instrument et à les mettre ainsi sur le même plan épistémologique que les théories ?
- Quel statut épistémologique convient-il de conférer à l'instrumentation ?
- Les scientifiques observent-ils lorsqu'ils font usage de certains instruments ? et en éliminant les instruments pour imposer la perception directe, a-t-on mis l'observation à l'abri des influences qui menacent son autonomie ?
- Qu'est-ce qui confère à nos observations une telle autorité et quelles sont les conditions qui leur garantissent une sûreté maximale ?
- Quelles sont les contraintes théoriques et expérimentales à l'œuvre dans le travail des chercheurs au sein du laboratoire ?
- Quels sont plus généralement les constituants de l'investigation empirique dans les sciences ?

Chapitre IV :
LA NOTION DE MODÈLE ET MODÉLISATON EN PHYSIQUE.

1. Définition de concept modèle.
2. Les différents types de modèle en physique.
3. Modèles et explications scientifiques.
4. Théorie et modèle.

Chapitre IV : LA NOTION DE MODÈLE ET MODÉLISATON EN PHYSIQUE

Préambule

Le présent chapitre traite des questions liées à la signification et à l'utilisation du *modèle*, à la clarification du vocable *modèle*, à la richesse de sa sémantique et à l'aspect épistémologique fondamental de l'édification des sciences par des *modèles*.

En premier lieu une tentative de réponse à la question : qu'est-ce qu'un modèle en physique ? y est suggérée. Un exposé est fait des différents sens du mot "modèle" en physique avec illustration par des exemples. En second lieu une analyse des différents types de modèle en physique est présentée précisant leurs rôles et leurs intérêts.

Enfin certaines particularités épistémologiques des *modèles* y sont données, en mettant l'accent sur ce que différencie le terme modèle du concept théorie

IV.1. Définition de concept modèle

La notion de modèle bien que fort répandue dans tous les champs disciplinaires, exactes ou humaines, possède en sciences physiques une spécificité toute particulière, sa signification présentant une résonance et une portée propre à cette discipline.

Les textes scientifiques de la physique dite moderne depuis la naissance de la mécanique classique ont connu divers termes qui désignaient à peu près ce que nous entendons aujourd'hui par modèle. Au 17ème siècle ces textes mentionnaient la notion de « **loi** ». On parlait aussi de la notion de « **principe** ». Au 18ème siècle on note l'émergence de la notion de « système » dans le domaine de la connaissance par l'intermédiaire de l'astronomie. Ce mot qui vient du grec « sustèma » de sun-istémi, qui veut dire : « je compose », prend le sens de « théorie » qui s'applique à certaines procédures de pensée.

L'origine de la notion de modèle est technologique et renvoie à l'idée de « maquette » ou « prototype ». Ce mot désigne l'objet réduit et maniable qui peut être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne sont pas appliqués commodément à ce qu'il représente[92]. C'est dans cette perspective que le terme « modèle » a commencé à être fréquemment utilisé dans ces activités scientifiques, il désigne les différents moyens de représentation utilisés pour comprendre et concevoir divers phénomènes.

Historiquement l'emploi du mot modèle a progressivement évolué, sa signification oscille, selon le cas, entre celle - platonicienne - d'idéalité, de norme abstraite, d'idée

92 NOËL, Mouloud (2004) : Modèle, Encyclopædia Universalis, V. 08, Paris : Collection blanche.

réalisable, et celle - d'origine pratique -d'une représentation concrète simplifiée d'un réel complexe. Les sciences contemporaines semblent bien s'accommoder avec cette polysémie. Elles font des modèles un outil méthodologique constitutif de leur démarche d'investigation et de leur mode d'exposition. C'est dire le rapport étroit désormais bien établi entre les modèles ou plus exactement la modélisation et la connaissance que nous avons du réel.

IV.1.1. Les différents sens du mot « modèle ».

La physique, en tant qu'archétype des sciences empiriques, se caractérise par son recourt systématique à l'élaboration des modèles. Ils sont utilisés dans des sens différents :

IV.1.1.1. La reproduction physique

Le terme modèle a été employé depuis longtemps pour désigner une représentation réduite ou simplifiée, communément appelé « **maquette** » ou « **prototype** » d'où l'expression « **modèle réduit** ». Une reproduction physique est une représentation matérielle simplifiée qui montre à quoi ressemble l'objet imité ou comment il fonctionne. La simplification apparait dans la forme miniaturisée de la chose reproduite qui devient maniable, et génère une quantité variable de données quantitatives et qualitatives inaccessibles à travers l'objet dupliqué.

Exemple : **Le modèle du phénomène des mouvements browniens.**

Quand on observe des particules microscopiques et ultramicroscopiques (particules colloïdales) en suspension dans un liquide, on voit qu'elles sont animées de mouvements désordonnés et incessants. Chose que nous observons, à l'intérieur d'un local, avec la poussière dans le faisceau d'une lampe de forte intensité. Ce phénomène a été rapporté en 1828 par le botaniste Robert Brown (1773-1858) en observant au microscope les petites particules éjectées par les grains de pollen lorsqu'ils étaient dispersés dans de l'eau.



Figure 15: Le mouvement brownien décrit par le centre de gravité d'une particule de pollen en suspension.

Bien que la découverte du mouvement brownien occupe une place assez marginale dans l'œuvre de Brown, elle suscita à partir des années 1860 l'attention d'éminents physiciens, notamment celle d'Albert Einstein (1879-1955). Ce phénomène a joué un rôle déterminant dans le développement de la physique statistique, dès la fin du 19ème siècle, ainsi que dans la preuve décisive de l'existence des atomes, au début du 20ème siècle.

Les molécules composant un gaz, ou un liquide sont trop petites pour être visibles, La reproduction physique du mouvement brownien est un bon modèle qui décrit le comportement des molécules, ce modèle imite l'échelle atomique ou microscopique d'un fluide qui devient maniable, il permet de rendre compte de certaines propriétés essentielles et de retrouver les caractéristiques de son comportement macroscopique en fonction de l'agitation ou du mouvement des molécules.

De nombreuses élaborations de ce modèle ont montré que ce mouvement n'est soumis à aucune influence extérieure, que son intensité augmente avec la température et dépend des dimensions des particules et de la viscosité du liquide. Plus les particules sont fines, et plus la viscosité du liquide est faible, plus le mouvement des particules est plus intense.

Le même phénomène est observé dans le cas de particules en suspension dans un gaz. Daniel Bernoulli (1700-1782), dans sa conception cinétique des gaz, proposa en 1730 une hypothèse de déplacement aléatoire des molécules d'un gaz, et supposa que la pression d'un gaz résultait des chocs entre les molécules et les parois du récipient qui les contient. Le modèle du phénomène des mouvements browniens est un bon témoignage de la conception de Bernoulli, il justifie même la croyance des physiciens en l'existence de molécules constitutives d'un gaz. Ces dernières sont inobservables vu leur dimension très réduite, il est impossible d'en obtenir une image sous les grossissements les plus puissants. Au moyen de ce modèle on a pu déduire le comportement de ces molécules, interpréter nos conceptions, valider nos hypothèses, introduire des concepts, avoir une preuve macroscopique de leur existence, et aboutir à harmoniser les descriptions microscopique, macroscopique et intermédiaire d'un gaz.

Albert Einstein proposa en 1905 une théorie quantitative du mouvement brownien et remarqua que la description mathématique de ce modèle était une preuve de l'existence des atomes. Cette théorie lui a permis de déduire la taille des atomes même si ceux-ci ne peuvent observer directement car la taille est infiniment petite. C'est alors qu'à partir du modèle de déplacements des particules browniennes, la taille des atomes est expérimentée et déduite.

Examinons comment Albert Einstein a utilisé cette production physique du phénomène brownien pour rendre possible la détermination du nombre d'Avogadro et par conséquent le volume de l'atome.

Il combina deux théories qui avaient des domaines d'application complètement différents. La première est celle de Jacobus Van't Hoff, chimiste néerlandais (1852-1911) qui avait montré en 1885 que la pression osmotique dans les solutions suffisamment diluées était proportionnelle à la concentration et à la température et qu'elle suivait une loi identique à celle des gaz parfaits.

$$p = \frac{n}{N} RT$$

Où *R* est la constante des gaz parfaits, T la température absolue, et *n* le nombre de particules diluées par unité de volume, ou densité particulaire et *N* est le nombre d'Avogadro. La deuxième est l'application des méthodes statistiques sur le modèle du mouvement brownien. Einstein a montré dans son article que le déplacement d'une particule au sein d'un liquide, sous l'influence du mouvement brownien libre, était donné par la relation :

$$\overline{x^2} = \frac{2RT}{N\omega} t$$

Ou $\overline{x^2}$ est le carré moyen de l'écart x, par rapport à la position d'équilibre. ω est le coefficient de frottement ou la résistance visqueuse du liquide.

Dans le cas d'une molécule de masse m(kg) en équilibre thermique dans un groupe de molécules similaires, le déplacement moyen est donné en fonction du coefficient de diffusion *D* :

$$\overline{x^2} = 2Dt$$

De sorte que le coefficient de diffusion *D* est égal à :

$$D = \frac{RT}{N\omega}$$

Einstein utilisa enfin la théorie de l'électrodynamique, il supposa que les particules en suspension sont toutes des sphères de rayon a, il détermina la résistance que le fluide oppose au mouvement à partir de la relation de Stokes donnant le coefficient de friction ω d'une sphère plongée dans un fluide de viscosité η

$$\omega = 6\pi a\eta$$

où *a* est le rayon de la particule.

On arrive alors à la relation :

$$D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi a\eta}$$

Cette analyse théorique permit à Jean Perrin (1870-1942), dans des expériences célèbres menées en 1908, de déterminer précisément la valeur de la constante d'Avogadro N. Ces expériences ont constitué une preuve décisive de l'existence des atomes ou des molécules, et de leur rôle dans le mouvement aléatoire des grains.

Il ressort de ce qui précède que la production physique du mouvement brownien, et les discutions statistiques d'Einstein sur ce comportement ont donné des méthodes expérimentales pour calculer les dimensions atomiques par un microscope conventionnel. C'est dans le cadre du modèle du mouvement brownien que la discontinuité de la matière a reçu l'acceptation générale. Au moyen de ce modèle l'hypothèse de l'existence des molécules et des atomes a été reliée à des phénomènes directement observables.

Par la suite, le mouvement brownien a constitué un modèle fondamental d'une grande importance conceptuelle. Il nous a permis même de concevoir plusieurs phénomènes découverts ultérieurement : fluctuation du courant électrique dans les conducteurs, vibration du miroir d'un galvanomètre suspendu à un fil élastique au sein d'un gaz, les bruits thermiques, le bruit d'une antenne micro-onde …

Ce type de modèles a joué un rôle fondamental dans la production du savoir, c'est une nouvelle façon de développer la connaissance scientifique. Au 17ème siècle Christiaan Huygens (1629-1695) utilise les ondes mécaniques comme modèle pour développer une première théorie ondulatoire de la lumière. Au 19ème siècle, Michael Faraday (1791-1867) s'appuie sur des considérations mécaniques pour développer les notions de champ magnétique et de champ électrique. Dans les années 1920, Louis de Broglie (1892-1987) et Erwin Schrödinger (1887-1961) exploitent les ondes mécaniques stationnaires, pour formuler l'équation d'onde de l'électron.

IV.1.1.2. La simplification et l'idéalisation de la représentation

Une autre modalité d'acquisition de la connaissance en physique est de proposer des explications scientifiques à des phénomènes naturels par l'élaboration de modèles sous forme de représentations idéales et schémas mentaux simplifiés par rapport à la réalité. Ces derniers sont suggérés par des observations expérimentales et suscitent eux-mêmes des expériences.

Dans le dictionnaire Culturel de la Langue Française[93] :

> "*Un modèle est une représentation simplifiée d'un système ou d'un phénomène physique, permettant de reproduire son fonctionnement, de l'analyser, de l'expliquer, et d'en prédire certains aspects.*"

En physique, nous avons généralement affaire à un système qui est, en réalité, très complexe. La simplification et l'idéalisation de la représentation apparaissent d'une part dans l'exclusion de certaines composantes complexes du système qui dépassent les limites ou notre compréhension intuitive, et d'autre part dans l'inclusion de certains détails pertinents dans le but de rendre notre système plus traitable. Les modèles que nous élaborons facilitent et favorisent de ce fait le développement de notre compréhension.

Selon Soler un modèle peut être défini comme :

> "*Un cadre représentatif, idéalisé et ouvert, reconnu approximatif et schématique mais jugé fécond par rapport à un but donné : prévoir, agir sur la nature, la connaître mieux, etc*."[94]

93 Alain, Rey (2005) : Dictionnaire Culturel de la Langue Française, 9648p. Paris : Le Robert.
94 Soler, Léna (2000) : Introduction à l'épistémologie, Paris : Ellipses.

La physique permet d'établir des lois et des principes, et développe des théories. Les modèles comme constructions simplifiées ou représentations idéales constituent un cadre de réflexion qui permette de synthétiser ces lois et de construire ces théories.

Comme exemple préliminaire, citons le principe d'inertie qui constitue la loi fondamentale qui a permis à la nouvelle physique du 17ème siècle de construire son édifice. Galilée (1564-1642) découvrit ce grand principe en se basant sur une idéalisation et une simplification. Une boule roule indéfiniment sur le plancher sans aucune influence tels que les frottements ou autres à une vitesse constante. C'est une expérience idéalisée qui, en fait, ne peut jamais être réalisée, étant donné qu'il est impossible d'éliminer tous les frottements et avoir un parcourt indéfini (Figure 16).

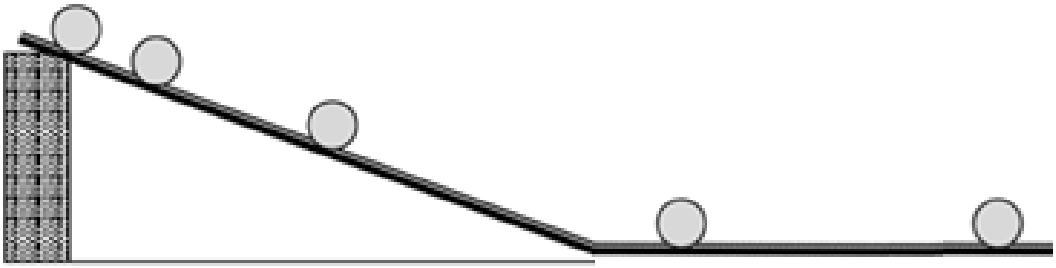


Figure 16: Illustration du principe d'inertie à l'aide d'une bille roulant librement sans frottement

Exemple 1 : **Système isolé**

Tout système de corps ne pouvant échanger ni matière ni énergie avec les corps environnants est nommé système isolé. L'utilité de ce modèle s'est imposée progressivement dans divers domaines de la physique. Soit en mécanique classique avec la notion de la conservation de la quantité de mouvement ou de l'énergie, soit en thermodynamique avec la définition des notions d'équilibre thermique et de température, la postulation de son premier principe, ou la justification du postulat de l'augmentation de l'entropie de sa seconde loi, soit en physique statistique avec l'ensemble micro canonique et la définition des notions d'équilibre statistique, et son postulat fondamental sur l'équiprobabilité des micros-états.

On attribue délibérément en physique le modèle du système isolé en vue de simplifier son étude théorique, il est utilisé pour décrire, expliquer et prévoir divers phénomènes.

Une semblable représentation est un système idéalisé qu'on ne peut parfaitement réaliser dans la pratique. Même lorsqu'à proximité des corps se trouvant en contact il n'y a aucun autre corps, ils ne constituent pas un système isolé parce qu'ils émettent et absorbent continuellement de l'énergie radiante, échangée avec des corps se trouvant à grande distance. Par ailleurs les enceintes adiabatiques est une abstraction physique irréalisable dans la pratique, et ce que nous réalisons en science généralement

n’est qu’un artifice qui rend négligeable l’échange d’énergie entre le système étudié et tous les autres corps.

Exemple 2 : **Corps indéformables**

Un solide rigide ou indéformable est un ensemble de points matériels dont les distances mutuelles restent constantes au cours du temps. L’invariance de la distance s’écrit simplement :

$$\overrightarrow{AB}.\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt} = 0$$

Aucun procédé n’est donné pour justifier qu'un système est déformable ou indéformable, aucun solide n'est parfaitement rigide, à l’échelle microscopique, un observateur disposant des moyens d’observation adéquats verrait des déformations de sa surface. Mais ce modèle idéal est indispensable pour définir beaucoup de concepts physiques. La notion de déplacement par exemple est indissociable de celle de déformation, et l’assimilation des boules comme solides rigides est fondamentale pour appliquer les trois lois de Newton (1642-1727) et par conséquent décrire et prévoir leurs mouvements pendant les chocs.

Pour expliquer le comportement macroscopique d'un gaz à partir des caractéristiques des mouvements des corpuscules qui le composent, le physicien anglais James Clerk Maxwell (1831-1879) propose un modèle théorique dont l’hypothèse fondamentale est l’assimilation des molécules qui composent ce gaz à des sphères rigides, leur mouvement peut être décrit au moyen des lois de Newton.

Considérons N molécules enfermées dans un cube de côté L (Figure 17).

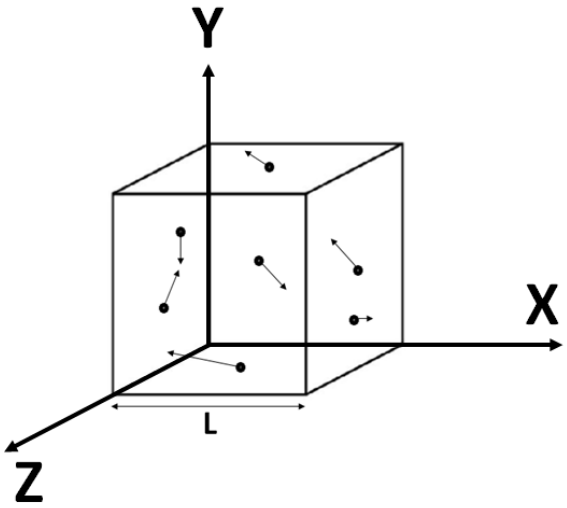


Figure 17: Molécules de gaz enfermées dans l’enceinte cubique.

L’idéalisation consiste à assimiler le gaz comme parfait, et les molécules qui le composent comme des sphères rigides quasi-ponctuelles. Ces sphères dures s’entrechoquent et rebondissent sur les parois, leurs interactions sont purement locales et sans dissipation, c’est à dire qu’elles interagissent uniquement lors de chocs

élastiques. La simplification consiste en ce que les vitesses de ces particules sont aléatoires à la fois en direction et en norme, et que la distribution des vitesses, est stationnaire, homogène et isotrope.

Il s'agit bien entendu d'un modèle, il permet de rendre compte de certaines propriétés essentielles de leur évolution, et permet notamment, en faisant une moyenne sur un grand nombre de molécules, de retrouver les caractéristiques macroscopiques d'un gaz.

À chaque collision sur la face perpendiculaire à *x* la quantité de mouvement varie de mv_x à $-mv_x$ par conséquent sa variation est :

$$\Delta p_x = -mv_x - mv_x = -2mv_x$$

L'intervalle de temps entre deux collisions de la molécule sur cette face vaut :

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x}$$

Pour une molécule, le transfert de quantité de mouvement par unité de temps sur la face sera :

$$\frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{m{v_x}^2}{L}$$

$\frac{\Delta p_x}{\Delta t}$ est la force extérieure $F_x$exercée sur la face.

La pression résultante de cette force est :

$$\mathrm{P} = \frac{F_x}{L^2} = \frac{m{v_x}^2}{L^3}$$

En sommant sur toutes les molécules *N* on trouve la pression du gaz :

$$P = \frac{1}{L^2}\sum_{1}^{N}\frac{m{v_{x,i}}^2}{L} = \frac{Nm}{L^3}({v_x}^2)_{moy} = \frac{Nm}{L^3}\langle {v_x}^2\rangle$$

Pour toute molécule : $v^2 = {v_x}^2 + {v_y}^2 + {v_z}^2$

Les moyennes des carrés des composantes selon x, y et z sont égales :

$$\langle {v_x}^2\rangle = \langle {v_y}^2\rangle = \langle {v_z}^2\rangle = \frac{1}{3}\langle v^2\rangle$$

Donc :

$$P = \frac{Nm}{3V}\langle v^2\rangle$$

L'utilisation de ce modèle, idéal et simplifié, nous a permis d'expliquer le comportement macroscopique d'un gaz à partir des caractéristiques des mouvements des particules qui le composent. Elle permet notamment de donner une interprétation microscopique aux notions de : pression, température, énergie cinétique.

IV.1.1.3. La représentation formelle

Le terme modèle désigne aussi une représentation formelle, à savoir un construit **symbolique**, **logique** ou, le plus souvent, **mathématique** : un algorithme, une équation, un système d'équations, qui sont ensuite manipulées de diverses manières.

Représenter formellement un phénomène naturel c'est le décrire par un langage formel et abstrait, c'est souvent l'exprimer à l'aide de lois générales universellement applicables, qui prennent l'expression de relations mathématiques entre diverses grandeurs physiques bien construites, ces relations sont de nature logique, stable et formelle.

Exemple 1 : **Le modèle classique de l'électromagnétisme.**

En 1865, Maxwell a unifié l'électricité et le magnétisme en une seule théorie, appelée *électromagnétisme*. Les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ ne peuvent pas être considérés comme indépendants, car la variation de l'un dans le temps nécessite la présence de l'autre. Ainsi, ils constituent une seule entité physique, appelée champ électromagnétique.

Dans sa théorie, Maxwell créa le concept fondamental de « **champs** » en abandonnant son *modèle mécanique* conçue sur l'analogie avec les lois des solides élastiques et le mouvement des fluide visqueux dans l'éther, ainsi en utilisant comme analogie physique le *modèle géométrique* de Michael Faraday (1791-1867) conçue sur l'imagerie des lignes de force. Les champs électriques et magnétiques ont été introduits comme des *modèles mathématiques* conçues pour faciliter le calcul des forces exercées entre les charges électriques et entre les fils porteurs de courants.

C'est à travers la représentation formelle, que Maxwell a obtenu une nouvelle idée permettant de mathématiser un nouveau domaine de la physique, Albert Einstein qualifie ce nouveau mode de conception comme une nouvelle théorie qui donne à l'espace une fonction en exprimant :

> "*Cette théorie était fascinante. Désormais, à l'idée classique de force qui fait jouer un rôle muet à l'espace, le concept de champ consiste en une interaction baignant dans l'espace. Cet espace a la propriété d'interagir avec les corps.*"[95]

Le modèle classique de l'électromagnétisme repose sur les célèbres équations de Maxwell, ces dernières constituent une description complète du comportement classique des champs électriques et magnétiques. Au moment de leur publication, les

95 Einstein, cité par Thierry, L. (2005) : Un siècle de Physique : 1 - La Physique Quantique, Paris : Aegeus.

équations de Maxwell ne sont pas démontrables, de manière logique, ou axiomatique, elles étaient seulement cohérentes avec les résultats connus, en particulier d'électrostatique, et de magnétostatique.

Les équations de Maxwell modélisent mathématiquement les interactions entre charges électriques, courants électriques, champs électriques et champs magnétiques.

Le champ électrique $\vec{E}$ et le champ d'induction magnétique $\vec{B}$ sont définis par leur action sur une particule de charge q et de vitesse $\vec{v}$, appelée force de Lorentz :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

La représentation formelle a joué un grand rôle dans la formulation des équations de Maxwell, la formalisation mathématique des travaux antérieures sur l'électricité et le magnétisme réalisés par Gauss (1777-1865), Faraday (1791-1867), et Ampère (1775-1836) a permis en 1873 à Maxwell de publier ces huit équations, et le formalisme des vecteurs et les opérateurs du calcul différentiel donné par Oliver Heaviside (1850-1925) et Willard Gibbs (1839 - 1903) ont permis d'en réduire le nombre à quatre équations. Actuellement et en utilisant l'algèbre vectorielle, les quatre équations (vectorielles) de Maxwell se réduisent à seulement deux équations tensorielles, ou même à une seule équation multi-vectorielle.

En présence de la matière, les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ sont déterminés, dans le cas général, à partir des densités de charge ρ et de courant $\vec{j}$ par les quatre équations fondamentales de Maxwell sous forme locale (tableau 2) :

Forme locale	Forme intégrale
$\mathbf{rot}\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 \iint_S \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot \mathrm{d}\vec{S}$ (La loi d'Ampère)
$\mathbf{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$ (La loi de Faraday)
$\mathrm{div}\mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oiint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \iiint_{(V)} \rho \cdot \mathrm{d}\tau = \frac{Q_{\text{int à } (V)}}{\varepsilon_0}$ (La loi de Gauss)
$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$	$\iint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0$ (l'énixistence de monopôles magnétiques)

Table 3: Les équations de Maxwell sous forme locale et intégrale.

Le rôle des mathématiques comme outil performant apparait lorsqu'on observe le passage de la forme intégrale à la forme locale, l'application du théorème de Stokes de la dérivée partielle du flux par rapport au temps : $\phi = \oiint \vec{B}\vec{ds}$ qui donne :

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \oiint_S \vec{B}\vec{ds} = \oint_C \vec{E}\vec{dl} = \oiint_S \overrightarrow{rot}\vec{E}\,\vec{ds}$$

Par conséquent :

$$\overrightarrow{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

De même, le théorème de Gauss mène à la forme locale Maxwell Gauss en appliquant la formule mathématique d'Ostrogradsky.

$$\iint \vec{E}\,ds = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}$$
$$\iiint div\,\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0}\iiint \rho\,d\tau$$

Par conséquent :

$$div\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

D'un autre côté, le recourt à certains objets mathématiques peut permettre de prédire de nouveaux phénomènes dont les physiciens ne soupçonnaient pas l'existence. La représentation formelle de Maxwell nous a permis donc de coupler le champ électrique $\vec{E}$ et le champ d'induction magnétique $\vec{B}$ dans une seule entité physique, appelée champ électromagnétique. Si l'un des champs varie nécessairement, l'autre champ est induit. Similaire à la relation entre déplacement et pression, responsables de la propagation des ondes sonores, le couplage entre $\vec{E}$ et $\vec{B}$ est responsable de la prédiction théorique de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide et dans la matière à la vitesse calculée théoriquement dont sa valeur est celle de la lumière. Il n'était pas possible de prévoir cet effet remarquable avant la représentation formelle des équations de Maxwell et de la théorie électromagnétique.

Cette représentation formelle a résolu donc le vieux problème de la nature de la lumière : c'est une onde électromagnétique de très courte longueur d'onde. L'existence de ces ondes ayant les mêmes propriétés de polarisation et de propagation que les ondes lumineuses a été vérifiée expérimentalement plus tard par Hertz en 1884. La formulation de l'électromagnétisme était un événement très important dans l'histoire de la science.

Pour représenter ce qu'est une onde électromagnétique, il faut l'exprimer mathématiquement, autrement dit la représentation formelle est l'unique modèle des ondes électromagnétiques. Feynman atteste en essayant de donner une description approximative des ondes électromagnétiques :

> "*Je suis navré, mais je ne peux pas, je ne sais pas comment, je n'ai aucune image de ce champ électromagnétique, Je ne peux vraiment pas me construire une image qui se rapproche même à peu près des vraies ondes*."[96]

96 Feynman, R. (1965) : The Feynman Lectures on Physics. California Institute of Technology.

Exemple 2 : **Invariance des lois physiques.**

L'invariance des lois physiques est un concept fondamental de la physique, les lois de la nature doivent être covariante par changement de référentiel, elles prennent la même forme dans tous ces référentiels. Autrement dit un système physique ou une succession de phénomènes ont un caractère « intrinsèque », c'est-à-dire indépendant du repère utilisé pour les décrire.

Cette caractéristique importante attribue aux lois de la physique une portée ontologique générale, universelle, indépendante des phénomènes étudiés. L'un des procédés le plus fructueux et le plus convaincant de la représentation formelle consiste à donner une structure mathématique basée sur le principe d'invariance capable de décrire une réalité physique objective.

Dans un référentiel inertiel ($\mathcal{R}$), soient les relations fondamentales de la mécanique classique :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \qquad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \qquad \vec{F} = m\vec{a}$$

La transformation de Galilée permet de passer d'un référentiel galiléen ($\mathcal{R}$), (ou inertiel) à un autre référentiel galiléen ($\mathcal{R}'$), (également inertiel). Le passage de ($\mathcal{R}$), à ($\mathcal{R}'$), laisse invariant l'intervalle d'espace :

$$\Delta S^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = \Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2$$

Soit ($\mathcal{R}'$) un référentiel qui se déplace avec une vitesse $\vec{v}$ constante dirigée selon Ox :

Le même évènement vu dans les deux référentiels :

Position x, y, z et le temps t mesurés dans ($\mathcal{R}$)

Position x', y', z' et le temps t' mesurés dans ($\mathcal{R}'$)

On rappelle la transformée de Galilée :

$$\begin{aligned} t' &= t \\ x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}$$

$$\overrightarrow{r'} = \vec{r} - \vec{v}t \Rightarrow \frac{d\overrightarrow{r'}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} - \vec{v} \quad \Rightarrow \overrightarrow{u'} = \vec{u} - \vec{v} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\overrightarrow{u'}}{dt} = \frac{d\vec{u}}{dt}$$

$$\overrightarrow{a'} = \vec{a} \qquad m' = m \qquad \overrightarrow{F'} = \vec{F}$$

$$\overrightarrow{u'} = \frac{d\overrightarrow{r'}}{dt'} \qquad \overrightarrow{a'} = \frac{d\overrightarrow{u'}}{dt'} \qquad \overrightarrow{F'} = m'\overrightarrow{a'}$$

Par conséquent dans ces deux référentiels galiléens, ($\mathcal{R}$) et ($\mathcal{R}$'), le principe fondamental de la dynamique est invariant lors du changement de référentiels. Autrement dit tous les systèmes d'inertie sont rigoureusement équivalents du point de vue des phénomènes de la mécanique classique.

De la même façon, vérifions si l'équation de Maxwell - Gauss est invariante sous une transformation Galiléenne :

Soit L'équation de Maxwell – Gauss vérifions si :

$$div_{(S)}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \Leftrightarrow \quad div_{(S')}\overrightarrow{E'} = \frac{\rho'}{\epsilon_0}$$

On a

$$\overrightarrow{B'} = \vec{B} \qquad \vec{E}_x = \overrightarrow{E'}_x$$
$$\overrightarrow{F'} = \vec{F} \qquad \vec{E}_y = \overrightarrow{E'}_y + v\vec{B'}_z$$
$$\overrightarrow{E'} = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \qquad \vec{E}_z = \overrightarrow{E'}_z - v\vec{B'}_y$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'} \quad et \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y'} \quad et \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z'}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\partial E'_x}{\partial x'}$$
$$\frac{\partial E_y}{\partial y} = \frac{\partial E'_y}{\partial y'} + v\frac{\partial B'_z}{\partial y'}$$
$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\partial E'_z}{\partial z'} - v\frac{\partial B'_y}{\partial z'}$$

On a donc :

$$div_{(S)}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \Rightarrow \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad \Leftrightarrow$$
$$\left(\frac{\partial E'_x}{\partial x'} + \frac{\partial E'_y}{\partial y'} + \frac{\partial E'_z}{\partial z'}\right) + v\left(\frac{\partial B'_z}{\partial y'} - \frac{\partial B'_y}{\partial z'}\right) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \Leftrightarrow$$

$$div_{(S')}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} - v\left(\frac{\partial B'_z}{\partial y'} - \frac{\partial B'_y}{\partial z'}\right) = \frac{\rho}{\epsilon_0} - v\left(\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z}\right)$$
$$div_{(S')}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} - v.\overrightarrow{rot_x}\overrightarrow{B'} = \frac{\rho}{\epsilon_0} - v\mu_0(j_x + \epsilon_0\frac{\partial E_x'}{\partial t}) \neq \frac{\rho'}{\epsilon_0}$$

Par conséquent dans ces deux référentiels galiléens, ($\mathcal{R}$) et ($\mathcal{R}$'), l'équation de Maxwell – Gauss n'est donc pas invariante lors du changement de référentiels. Le principe de relativité classique ne semblait pas s'étendre aux phénomènes électromagnétiques et optiques. C'est la raison pour laquelle, les interprétations de toutes les expériences de ces phénomènes restent dépendantes d'esprit mécaniste, en considérant les équations de Maxwell comme rigoureusement valables seulement par rapport à un certain système d'inertie privilégié que l'on supposait défini par l'éther, milieu hypothétique matériel nécessaire pour la propagation des ondes électromagnétiques.

Vérifions si l'équation de Maxwell - Gauss est invariante sous une transformation de Lorentz :

La transformée de Lorentz (1853-1928) complétée par Poincaré (1854-1912) laisse invariante l'intervalle d'Espace-Temps lors de passage d'un référentiel ($\mathcal{R}$), à un autre référentiel ($\mathcal{R}$').

$$\Delta S^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c\Delta t^2 = \Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2 - c\Delta t'^2$$

Soit ($\mathcal{R}$') un référentiel qui se déplace avec une vitesse $\vec{v}$ constante dirigée selon Ox, les transformations de Lorentz entre ces deux référentiels :

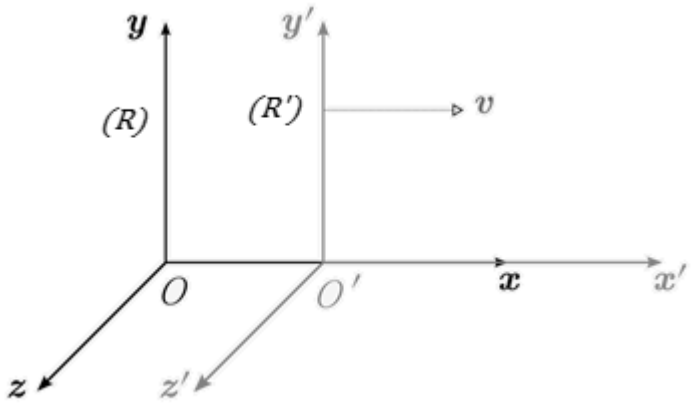


Figure 18: Référentiels inertiels en mouvement de translation rectiligne uniforme l'un rapport à l'autre

$$c\Delta t' = \gamma(c\Delta t - \beta\Delta x)$$
$$c\Delta x' = \gamma(c\Delta x - \beta c\Delta t) \qquad \text{avec} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad \text{et } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$
$$\Delta y' = \Delta y$$
$$\Delta z' = \Delta z$$

Une transformation de Lorentz est une méthode mathématique de mise en relation des grandeurs entre référentiels inertiels en utilisant la théorie de relativité restreinte.

$$t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x)$$
$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$

On vérifie les relations :

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial x'}{\partial x}\frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial t'}{\partial x}\frac{\partial}{\partial t'} \qquad et \qquad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial x'}{\partial t}\frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial t'}{\partial t}\frac{\partial}{\partial t'}$$

Ou encore

$$\frac{\partial}{\partial x} = \gamma\left(\frac{\partial}{\partial x'} - \beta\frac{\partial}{c\partial t'}\right) \quad et \quad \frac{\partial}{c\partial t} = \gamma\left(\frac{\partial}{c\partial t'} - \beta\frac{\partial}{\partial x'}\right)$$
$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y'} \quad et \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z'}$$

Pour passer des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ dans le référentiel ($\mathcal{R}$) à ces mêmes champs dans un référentiel ($\mathcal{R}$') on doit passer par les étapes suivantes :

<u>Etape 01 :</u> Le quadrivecteur densité de charge électrique et densité de courant électrique

Les composantes du quadrivecteur densité de charge électrique ρ et densité de courant $\vec{j}$ dans le référentiel ($\mathcal{R}$) sont données par la relation :

$$4J = (\rho c, \vec{j})$$

Ces composantes deviennent dans ($\mathcal{R}$') après transformation de Lorentz :

$$\begin{pmatrix} \rho c \\ j_x \\ j_y \\ j_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & \gamma\beta & 0 & 0 \\ \gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \rho' c \\ j'_x \\ j'_y \\ j'_z \end{pmatrix}$$

On obtient la relation entre ρ et ρ' : $\rho = \gamma\left(\rho' + \frac{\beta}{c}j'_x\right)$

<u>Etape 02 :</u> Le quadrivecteur des potentiels scalaire et vecteur

Les équations de propagation des potentiels scalaire et vecteur (équation de d'Alembert) en présence de densité de charge électrique et densité de courant électriques s'écrient indépendantes comme suit:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \Delta V = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$
$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \Delta \vec{A} = \mu_0 \vec{J}$$

En utilisant l'expression du quadrivecteur densité de courant électrique, on peut écrire les deux équations de propagation précédente comme suit :

$$\left(\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \Delta\right)\left(\frac{V}{c}, \vec{A}\right) = (\rho c, \vec{J})$$
$$4\nabla 4A = 4J$$

de sorte que $4\nabla = \left(\frac{\partial}{c\partial t}, \vec{\nabla}\right)$ et on déduit le quadrivecteur du potentiel :

$$4A = \left(\frac{V}{c}, \vec{A}\right)$$

La transformation de Lorentz pour le quadrivecteur du potentiel entre deux repères galiléens est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} \frac{V}{c} \\ A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & \gamma\beta & 0 & 0 \\ \gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{V'}{c} \\ A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{pmatrix}$$

à travers les relations entre le champs électromagnétique $\left(\vec{E}, \vec{B}\right)$ et le potentiel qui s'écrient :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$
$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

On peut déduire, les formules de transformation des composantes des deux champs électromagnétiques entre deux repères galiléens :

$$E_x = {E_x}'$$
$$E_y = \gamma\left({E'}_y + \beta {B'}_z c\right)$$
$$E_z = \gamma\left({E'}_z - \beta {B'}_y c\right)$$

$$B_x = {B_x}'$$
$$B_y c = \gamma\left({B'}_y c - \beta {E'}_z\right)$$
$$B_z c = \gamma\left({B'}_z c + \beta {E'}_y\right)$$

Vérifions maintenant si l'équation $\vec{\nabla}.\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ est covariante par transformation de Lorentz :

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\gamma\left(\frac{\partial}{\partial x'} - \beta\frac{\partial}{c\partial t'}\right)E'_x + \frac{\partial}{\partial y'}\gamma\left({E'}_y + \beta {B'}_z c\right) + \frac{\partial}{\partial z'}\gamma\left({E'}_z - \beta {B'}_y c\right) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\gamma\left(\frac{\partial {E'}_x}{\partial x} + \frac{\partial {E'}_y}{\partial y} + \frac{\partial {E'}_z}{\partial z}\right) - \beta\gamma\frac{\partial {E'}_x}{c\partial t'} + \beta\gamma c\left(\frac{\partial {B'}_z}{\partial y'} - \frac{\partial {B'}_y}{\partial z'}\right) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\gamma\vec{\nabla}.\vec{E}' - \frac{\beta\gamma}{c}\frac{\partial {E'}_x}{\partial t'} + \beta\gamma c\left(\frac{\partial {B'}_z}{\partial y'} - \frac{\partial {B'}_y}{\partial z'}\right) = \frac{\gamma}{\epsilon_0}\left(\rho' + \frac{\beta}{c}{J'}_x\right)$$

$$\gamma\left(\vec{\nabla}.\vec{E}' - \frac{\rho'}{\epsilon_0}\right) + \beta\gamma c\left\{\left(\frac{\partial {B'}_z}{\partial y'} - \frac{\partial {B'}_y}{\partial z'}\right) - \left(\frac{\rho}{\epsilon_0 c^2}J_x - \frac{1}{c^2}\right)\frac{\partial {E'}_x}{\partial t'}\right\} = 0$$

Le terme :

$$\left(\frac{\partial {B'}_z}{\partial y'} - \frac{\partial {B'}_y}{\partial z'}\right) - \left(\frac{\rho}{\epsilon_0 c^2}{J'}_x - \frac{1}{c^2}\right)\frac{\partial {E'}_x}{\partial t'}$$
$$= \left(\vec{\nabla}\wedge\vec{B}'\right)_x - \left(\mu_0 J_x - \frac{1}{c^2}\right)\frac{\partial {E'}_x}{\partial t'} = 0$$

Par conséquent

$$\boxed{\vec{\nabla}.\vec{E}' - \frac{\rho'}{\epsilon_0} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \vec{\nabla}.\vec{E}' = \frac{\rho'}{\epsilon_0}}$$

Le même résultat est obtenu pour les autres équations, par conséquent les transformations de Lorentz laissent invariante les équations de maxwell lors du passage à un référentiel en translation uniforme par rapport à un référentiel inertiel.

De distinctes conceptions importantes sont obtenues à travers cette représentation formelle, Einstein donne une autre portée à la transformation de Lorentz qui dépassait sa connexion avec les équations de Maxwell, en citant la remise en cause de la nature de l'espace et du temps, la vitesse de la lumière est la même dans tous les

référentiels inertiels et l'invariance de Lorentz comme condition générale pour la théorie physique[97].

IV.2. Les différents types de modèle en physique

Il y a différentes façons d'établir une classification de modèles, on peut les classer selon leur évolution historique en modèles mécaniques et modèles mathématiques, ou selon leurs types comme les modèles quantitatifs et les modèles qualitatifs ou encore leurs fonctions comme les modèles descriptifs, les modèles explicatifs, les modèles prédictifs, les modèles déterministes, les modèles probabilistes….

IV.2.1. Les modèles mécaniques.

Le modèle mécanique possède sa propre manière de concevoir et de percevoir les faits et d'organiser leurs représentations. Historiquement le modèle mécanique précède le modèle mathématique, avant la théorie des champs, le monde physique était expliqué par des lois des mouvements matériels ; c'est-à-dire en termes concrets de mouvement de corps comme les chocs entre particules ayant des propriétés mécaniques très simples. L'introduction des repères devient indispensable, l'algèbre et l'analyse deviennent prédominants et la géométrie euclidienne modélise avec pertinence l'espace physique.

Avec Galilée et Newton, la physique a acquis une nouvelle démarche avec de nouveaux outils. Elle a commencé par la mécanique qui a donné des nouvelles propriétés qui la distinguait des autres sciences de la nature. Cette mécanique s'intéressa tout d'abord aux mouvements des corps, elle attribua des lois exactes de relations entre des grandeurs d'expression mathématique (position, vitesse, accélération, quantité de mouvement, force, masse, etc.), constituées sur la base de principes ou propriétés générales (principe d'inertie, composition des mouvements et des forces, équilibre…). Avec l'étude de la chute libre par Galilée, le temps est devenu une véritable variable physique fondamentale, il fut inclus dans les équations permettant de formuler la loi des espaces et des vitesses. Et à la suite de la loi fondamentale de la dynamique newtonienne, les grandeurs de la mécanique furent ensuite constituées de manière à ce que les lois soient exprimées sous forme différentielle.

Cette conception basée sur les modèles mécaniques a été étendue à l'ensemble des corps solides et aux fluides, ainsi qu'à des corps terrestres et célestes, puis elle s'est élargie progressivement à l'ensemble des branches de la physique, d'abord la mécanique, la thermodynamique, l'acoustique, puis l'optique, l'électricité, le magnétisme, la physique atomique…

Dans le modèle mécanique, – la réalité physique se caractérise donc par les concepts d'espace, de temps, de points matériels, de force, autrement dit le point matériel avec son mouvement dans l'espace au cours du temps est le représentant exclusif de la réalité, quelle que soit la versatilité de la nature[98]. Dans le modèle mécanique, la lumière par exemple est modélisée par des particules qui se meuvent en

97 Schilpp, Paul Arthur, Einstein, Albert (1979) : Autobiographical Notes, Open Court Pub Co, 95 p. (ISBN 978-0875483528)

98 Einstein, Albert (1979) : Comment je vois le monde, p168-169 & p.171-176, Paris : Flammarion.

ligne droite formant des rayons lumineux. Ainsi la théorie de la lumière est en quelque sorte unifiée à celle des points matériels.

Le modèle mécanique est un modèle qui fait intervenir les propriétés mécaniques (grandeurs caractéristiques de la mécanique), ces grandeurs peuvent être directement observables ou non.

Rappelons qu'ils existent des grandeurs qui sont directement observables comme la pression, le volume, la quantité de chaleur, la température. Ou des grandeurs qui ne sont pas directement observables comme la masse, la force, le moment. Ces grandeurs sont liées entre elles par des relations mathématiques et représentées par des symboles.

Un modèle mécanique peut être : une expérience, une loi mathématique, une figure, une maquette, un objet réduit… ou toute autre représentation mais utilisant toujours les propriétés mécaniques du phénomène étudié.

Exemple : **Le vecteur.**

Le vecteur est l'exemple typique du modèle mécanique.

Pratiquement dans tous les principaux domaines de la physique, les phénomènes étudiés sont représentés par des vecteurs.

Dans le petit Robert (2002) on trouve une définition mathématique de vecteur :

Un vecteur peut être un segment de droite orienté, formant un être mathématique, sur lequel on peut effectuer des opérations, en mathématiques.

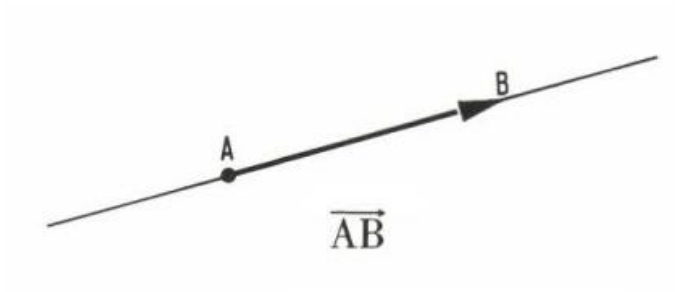


Figure 19: Un vecteur lié

La notion de vecteur est le produit d'une longue histoire, elle a connu une évolution de ses notations et de ses représentations, pour n'en citer que les principaux :

- Rafaele Bombelli (1526-1573) : Dans son ouvrage unique *l'Algebra,* Expliqua en 1572 les nombres complexes « imaginaires » apparus dans la résolution des équations algébriques du 3ème degrés à travers les modèles géométriques en pensant aux vecteurs d'où l'origine de calcul vectoriel.
- Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) : il critiqua la géométrie cartésienne et élabora un calcul sur des entités géométriques, il voulait un calcul opérant directement sur les figures et non des intermédiaires algébriques étrangers à la géométrie. C'est donc à travers l'interprétation géométrique des

quantités imaginaires de Bombelli et la croisée de l'algèbre et de la géométrie de Leibniz, que le concept de vecteur est nait.

- Jean-Robert Argand (1768-1822) : il donna en 1806 une représentation géométrique des nombres complexes en introduisant la notion de vecteur comme segment orienté dans un plan. C'est pratiquement la définition première du concept de vecteur. Il définit aussi la notion de la décomposition d'un vecteur sur une base.
- William Rowan Hamilton (1805-1865) : il fut le premier à employer le terme de vecteur en travaillant sur la théorie des nombres complexes. Il définit en 1843 pour la première fois un vecteur en développant la théorie des quaternions : un vecteur est une partie d'un quaternion, il le considère comme « une ligne droite AB qui a non seulement une longueur et une direction. […] Un vecteur est conçu pour être (ou pour construire) la différence entre ces deux points ; ou, plus précisément, pour résulter de la soustraction de sa propre origine avec sa propre extrémité » [Hamilton, 1899].
- Hermann Günther Grassmann (1809-1877) : Parallèlement à Hamilton il développa le calcul vectoriel et définit le produit vectoriel, introduisit la notation vectorielle pour des problèmes de physique à partir de ses travaux sur la théorie des marées.
- Oliver Heaviside (1850-1925) et Willard Gibbs (1839-1903) : ils développèrent l'algèbre des vecteurs dans l'espace à trois dimensions, ils donnèrent à l'analyse vectorielle sa forme quasi définitive.

En plus de la question mathématique (la représentation géométrique des nombres imaginaires), l'origine des vecteurs et de leur calcul se rattache plus à la mécanique classique (même Implicitement)[99], précisément au développement de l'étude des mouvements par Galilée et Newton qui comprennent le caractère vectoriel des notions de vitesse, d'accélération et de la force (pour eux, ces grandeurs peuvent varier de deux façons : en intensité et en direction)[100]. En mécanique donc, l'idée d'introduire une «**direction**» et un «**module**» en géométrie est fortement présente. Ces objets physiques, tels que les vitesses, les accélérations et les forces sont alors modélisés par des vecteurs et que toutes les propriétés des vecteurs sont appliquées à ces objets.

Aux alentours de 1930, la notion de vecteur et l'analyse vectorielle ont été étendues à la théorie des espaces vectoriels, d'où l'évolution des systèmes symboliques représentant les vecteurs, ainsi que leurs définitions.

En mécanique classique, l'espace est assimilé à un espace vectoriel euclidien de trois dimensions. Le vecteur est donc le modèle le plus adéquat à représenter les éléments de cet espace.

Les vecteurs sont des éléments indispensables dans la modélisation des concepts de la physique, leur importance provient surtout de leur utilisation intensive en

99 Bulletin de l'Union des physiciens, novembre 1975.

100 Pressiat, A. (1999) : Aspects épistémologiques et didactiques de la liaison « points-vecteurs ». Thèse de Doctorat. Université Paris VII.

physique ils sont pratiquement utilisés dans tous ses domaines à un point qu'il est impossible de les contourner.

Les vecteurs trouvent immédiatement leur application en mécanique, en effet, ils servent en physique à modéliser des grandeurs orientées appelées encore grandeurs vectorielles, qui ne peuvent être complètement définies par un nombre seul ou une fonction numérique seule. Par exemple, pour modéliser une vitesse, une accélération, une force ou un champ électrique, il faut aussi connaître la direction et le sens. Les grandeurs vectorielles s'opposent aux grandeurs scalaires que l'on peut décrire par un simple nombre, comme la masse, la température, la pression, etc.

Prenons un exemple simple. Sur un plan incliné, on considère un ressort de longueur à vide l_0 et de raideur k, dont les extrémités sont reliées à un point fixe O et à un point matériel M de masse m.

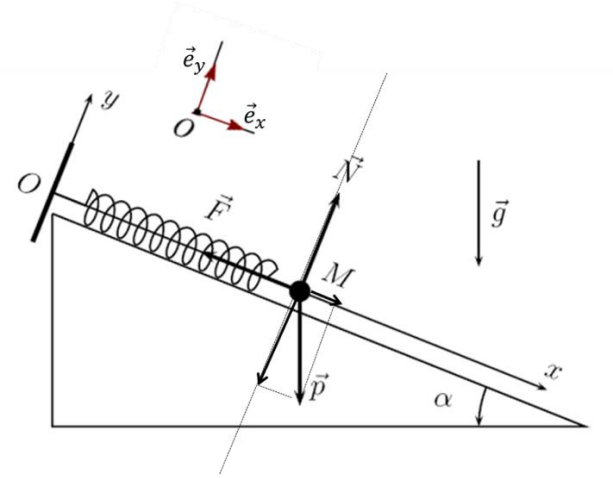


Figure 20: Masse liée à un ressort sur un plan incliné

Dans cet exemple, pratiquement tous les concepts physiques sont modélisés par des vecteurs qui sont ensuite manipulées de diverses manières. Avec cette modélisation, on passe d'un problème physique (système masse-ressort) à un problème mathématique (vecteurs)

La position est modélisée par un vecteur position qui peut s'exprimer en fonction de ces coordonnées et des vecteurs unitaires du repère.

Les forces, les vitesses et les accélérations sont modélisées par des vecteurs qui peuvent s'exprimer par leurs composantes ou leurs projections sur les axes du repère.

À première vue, le vecteur est un outil de visualisation et de simplification permettant la description détaillée du système et la compréhension de son évolution. C'est aussi un outil de raisonnement, ce système mécanique pouvait être traité par l'application des lois fondamentales (principe d'inertie, quantité de mouvement, principe fondamentale de la dynamique, calcul différentiel) exprimées aussi vectoriellement puis par l'analyse vectorielle on aboutit à des nouvelles formules gouvernant leurs relations.

L'analyse vectorielle permet de simplifier pas mal de démonstrations en physique, de nouveaux concepts apparaissent qui trouvent leurs significations en physique. Les composantes d'un vecteur dans un repère, sont des produits scalaires avec ses vecteurs de base, le produit scalaire ou le produit vectorielle entre certaines grandeurs physiques choisies permet de définir de nouvelles grandeurs comme la longueur, la résultante, le travail, le flux à travers une surface, les lignes de niveau ou le

moment de vecteur, le moment cinétique, l'accélération de Coriolis, la force de Lorentz, la force de Laplace…

De même les fonctions vectorielles sont beaucoup utilisées en physique afin de modéliser des champs scalaires comme la température $T(x, y, z)$ ou la densité $\rho(x, y, z)$ et les champs vectoriels comme le champ de force ou le champ de vitesse.

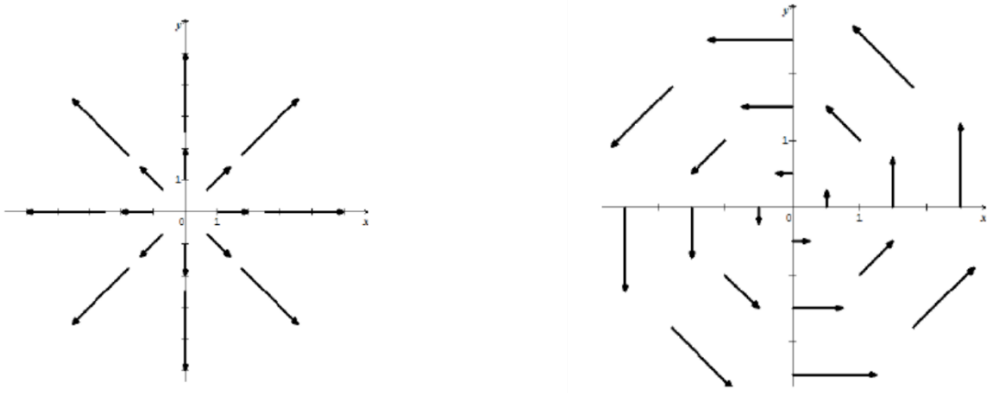


Figure 21: Deux exemples de champ vectoriel

Les opérateurs de dérivation tels que le gradient, la divergence et le rotationnel sont couramment utilisés en physique, ils offrent des informations sur le comportement des champs vectoriels qui ont une signification fondamentale en physique. Le gradient informe sur la direction du plus grand taux de variation d'un champ scalaire comme la description de la variation de la température ou la pression selon chaque direction. La divergence peut s'interpréter comme un terme de mesure locale de l'expansion du champ sur les trois directions, par exemple la divergence du champ de vitesse d'écoulement d'un fluide est égale au flux net de ce fluide s'écoulant, par unité de temps et le rotationnel est une approximation de l'axe de rotation des déformations locales du champ par exemple le rotationnel du champ de vitesse d'écoulement d'un fluide représente une mesure de la vitesse angulaire de rotation du fluide au voisinage d'un point.

Enfin une propriété spécifique des vecteurs et de l'analyse vectorielle est leur invariance lors d'un changement du repère de référence, Feynman exprime :

> "*Le fait qu'une relation physique puisse être exprimée comme une équation vectorielle nous assure que la relation reste inchangée lors d'une simple rotation du système de coordonnées. C'est la raison pour laquelle les vecteurs sont si utiles en physique*."[101]

IV.2.2. Les modèles mathématiques.

Historiquement, les modèles mathématiques ont succédé aux modèles mécaniques, ils font appel à des grandeurs avec des propriétés non mécaniques.

Au début du 19ème siècle, des nouvelles expériences ont été réalisés, comme les phénomènes électriques, ils ont créé des difficultés sérieuses aux interprétations mécaniques. Des tentatives de mettre en évidence leur parfait parallélisme avec des

101 Einstein, Albert (1979) : Comment je vois le monde, p168, Paris : Flammarion.

phénomènes mécaniques bien choisis et bien connus ont échoué[102]. De nouveaux modèles conceptuels ont pris naissance et tentent de décrire ces phénomènes physiques. Ce changement conceptuel réside dans la compréhension que certaines caractéristiques de la nature n'étaient pas attachées aux objets matériels.

Avec Maxwell et Faraday, la physique a acquis une nouvelle conceptualisation et explication d'un ensemble d'observations en oubliant définitivement les corps matériels et les particules. En 1861, après avoir analysé les travaux d'Œrsted (1777-1820) et de Faraday, Maxwell créa le concept fondamental du « **champ** », abandonnant celui des fluides électriques dans l'éther. Un champ qui s'étend dans le milieu, c'est une grandeur physique défini en chaque point d'un espace donné. L'interaction entre les particules est déterminée donc par l'état du milieu qui les sépare, ce qui donne à cet espace la propriété d'interagir avec le corps. Einstein considère le concept de champ et la théorie du mouvement des masses et de la gravitation comme deux évènements fondamentaux qui ont placé la physique sur une nouvelle base.

> "*Avant lui (Maxwell), je conçois le réel physique — c'est-à-dire je me représente les phénomènes de la nature ainsi — comme un ensemble de points matériels. Quand il y a changement, les équations différentielles partielles décrivent et règlent les mouvements. Après lui, je conçois le réel physique comme représenté par des champs continus, non explicables mécaniquement mais réglés par des équations différentielles partielles*."[103]

Cette modification de la conception du réel, d'un ensemble de points matériels régi par les équations différentielles, aux champs continus, définis en tout point de l'espace, non explicables mécaniquement et régis par des équations différentielles partielles est considéré par Einstein comme une véritable révolution conceptuelle en exprimant :

> "*Pendant la seconde moitié du 19ème siècle des idées nouvelles d'un caractère révolutionnaire ont été introduites en physique, qui ont frayé la voie à un nouveau point de vue philosophique, différent du point de vue mécanique. Les résultats de l'œuvre de Faraday, de Maxwell et de Herz ont conduit au développement de la physique moderne et à la création de concepts nouveaux, qui forment une nouvelle image de la réalité*."[104]

Autres Exemple de modèles mathématiques.

---

102 Poincaré, Henri (1907) : La théorie de Maxwell et les oscillations Hertziennes, Scientia, novembre 1907, 3ème édition, p.14. Paris Librairie Gauthier-Villard

103 Einstein, Albert (1979) : Comment je vois le monde, p.171, Paris : Flammarion.

104 Feynman, Richard, INFELD, Leopold (1983) : L'évolution des idées en physique, p.117, Paris : Flammarion

- L'espace-temps de Minkowski qui comporte quatre dimensions : trois dimensions pour l'espace : x, y, et z, et une pour le temps t.
- La « contraction » de longueur des objets dans la direction de mouvement.
- Le temps ne s'écoule pas de la même façon dans deux référentiels galiléens en mouvement relatif.
- Deux évènements qui se produisent simultanément dans un référentiel peuvent se produire à des instants différents dans un autre référentiel.
- Invariabilité de la vitesse de la lumière, et nouveau statut de la constante c
- Les expériences de pensée « Le paradoxe des jumeaux », « Le paradoxe du train », « Le chat de Schrödinger », « Le paradoxe EPR »
- La quantification de Max Planck.
- La prédiction de l'existence de nouvelles particules comme l'hadron ou le boson de Higgs.
- Le principe d'équivalence.

IV.2.3. Les modèles quantitatifs.

Un modèle quantitatif est une représentation qui attribue un nombre dit *grandeur physique* à une caractéristique d'un phénomène physique. Un modèle est quantitatif quand on y fait usage de la *mesure*. Mesurer c'est faire correspondre aux opérations de calcul effectuées dans un corps de nombre, des opérations empiriques bien définies pour le phénomène considéré.

Cette grandeur représente une propriété de la nature qui peut être quantifiée par la mesure ou le calcul, et dont les différentes valeurs possibles s'expriment à l'aide d'un nombre généralement accompagné d'une unité de mesure.

L'addition et la soustraction de ces grandeurs n'est possible que si elles sont relatives à la même grandeur. En revanche, il est possible de multiplier ou de diviser des grandeurs différentes, auquel cas on obtient une nouvelle grandeur dérivée des deux autres.

Par exemple, la vitesse est issue de la division de la longueur par le temps. Il existe donc théoriquement une infinité de grandeurs, mais seulement un certain nombre d'entre elles sont utilisées dans la pratique, celles qui sont interprétées explicitement par des conditions sémantiques de mesure ou de calcul, on les appelle « *modèle quantitatif* ». Le domaine de la physique qui traite des relations entre ces grandeurs est appelé l'analyse dimensionnelle.

Les modèles quantitatifs sont donc ces grandeurs numériques et tout ce qui découle de ces nombres : tels que les lois ; les expressions mathématiques, les symboles et les expériences de mesure.

Exemples :

Les quantités		
La masse m	La charge q	La température T
La vitesse v	Le temps t	La longueur d'onde λ

Soulignons que les modèles quantitatifs contiennent des concepts dans différents niveaux, dont certains sont directement liés à l'expérience, ils peuvent être définis de manière opérationnelle, comme la distance, la charge, la masse, le temps, la température, et le courant électrique… et d'autres sont des concepts théoriques plus abstraits qui n'ont aucun rapport direct avec l'expérience comme : la quantité de mouvement, le travail, le champ, l'électron et le photon…

Les lois	
La loi de l'attraction universelle	$F = G\frac{Mm}{r^2}$
La loi de Coulomb	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$
La loi des gaz parfaits	$PV = nRT$
La loi de Bragg	$n\lambda = 2d\ sin(\theta)$
La loi de Planck	$E = h\nu$
La loi de la radioactivité	$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

Parmi les modèles quantitatifs, il existe des lois fondamentales par exemple les lois de Newton et de Coulomb, et des lois expérimentales telles les lois de Bragg et de la radioactivité.

Un modèle quantitatif peut être modèle d'un autre du même type autrement dit deux modèles quantitatifs peuvent être analogues.

Un bon exemple est l'analogie entre l'oscillateur mécanique et l'oscillateur électrique.

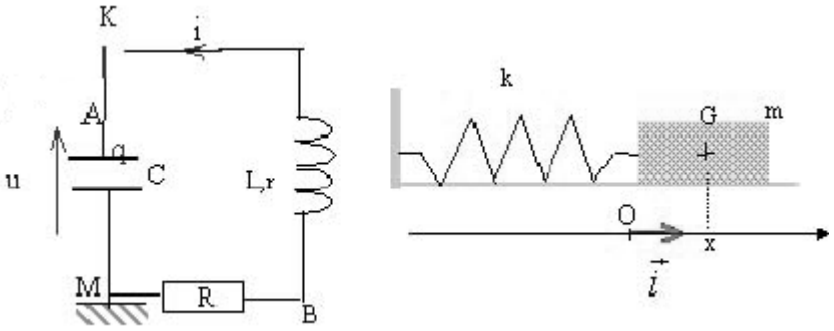


Figure 22: Analogie entre l'oscillateur mécanique et l'oscillateur électrique

Observant l'analogie existante entre diverses quantités de ces deux systèmes :

1- La force extérieure F(t) agissante sur le ressort est analogue à la force électromotrice de générateur e(t).
2- La masse m est analogue à l'inductance L
3- L'écart du solide par rapport à la position l'équilibre est analogue à la charge du condensateur par conséquent l'élongation x du ressort est analogue à la charge q du condensateur.
4- La vitesse $v = \frac{dx}{dt}$ du solide est analogue à l'intensité de courant $i = \frac{dq}{dt}$ dans le circuit.

5- La tension du ressort T_x est analogue à la tension électrique de condensateur u_c.
6- La force de frottements mécaniques f est analogue à la résistance électrique R.
7- L'énergie potentielle élastique $E_p = \frac{1}{2}kx^2$ est analogue à l'énergie emmagasinée dans le condensateur $E_{cond} = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$

L'équation qui régit l'évolution temporelle de la tension u(t) aux bornes du condensateur s'écrivait :

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{du}{dt} + \frac{1}{Lc}u = \frac{e(t)}{Lc}$$

Nous pouvons comparer cette dernière à l'équation obtenue pour un oscillateur mécanique amorti en régime forcé :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{f}{m}\frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x = \frac{F(t)}{m}$$

En comparant ces deux équations différentielles, nous en déduisons l'analogie entre les deux types d'oscillateurs, c'est-à-dire les correspondances entre leurs différentes grandeurs caractéristiques. Cette analogie nous permet de passer entre les deux modèles sans faire les deux manipulations. On dit que l'un est le modèle de l'autre dans leurs grandeurs et leur calcul quantitatif.

L'aspect quantitatif d'un modèle donne un caractère scientifique à la description d'un phénomène. Selon les physiciens mathématiciens Thomas Thomson (1824-1907) et Lord Kelvin (1813-1883), le premier pas fondamental dans l'apprentissage de n'importe quel sujet en sciences physiques est de trouver des principes de calcul numérique et des méthodes pratiques pour mesurer une partie de la qualité qui y est associée. Quantifier c'est connaitre quelque chose, sans pouvoir l'exprimer en nombre, nos connaissances sont incomplètes et insatisfaisantes[105].

Les courants épistémologiques occidentaux qui considèrent implicitement que le langage de la physique est essentiellement quantitatif sont l'empirisme et le positivisme compte tenu de la priorité donnée aux faits expérimentaux. Le premier suppose que toute connaissance provient essentiellement de l'expérience et que les sciences progressent en effectuant des observations dont on peut tirer des lois et des théories. Le second courant donne plus d'importance au raisonnement et propose de relier les données expérimentales par des lois mathématiques exprimées de façon aussi simple que possible. Ainsi les rôles attribués aux modèles quantitatifs sont :

1- Permettre de comprendre et d'expliquer le monde et ses phénomènes.

105 Thomson, William Thomas ou Kelvin, Lord (1883) : Electrical Units of Measurement, Popular Lectures and Addresses, Vol. I, 80-I

2- Donner une description détaillée du phénomène physique étayée par des données d'expériences et basée sur une formulation mathématique simple, claire et précise.
3- Pouvoir prédire n'importe quelles situations.
4- Donner la possibilité d'agir sur le monde extérieur.
5- Permette surtout de produire d'utiles instruments et machines et dispositifs techniques.

Pour René Thom la quantification est toujours associée aux seules lois fondamentales de la physique, ces lois fondamentales comme la gravitation et l'électromagnétisme… ont un caractère universel et permettent d'édifier des modèles dont l'exactitude numérique défie la raison : "S'il est un domaine de la science où les mathématiques (quantitatives) s'appliquent, c'est évidement la physique."[106]

Bien qu'il existe parmi les modèles quantitatifs des lois fondamentales telles que les lois de Newton, Coulomb, Maxwell, Schrödinger, Dirac, etc..., caractérisées par leur précision et leurs formulations mathématiques rigoureuses avec une grande portée ontologique, nous observons l'existence d'un grand nombre de modèles quantitatifs inutiles basés principalement sur la description superficielle des régularités ou des propriétés de la nature. Les chercheurs de ces modèles explorent la cohérence de la nature, sélectionnent un phénomène particulier et s'efforcent de trouver des quantités mesurables puis en utilisant de différents outils mathématiques ils aboutissent à des modèles quantitatifs adverbiaux qui ne font référence qu'à des réalisations contingentes particulières, sans aucune base intelligible sauf qu'ils sont vérifiés dans certaines applications particulières. René Thom considère cette tâche comme une recherche réduite à l'élaboration d'un modélisme quantitatif naïf qui le plus souvent, ne nous apprend rien sur les mécanismes sous-jacents aux processus étudiés[107].
Bien que la notion de modèle soit associée à une idée de simplification systématique et d'ensemble organisé, on remarque l'existence d'une hiérarchie des modèles quantitatifs avec une échelle infinie d'hypothèses et de données et une complexification permanente. L'aptitude des mathématiques en tant que modèle de la physique à nous offrir de nombreuses possibilités de manipuler les données quantitatives (les paramètres et les degrés de liberté) et les différentes distributions de ces paramètres selon la situation expérimentale ouvrent la voie à la construction de divers modèles quantitatifs en passant d'un modèle à un autre plus fonctionnel et plus général. Au fil du temps les modèles se multiplient, par conséquent on dévie de la simplicité vers la complexité avec une infinité d'hypothèses et de lois.

IV.2.4. Les modèles qualitatifs.

Un modèle qualitatif est une représentation d'un phénomène physique sans attribution d'un nombre (quantité) ou une loi ou une expression mathématique autrement dit un modèle qualitatif est un modèle sans mesure. Représenter un sujet par un modèle qualitatif est une activité mentale par laquelle on saisit : l'analogie, la comparaison, la similitude, la correspondance ou la métaphore avec un autre sujet qui

106 Thom, René (1984) : La Science malgré tout, p.74, Encyclopédia Universalis, Paris : Collection blanche.
107 Ibid.

lui ressemble. Modéliser qualitativement c'est aussi attribuer à un objet des caractéristiques ou des points communs dérivés d'un autre qui lui est similaire.

On peut le considérer comme toute représentation qui permet de ne retenir de l'objet réel qu'une caractéristique ou quelques-unes d'entre elles. Il ne contient pas toutes les caractéristiques, car s'il les contenait toutes il sera l'objet lui-même. En d'autres termes, c'est est une analogie entre modèle et objet qui exprime qu'un des deux saisit l'emplacement de l'autre dans les sens ou la raison. Cette analogie n'est pas intrinsèque, le modèle qualitatif n'est pas conforme donc à l'objet à tous les égards mais d'une manière formelle ou relationnelle. Le modèle et l'objet sont simplement similaires dans certaines des relations entre ses parties.

Un modèle qualitatif peut avoir plusieurs formes : un schéma, une figure, un symbole, une maquette, une métaphore…

Exemple 1 : **Modèle planétaire de l'atome.**

Le modèle planétaire de l'atome est un modèle physique proposé en 1911 par Ernest Rutherford (1871-1937) pour décrire la structure d'un atome. Ce modèle sera adapté en 1913 par Niels Bohr (1885-1962), reprenant cet aspect « planétaire » et proposa son modèle (Figure 23) pour expliquer la formule de Balmer qui donne les longueurs d'onde des raies émises par l'atome. Ce modèle qualitatif qui est basé sur des principes classiques montre un électron de masse m et de charge –e, décrit une trajectoire circulaire autour du proton de charge +e, supposée immobile.

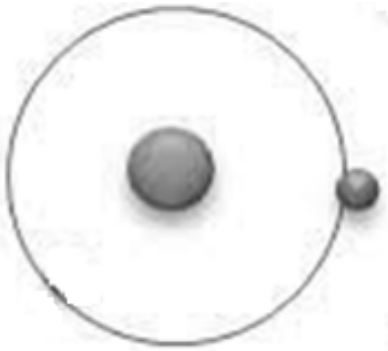


Figure 23: Le modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène

L'atome d'hydrogène est modélisé donc par un électron de masse m tournant autour du proton comme la terre qui gravite autour du soleil ou la lune autour de la terre.

Ce modèle nous a permis d'expliquer plusieurs phénomènes observés comme les raies spectrales des éléments hydrogénoïdes.

Exemple 2 : **le modèle de la goutte liquide.**

En physique nucléaire, la représentation la plus simple du noyau d'un atome consiste à l'assimiler à une goutte de liquide, il traite les nucléons du noyau comme une goutte de pluie, ou ils jouent le rôle de molécules. Le noyau est donc modélisé par un

fluide chargé incompressible. Ce modèle qualitatif permet, en déformant la goutte, d'avoir une approche "macroscopique" d'un noyau. Il permet de prévoir les masses atomiques avec une assez bonne précision. Il conduit aussi à la valeur du rayon du noyau, supposé sphérique. Ce modèle se repose sur un traitement qualitatif de l'énergie de liaison du noyau.

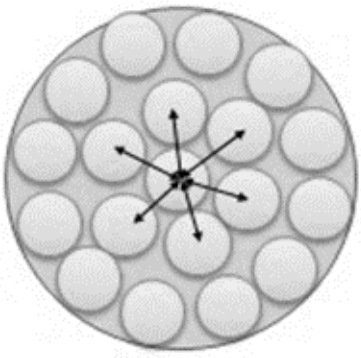


Figure 24: Le modèle de la goutte liquide

Exemple 3 : **Les ondes hertziennes modèles qualitatives des ondes électromagnétiques.**

En 1887 Heinrich Hertz (1857 -1894) produisit à l'aide d'un dispositif électrique qu'il avait mis au point, des ondes électromagnétiques de grande longueur d'onde, les ondes hertziennes, dont il put mesurer la vitesse de propagation et vérifier qu'elle s'identifiait bien avec celle de la lumière. Après qu'il eut démontré expérimentalement que ces ondes pouvaient être réfléchies ou réfractées, tout comme la lumière il devint clair que celle-ci ne se distinguait plus en rien de celles-là : la nature électromagnétique de la lumière était établie.

Exemple 4 : **Les groupes d'espace et réseaux de Bravais.**

Les groupes d'espace qui servent à décrire la symétrie d'un cristal dans sa maille conventionnelle est un bon modèle qualitatif qui n'introduisait aucune mesure, bien qu'il contienne des nombres qui ne produisent pas de quantification.

Les réseaux cristallins peuvent être décrits à partir de 7 mailles élémentaires qui définissent 7 systèmes cristallins. Selon que la maille élémentaire est simple ou multiple, et à partir de ces 7 systèmes cristallins, on définit les 14 types de réseaux de Bravais.

La maille élémentaire étant construite de manière symétrique, les éléments de symétrie sont le fondement des opérations géométriques aux nombreuses possibilités : La rotation ou axe de symétrie ; Le plan de symétrie ou plan-miroir ; L'inversion ou centre de symétrie.

Un groupe d'espace est constitué par l'ensemble des opérations de symétries d'une structure cristalline. La recherche des groupes d'espace consiste à déterminer toutes les combinaisons possibles entre les opérations de symétrie. L'ensemble des 230 types de groupes d'espace en trois dimensions résulte de la combinaison des 32 types de groupes ponctuels de symétrie avec les 14 types de réseaux de Bravais.

Toutes les propriétés physiques des matériaux cristallins telles que : les propriétés électriques, magnétiques, optiques, thermiques, dépendent principalement du groupe d'espace.

Le modèle qualitatif intervient pour substituer les objets éloignés de nos récepteurs sensoriels par d'autres nettement perceptibles. Le modèle atomique est substitué par le modèle planétaire et le noyau atomique par une goute liquide. Il remplace également un objet difficile à étudier par un autre facilement testé. La lumière ou les ondes électromagnétiques sont substituées par les ondes hertziennes auxquelles on peut calculer divers paramètres. L'objet que nous ne pouvons pas définir en soi, nécessite un modèle qualitatif pour le définir. Aristote définit la perception sensitive en modélisant l'organe sensible qui reçoit l'image des objets et non leur matière, par la cire qui reçoit la forme du cachet mais ni le fer ni l'or.

C'est un moyen de visualiser au sens propre un comportement inobservable, il nous permet d'exprimer des situations complexes en les rendant sensibles au moyen d'une image, d'une figure ou d'un signe ou en les représentants avec quelque chose de similaire. Le modèle doit être simple et connu, analogue à l'objet, stockable dans la mémoire et facilement classifiable parmi les représentations mentales. En physique, le circuit hydraulique illustre bien le fonctionnement d'un circuit électrique (Figure 25), la pompe correspond au générateur, la canalisation d'eau aux conducteurs électriques et le robinet à l'interrupteur. On pourrait ainsi comparer la différence de potentiel à la différence de hauteur, de même l'intensité et le sens du courant électrique peuvent être comparés au débit et le sens d'eau du circuit hydraulique.

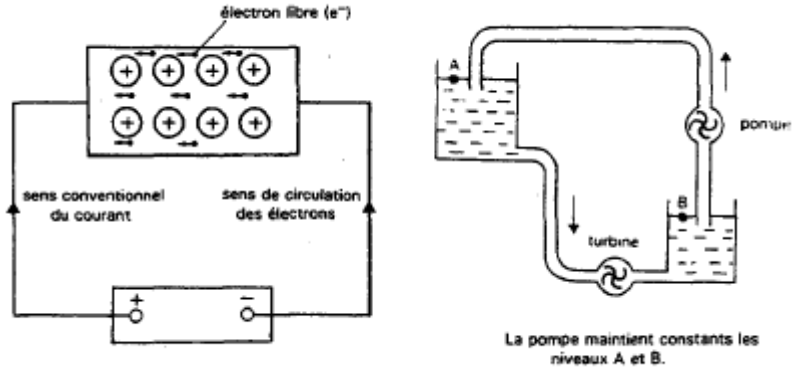


Figure 25: Modèle « circuit électrique - circuit hydraulique »

Dans la théorie du Big Bang, l'univers en expansion est modélisé par un ballon qui gonfle, à la surface externe de la membrane sont dessinés des points représentant des galaxies. Il est aussi modélisé par un pain aux raisins qui cuit, les raisins modélisent les galaxies qui s'éloignent dans la patte qui représente un univers en trois dimensions.

Parmi les principales caractéristiques des modèles qualitatifs :

- Ils sont des outils puissants utilisés par les scientifiques dans tous les domaines pour représenter leurs objets et les mettre en valeur dans des meilleures images. Ils apportent aux chercheurs différents avantages et répond à de nombreux objectifs, en particulier dans leurs démarches d'investigation et de leurs modes d'exposition.

- Ils permettent de fournir une représentation de l'abstrait sous une forme concrète, ce qui garantit une compréhension suffisante et adéquate des concepts abstraits surtout s'ils sont formulés sous une forme quasi sensorielle.
- Ils permettent grâce aux similitudes de rapprocher les différences et exposer le phénomène caché sous une forme habituelle en établissant les propriétés communes issues de phénomènes très différents.
- Ils permettent aussi de découvrir et de révéler de nouveaux faits, de clarifier leurs états et leurs caractéristiques, d'exprimer leurs intensités (forte, faible, croissante, décroissante), qualifier et généraliser une propriété des objets.

Le modèle qualitatif n'est pas limité aux phénomènes physiques eux-mêmes mais parfois nous le trouvons dans leurs raisonnements et leurs relations mathématiques. Historiquement J. C. Maxwell a traité les analogies entre l'électrostatique et la mécanique, l'électrostatique et l'électrocinétique, l'électrostatique et la propagation de la chaleur. Par ailleurs, H. Poincaré développe des analogies entre l'électromagnétisme et la mécanique, l'électricité et l'hydraulique…. Les modèles qualitatifs peuvent intervenir dans la démarche du chercheur en lui permettant de progresser dans la connaissance scientifique.

IV.3. Modèles et explications scientifiques.

En physique il y a une diversification associée aux types de modèle, ils étaient d'abord matériels, physiques ; ils sont aujourd'hui symboliques, mathématiques et logiques ; ils seront de plus en plus informatiques. Les modèles scientifiques se présentent sous différentes formes et expliquent une grande diversité de phénomènes. Ces propriétés leurs offrent une multitude de particularité.

IV.3.1. Les particularités épistémologiques des modèles.

En propos liminaire, la variété des modèles dans les sciences physiques, et les nombreux phénomènes qu'ils peuvent expliquer ont rendu difficile leurs définitions, leurs formulations dans une conception unificatrice, ou leurs conceptions dans un cadre épistémologique unique.

En se référant à quelques travaux significatifs et aux différentes définitions proposées par des scientifiques, nous n'avons pas aboutis à une définition parfaitement stable et consensuelle du terme modèle. On considère ces définitions comme un ensemble de caractérisations les plus importantes qui décrivent le modèle, d'où la clarification de ce concept et l'extraction de la richesse de sa sémantique citons :

> 1- Un modèle scientifique est un modèle réduit, c'est à dire : reproduction à petite échelle. L'établissement de modèle fait progresser la connaissance de phénomènes ou de systèmes très complexes (astrophysique, physique nucléaire, économie,

gestion, etc.). Le modèle constitue la simplification du système étudié.[108]

2- Le modèle est d'abord la « maquette », l'objet réduit et maniable qui reproduit en lui, sous une forme simplifiée, « miniaturisée », les propriétés d'un objet de grandes dimensions, qu'il s'agisse d'une architecture ou d'un dispositif mécanique ; l'objet réduit peut être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne sont pas appliqués commodément à la chose reproduite.[109]

3- Le modèle peut être une matérialisation des énoncés de la science dans un objet concret presque autonome, pour qui l'intuition ou la pensée ont des facilités pour le cerner : la mécanique élémentaire réalisait les relations physiques dans des collections de particules on assignait une forme et un mouvement pour mieux comprendre leurs interactions.[110]

4- Le modèle est une image, une représentation simplifiée et abstraite de la réalité […] Le terme de modèle signifie simplement ensemble d'expressions mathématiques d'écrivant formellement certains phénomènes.[111]

5- Un modèle est un système matériel - ou mental- qui simule la situation naturelle de départ […] Un modèle est un système ou une loi analogique d'un être réel […] Un modèle fournit à l'observateur une réponse à une question.[112]

6- Un modèle scientifique est une représentation de ce qu'on ne peut pas voire directement pour différentes raisons. Il aide les scientifiques à concevoir, à analyser ou à imaginer des concepts scientifiques.[113]

7- En mathématique et en logique le terme modèle connaitre une définition plus syntaxique : un modèle est un système formé d'expressions formelles que l'on peut déduire à partir d'une théorie.[114]

8- Un modèle, pour le théoricien, est une construction intellectuelle qui va l'aider à approcher la réalité des phénomènes, pour élaborer progressivement ses théories.[115]

---

108 Hachette, (2008) : Dictionnaire Hachette éd 2008, 1812p, Paris : Hachette Livre.
109 Noël, Mouloud (2004) : Modèle, Encyclopædia Universalis, V. 08, Paris : Collection blanche
110 Jaulin, Bernard (2004) : Modèle, Encyclopædia Universalis, V. 08, Paris : Collection blanche
111 Nouvel, Pascal (2002) : Enquête sur le concept de modèle. Paris : PUF.
112 Thom, René (1984) : La Science malgré tout, p.74, Encyclopédia Universalis, Paris : Collection blanche.
113 Noël, Mouloud (2004) : Modèle, Encyclopædia Universalis, V. 08, Paris : Collection blanche
114 Jaulin, Bernard (2004) : Modèle, Encyclopædia Universalis, V. 08, Paris : Collection blanche
115 Cohen-Tannoudji, G., Sacquin, Y. (1999) : Symétrie et brisure de symétrie. Paris : EDP Sciences.

9- Un modèle, pour le scientifique, est une construction intellectuelle qui va servir d'outil de raisonnement en vue de la compréhension d'un phénomène qui aura été repéré.[116]

Ces affirmations révèlent plusieurs caractéristiques distinctes du modèle plutôt qu'une définition :

1- Un modèle n'est pas nécessairement une reproduction matérielle. Il n'est pas nécessairement une conception abstraite.
2- L'existence du modèle se justifie toujours par le fait qu'il simplifie facilite, décrit, précise ou donne la réponse à une question.
    a- Rendre sensible, accessible aux cinq sens.
    b- Faciliter l'expérimentation et la mesure.
    c- Faciliter une présentation via une conceptualisation ou production de concepts.
    d- Décrire une réalité complexe de manière simple.
    e- Mettre en relation des concepts explicitement définis.
    f- Décrire et illustrer de manière réductrice, simplifiée et fonctionnelle les traits essentiels d'un objet, d'un système ou d'un processus.
3- Le modèle est lui-même un objet, objet intermédiaire entre la théorie et le phénomène dont la fonction est de représenter, d'expliquer et de prédire.
    a- Objet heuristique (instrument d'exploration des phénomènes).
    b- Découvrir des nouveaux faits.
    c- Prédire des évènements ainsi que leurs déroulements.
    d- Elaborer progressivement une théorie en proposant des modèles conceptuels hypothétiques.
    e- Interpréter et simplifier une théorie via des modèles.
    f- Tester la cohérence interne d'une théorie via des modèles.
    g- Prévoir avec une plus grande probabilité et une meilleure certitude différents comportements ou différentes situations.
4- Différents modèles peuvent représenter un même référent et un même modèle peut représenter plusieurs référents.
5- Un modèle est assujetti à des révisions.
    a- Un modèle ne peut s'appliquer à tous les niveaux d'analyse et à tous les objectifs de recherche.
    b- Un modèle doit toujours être vérifié et confronté aux différentes circonstances, situations et aux cas auxquels il s'applique.

116 Nouvel, Pascal (2002) : Enquête sur le concept de modèle. Paris : PUF.

c- Un modèle est provisoire, il peut être transformé, corrigé, validé, développé ou rejeté.

IV.3.2. Modèles et explications scientifiques.

Nous avons vu que les modèles sont des constructions matérielles ou formelles servant à représenter quelque chose, cette chose pouvant être réelle ou fictive. Mais en faisant cette reproduction, on a tendance d'une part à considérer les modèles comme étant d'abord de l'ordre de la représentation pour décrire et illustrer de manière réductrice, simplifiée et fonctionnelle les traits essentiels d'un objet, d'un système ou d'un processus, et d'autre part nous sommes clairement conscients que les modèles servent à transformer le réel, à l'anticiper ou parfois à le supplanter.

Un modèle n'est donc qu'une représentation simplifiée, relative, incomplète et temporaire d'une partie du réel ou d'un phénomène. Il ne représente pas toutes les caractéristiques de l'objet ou du phénomène étudié mais uniquement certaines d'elles. Un modèle est toujours plus simple que l'objet, le phénomène ou le processus qu'il est supposé représenter et expliquer. Un modèle est toujours nettement plus pauvre que la réalité représentée. L'élaboration du modèle n'est donc qu'une autre approximation d'un système plus élaboré.

Dans le cas de la simplification et de l'idéalisation de la représentation, la question est toujours de savoir quoi inclure et quoi exclure. Si les composants pertinents sont exclus, le modèle peut être trop simple et ne soutient pas le développement de la compréhension souhaitée. D'autre part, si trop de détails sont inclus, le modèle peut devenir si compliqué que, encore une fois, il échoue à promouvoir le développement des niveaux plus profonds de compréhension que l'on cherche. Un modèle doit donc être assez spécifique pour représenter correctement certains aspects de l'objet, système ou le processus étudié. En physique, un modèle idéalisé est une version simplifiée du système physique qui élimine les aspects inutiles de la situation. Il ne comporte que les fonctionnalités qui seront nécessaires pour notre analyse, les plans sans frottement, les masses ponctuelles, les sphères rigides, les vitesses infinies, les systèmes isolés, ne sont que quelques exemples bien connus.

La simplification et l'idéalisation sont des manières de construction des hypothèses qui revêtent une importance déterminante pour donner au travail une dimension scientifique. Le cas du modèle des sphères dures s'entrechoquant utilisé en physique statistique et en théorie des gaz est un bon exemple. Ce nouveau modèle de gaz approximatif fait l'objet d'une hypothèse physique. Il est indispensable pour la représentation visuelle, l'abstraction mathématique, et par conséquent la facilité de développement de notre compréhension.

En plus de la formulation des hypothèses de recherche, à travers le modèle, on peut modifier les composantes et les modes de fabrication d'un objet ou d'un processus, énoncer une nouvelle problématique, ou d'anticiper et de prédire des événements ainsi que leur déroulement.

Un modèle est un moyen servant tant à la représentation qu'à l'étude d'un phénomène. C'est également un outil qui sert à créer un certain ordre entre les concepts d'un tout complexe et à représenter les liens qui existent entre eux.

C'est à travers le modèle qu'on parvient à produire une image d'une partie du réel qu'on ne pourrait probablement pas percevoir autrement, comme par exemple, le mouvement brownien qui nous a permis de calculer la masse d'une molécule, ou la

théorie cinétique des gaz qui a donné des résultats très importants telles que les caractéristiques physiques et chimiques d'un gaz, et prédit l'existence d'un nombre universel (le nombre d'Avogadro) et nous rend possible de le déterminer.

Parmi toutes les sciences, la physique est la plus proche des mathématiques. Cette relation particulière est universellement reconnue. Les mathématiques s'appliquent mieux à la physique qu'aux autres sciences à un degré qu'il y a une adéquation biunivoque entre les concepts mathématiques et les concepts physiques. En physique la mécanique classique ne peut être conçu sans recourt au calcul différentiel et intégral, l'électromagnétisme de Maxwell sans les équations aux dérivées partielles, la relativité générale sans le calcul tensoriel, et la mécanique quantique sans les espaces de Hilbert. De plus les lois et les concepts de la physique se caractérisent par un polymorphisme mathématique. En effet ils possèdent une multitude de mathématisations possibles, d'un autre coté les concepts mathématiques se caractérisent par une plurivalence physique autrement dit toute structure mathématique trouve son application dans divers chapitres de la physique.

L'introduction d'objets mathématiques en physique offre une nouvelle possibilité de modélisation des phénomènes, et encore une intuition significative par la puissance des symboles qui constituent leur langage. Les problèmes les plus difficiles en physique peuvent être résolus par un raisonnement mathématique. Ce raisonnement rigoureux élargit nos connaissances et donne le moyen de passer d'un énoncé à un autre, et rend possible des expériences et des connaissances nouvelles[117].

Les mathématiques permettent de construire des modèles en physique, ils font également partie du langage naturel des physiciens. Ils offrent à ce langage ou à ce modèle scientifique *l'objectivité* qui stipule que la réalité ne correspond pas nécessairement à la manière dont nous la percevons, et *l'intelligibilité* qui précise que la réalité est compréhensible dans la mesure où l'on recherche des relations déterminées entre les faits, ainsi que *la rationalité*, qui énonce que les relations entre les faits peuvent s'exprimer de manière cohérente par un raisonnement structuré suivant des règles logiques[118].

Depuis le 19ème siècle, les mathématiques sont devenues l'un des éléments fondamentaux de beaucoup de progrès en physique. Depuis lors, la nécessité d'exprimer les lois de la physique en termes mathématiques est devenue dominante dans la pensée physique, autrement dit, on ne peut pas penser la physique sans passer par les mathématiques. En effet notre langage est devenu imprécis, lourd ou même impossible d'exprimer en mot les lois fondamentales de la physique telles que : les équations de Maxwell, de Boltzmann ou de Schrödinger, les relations de Heisenberg ou les formules de Newton ou d'Einstein.

De toute évidence, ces influences mathématiques peuvent se révéler d'une importance capitale mais avec le temps l'énoncé des lois de la physique devient impossible sans le moindre recours aux mathématiques. Cet usage abusif des mathématiques rend les concepts de la physique plus abstraits, difficiles par conséquent plus compliqués au fur et à mesure que nous avançons.[119]

117 Feynman, Richard (1980) : La nature de la physique. Paris : Le seuil.

118 Gilles Willett (1996) : Paradigme, théorie, modèle, schéma : qu'est-ce donc ? Communication et organisation Vol 10.

119 Feynman, Richard (1980) : La nature de la physique, p.40. Paris : Le seuil.

IV.4. Théorie et modèle

D'une façon globale, on peut dire que les théories scientifiques (expliquées au chapitre II) et les modèles scientifiques (expliqués au chapitre IV) sont tous deux utilisés, voir essentiel, dans toutes les branches de la science. Cependant, la communauté scientifique ne s'entend toutefois pas sur la délimitation du concept de "théorie scientifique" et celui de "modèle scientifique", car la distinction entre les deux n'est pas toujours très claire.

Notons qu'actuellement les scientifiques considèrent sérieusement la distinction entre modèle et théorie[120]. Par ces arguments, nous résumons les différences entre les deux concepts :

- Les théories sont plus générales que les modèles, elles interviennent à un niveau supérieur plus englobant[121].
- Un modèle est une représentation logico-mathématique d'un ensemble limité de phénomènes dans des conditions soigneusement définies ; une théorie scientifique s'applique à un ensemble beaucoup plus vaste de phénomènes[122].
- Le vocable "théorie" est donné à un ensemble de modèles, considérés comme des outils efficaces, reliés par des relations logiques et expérimentales qui assurent une certaine cohérence à l'ensemble.
- Un modèle est développé dans le prolongement d'une théorie, il est plus limité dans les situations auxquels il fait référence et son domaine d'application est plus réduit que la théorie dont il est issu.
- Un modèle est construit pour représenter un phénomène et reste explicitement lié aux choix d'un auteur[123]. Un modèle est directement en rapport avec la situation à étudier, son élaboration se fait en fonction de la question posée, il découle d'une théorie, et apparaît comme une partie concrète ou une composante "opératoire" de cette théorie.
- Dans la pratique scientifique, des théories différentes peuvent exploiter un même modèle de manière différente, et une même théorie peut s'appuyer sur deux modèles distincts voire incompatibles entre eux.

120 Barberousse, A. (2000), *Les modèles comme fictions*, revue Philosophie n°68, pp. 16-43

121 Soler, Léna (2000) : Introduction à l'épistémologie, Paris :Ellipses.

122 Marchive, A. (2003) : La modélisation dans la formation des enseignants : De la leçon modèle au modèle de la leçon. Recherche et Formation N° 42.

123 Stengers, I. (1993) : L'invention des sciences modernes. Paris: La Découverte.

Références bibliographiques

ALAIN, Rey (2005) : Dictionnaire Culturel de la Langue Française, 9648p. Paris : Le Robert.

AL-GHAZALI, Abû Ḥamid (1981). معارج القدس في مدارج معرفة النفس, Échelons de la sainteté dans les degrés de la connaissance de l'âme. Bayrût : Dar al Afak al Jadida.

AL-GHAZALI, Abû Ḥamid (1983): معيار العلم في فن المنطق, Critère de la connaissance dans l'art de la logique, pp29-30, Bayrût : Dar El Andalous.

AL-GHAZALI, Abû Ḥamid (1986). مشكاة الأنوار, Le Tabernacle des Lumières. Bayrût : Alam el kotob.

AL-JURJĀNĪ, 'Alī ibn Muḥammad (2004) : كتاب التعريفات. Le Livre des Définitions. Traduction M.S. Manchaoui, pp 168 , Cair : Dar al-Fadhila.

AVICENNA (1988) : Psychology of ibn Sina According to His Work الشفاء. Arabic text. Paris : Patrimoine Arabe et Islamique

BENAC, Henri (1956-1982) : Le Dictionnaire des synonymes. Paris : Hachette.

BERGSON, H. (1911) : Matter and Memory: An Essay on the Relation of the Body to the Mind. Translated by Nancy Margaret Paul and W. Scott Palmer. London : George Allen and Unwin.

BUNGE, M. (1975) : Philosophie de la physique. Paris : Seuil.

CARNAP, Rudolf (1932) : Le dépassement de la métaphysique, dans Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits, trad. collective sous la direction d'Antonia Soulez, p. 172, Paris : PUF.

COHEN-TANNOUDJI, G., SACQUIN, Y. (1999) : Symétrie et brisure de symétrie. Paris : EDP Sciences.

COLLINS (2017) : The Collins English Dictionary. https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/model

EINSTEIN, Albert (1979) : Comment je vois le monde, p168-169 & p.171-176, Paris : Flammarion.

FEYNMAN, R. (1965) : The Feynman Lectures on Physics. California Institute of Technology.

FEYNMAN, Richard, INFELD, Leopold (1983) : L'évolution des idées en physique, p.117, Paris : Flammarion

FEYNMAN, Richard (1980) : La nature de la physique. Paris: Le seuil.

FEYNMAN, Richard (1979) : Le cours de physique de Feynman, mécanique1. p.150, Paris : InterEditions

GALILEO, Galilei (1980) : Il Saggiatore; traduction française de Christiane Chauviré, L'Essayeur, Paris : Les Belles-Lettres.

HACHETTE, (2008) : Dictionnaire Hachette éd 2008, 1812p, Paris : Hachette Livre.

HEISENBERG, Werner (2000) : La nature dans la physique contemporaine, p.67, Paris : Gallimard Folio Essais.

HULIN, Michel (1987) : La physique ou l'enseignement impossible, séminaire de philosophie et mathématiques, juin 1987, fascicule 11, PP 1-30 consulté le 10 Aout 2018 < http://www.numdam.org/item?id=SPHM_1987___11_A1_0>

IBN KHALDUN, A. (1967) : المقدمة: An Introduction to History. Translated from the arabic by franz Rosenthal New York : Bollingen serie Inc.

JAULIN, Bernard (2004) : Modèle, Encyclopædia Universalis, V. 08, Paris : Collection blanche.

KUHN, T.S. (1962) : The Structure of Scientific Revolutions, Chicago: University of Chicago Press.

LAROUSSE, (2016) : Le grand Larousse illustré, 2106p, Paris : Larousse.

LOCKE, J. (2000) : An essay concerning human understanding. in focus / edited by Gary Fuller, Robert Stecker, and John P. Wright.

MACMILLAN DICTIONARY (2017) : Free English Dictionary <https://www.macmillandictionary.com/dictionary/british/model_1>

MAITTE, B. (2015) : Une histoire de la lumière : De Platon au photon. Paris : Seuil.

NOËL, Mouloud (2004) : Modèle, Encyclopædia Universalis, V. 08, Paris : Collection blanche.

NOUVEL, Pascal (2002) : Enquête sur le concept de modèle. Paris : PUF.

OLDACHE, Mustapha (2014) : Problématique de la relation entre le perçu et le réel en physique moderne et son impact sur l'enseignement. Alger : Thèse de Doctorat, ENS/Kouba, Dpt. Physique.

POINCARE, Henri (1907) : La théorie de Maxwell et les oscillations Hertziennes, Scientia, nouvembre 1907 3ème édition p.14. Paris Librairie Gauthier-Villard

POINCARE, Henri (1911) : La Valeur de la Science, p141, Paris : Flammarion.

QUINE, W. V. O. (2015) : Word and Object. New edition, with a foreword by Patricia Churchland, Cambridge Mass. : MIT Press.

REY-DEBOVE, Josette (2000) : Le Robert méthodique, dictionnaire d'apprentissage méthodique du français actuel, Paris : Nouv. éd. rev. et corr.

SAGAUT, Pierre (2008) : Introduction à la pensée scientifique moderne, p. 34-37, Paris 6 : Université Pierre et Marie Curie.

SANCHEZ, E., PRIEUR, M. & DEVALLOIS, D. (2004) : Fonder la formation sur

SOLER, Léna (2000) : Introduction à l'épistémologie, Paris :Ellipses.

SOLER, Léna (2013) : Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie. Spirale - Revue de recherches en éducation 52 pp. 177-214.

TANNOUDJI, Cohen Gilles (2002) : La notion de modèle en physique théorique, dans Enquête sur le concept de modèle / sous la direction de P. Nouvel, p. 29-42, Paris : Presses universitaires de France.

THOM, René (1993) : Prédire n'est pas expliquer, entretiens avec Émile Noël. Paris : Flammarion.

THOM, René (1984) : La Science malgré tout, p.74, Encyclopédia Universalis, Paris : Collection blanche.

TIRY, G. (1994) : Connaître le réel mythe ou réalité. Lyon : Chronique sociale.