



HAL
open science

La structure des expériences de pensée scientifiques

Rawad El Skaf

► **To cite this version:**

Rawad El Skaf. La structure des expériences de pensée scientifiques. Philosophie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2016. Français. NNT : 2016PA01H232 . tel-02529048

HAL Id: tel-02529048

<https://theses.hal.science/tel-02529048>

Submitted on 2 Apr 2020

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

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

Université Paris I Panthéon-Sorbonne
U.F.R. de Philosophie



THÈSE

Présenté et soutenu publiquement le jeudi 7 juillet 2016

Par

Rawad El Skaf

en vue de l'obtention du grade de
docteur en Philosophie de l'Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne

**LA STRUCTURE DES EXPÉRIENCES DE
PENSÉE SCIENTIFIQUES**

Sous la direction de Maximillian Kistler; Professeur à l'université Paris I
Co-directrice Anouk Barberousse; Professeur à l'université Paris IV

Jury :

Mme. Anouk Barberousse

M. Denis Forest

M. Jean Mosconi

M. John D. Norton

M. Maximillian Kistler

M. Sébastien Gandon

Professeur à l'université Paris IV

Professeur à l'université Paris Ouest-Nanterre

Professeur émérite à l'Université Paris I

Distinguished Professor, University of Pittsburgh

Professeur à l'université Paris I

Professeur à l'université Blaise Pascal

**LA STRUCTURE DES EXPÉRIENCES DE
PENSÉE SCIENTIFIQUES**

Rawad El Skaf

Résumé :

Notre thèse en philosophie porte sur les expériences de pensée scientifiques (EP) et est divisée en trois parties :

Dans la première partie, nous examinerons sept EP : La tour de Pise de Galilée, le démon de Maxwell, la boîte à photons d'Einstein (et la réponse de Bohr), le chat de Schrödinger, l'ascenseur d'Einstein, les jumeaux de Langevin et le canon de Newton. On s'appuiera principalement sur les textes originaux de leurs auteurs pour ne faire émerger que l'utilisation faite par chaque scientifique de son EP, c'est-à-dire la fonction qu'a eue chaque EP pour son auteur, et donc sa conclusion principale. Nous proposons alors une classification basée sur deux fonctions : réfutatoire et exploratoire

Dans la deuxième partie, nous examinerons le débat épistémologique actuel sur les EP, notamment entre John D. Norton et James Robert Brown. Ce débat tourne autour de l'analyse par Brown de l'EP de la tour de Pise de Galilée. Nous retracerons alors l'histoire de cette dernière et nous montrerons sa vraie fonction pour Galilée. Cette analyse historique nous permettra de critiquer l'approche de Brown et de souligner quelques problèmes posés par l'approche de Norton.

Dans la troisième partie, nous exposerons les autres approches épistémologiques des EP qu'on rencontre dans ce débat. Nous montrerons qu'elles sont insatisfaisantes car trop restrictives sur la notion de possibilité admise dans les scénarios des EP. Nous proposerons et défendrons alors une nouvelle approche des EP, qui prend en compte les différentes notions de possibilité et sera fondée sur une structure générale, qui permet d'évaluer les EP en tant qu'outil scientifique autonome, en offrant une méthode de justification propre.

English Abstract :

In this philosophy dissertation we will analyze scientific thought experiments (TE). It is divided into three parts:

In Part I, we examine seven TE : Galileo's Pisa tower, Maxwell's demon, Einstein's photon box (and Bohr's reply), Schrödinger's cat, Einstein's elevator, Langevin twins and Newton's canon ball. We will mainly rely on each author's original text to show the use made of each TE by each scientist. That is we aim to show the function of each TE. We will propose a classification based on two functions: refutational and exploratory.

In Part II, we examine the current epistemic debate on TE, mainly opposing John D. Norton and James Robert Brown. This debate revolves around Brown's analysis of Galileo Pisa tower TE. We will thus retrace the history of this TE to show its true function for Galileo. This will lead us to refute Brown's approach and underline some problems in Norton's.

In Part III, we briefly examine the other approaches in this debate and show that their accounts are too restrictive, especially on the notion of possibility admitted in a successful scientific TE. We will thus analyze the different notions of possibility we find in the scenarios of TE. This will lead us to propose a novel non-reductive approach to scientific TE, which takes into account these different notions of possibility, and is based on a common general structure, capable of evaluating TE as an autonomous scientific tool by offering a proper justificatory method.

*À Julie, pour sa patience,
À Sarah, à son avenir,
À Marwan, à sa mémoire,
Aux trois, pour leur Amour!*

Table de Matières

Remerciements	11
Chapitre 1 Introduction générale	13
Partie I : Une classification fonctionnelle	19
Chapitre 2 : La réfutation	19
Chapitre 3 : L'exploration théorique	20
Partie II : Le débat épistémologique autour de la tour de Pise	20
Chapitre 4 : Le débat épistémologique sur les expériences de pensée	21
Chapitre 5 : La tour de Pise : à la recherche de la cause des différences de vitesse de chute libre	22
Partie III : Une nouvelle approche des expériences de pensée scientifiques	23
Chapitre 6 : Quelle notion de possibilité doit-elle être utilisée pour analyser les expériences de pensée ?	23
Chapitre 7 : La structure des expériences de pensée scientifiques	25
Partie I Une classification fonctionnelle	27
Chapitre 2 La réfutation	37
2.1 Introduction	37
2.2 La tour de Pise de Galilée	38
2.2.1 La discussion sur l'existence du vide : la théorie d'Aristote	39
2.2.2 L'expérience de pensée de la tour de Pise	41
2.2.3 Le rôle de la résistance du milieu : une autre fonction pour l'expérience de pensée de la tour de Pise ?	42
2.2.4 Conclusion	46
2.3 La boîte à photon d'Einstein et de Bohr	47
2.4 Le Chat de Schrödinger	53
2.5 Conclusion	57
Chapitre 3 L'Exploration théorique	59
3.1 Introduction	59
3.2 Le Démon de Maxwell	60
3.2.1 Le contexte historique : La thermodynamique rencontre la théorie cinétique	62
3.2.2 L'expérience de pensée	65
3.2.3 Interprétation dynamique et statistique	68
3.2.4 Conclusion: la fonction d'exploration théorique du démon de Maxwell	72
3.3 Le boulet de canon de Newton	73
3.4 Les jumeaux de Langevin	78
3.5 L'ascenseur d'Einstein	82
3.6 Conclusion	90

Partie II Le débat épistémologique autour de la tour de Pise **91**

Chapitre 4 Le débat épistémologique sur les expériences de pensée	97
4.1 Introduction	97
4.2 La question épistémologique	98
4.3 James Robert Brown : une approche platonicienne	100
4.3.1 Un cadre réaliste	101
4.3.2 Une approche platonicienne des expériences de pensée	103
4.3.3 La tour de Pise : une expérience de pensée platonicienne	105
4.4 John D. Norton : une approche empiriste	106
4.4.1 Les expériences de pensée comme des arguments logiques	107
4.4.2 L'EP-argument de la tour de Pise	113
4.4.3 L'argument sans particulier de la tour de Pise	116
4.5 Conclusion	119

Chapitre 5 La tour de Pise : à la recherche de la cause de la différence de vitesse de chute libre **123**

5.1 Introduction	123
5.2 Le De Motu	126
5.2.1 L'argument par analogie en trois étapes	131
5.2.2 La tour de Pise dans le De Motu	133
5.2.3 Extrapolation de la théorie restreinte de la vitesse de chute dans le De Motu	137
5.2.4 Conclusion	141
5.3 Les Discours	143
5.3.1 Extrapolation de la théorie générale de la vitesse de chute dans les Discours	144
5.3.1.1 Poids spécifique et résistance du milieu	148
5.3.1.2 Expériences réelles avec des pendules	153
5.3.2 Conclusion	155
5.4 Le rôle des particuliers dans la tour de Pise	155
5.4.1 L'effet de la résistance du milieu sur les différentes surfaces des mobiles	157
5.4.2 L'idéalisation du milieu	159
5.5 Une expérience de pensée, deux lois de la nature	164
5.6 Conclusion	167

Partie III Une nouvelle approche des expériences de pensée scientifiques **175**

Chapitre 6 Quelle notion de possibilité doit-elle être utilisée pour analyser les expériences de pensée ?	181
6.1 Introduction	181
6.2 Possibilité nomologique du scénario	183
6.2.1 Scénario nomologiquement possible	183
6.2.2 Scénario dont la possibilité nomologique reste indéterminée	187
6.3 Le démon et l'horloge	188
6.3.1 La notion de possibilité impliquée dans le scénario du démon de Maxwell	188
6.3.2 L'impossibilité nomologique des démons mécaniques	191
6.3.2.1 La trappe de Smoluchowski	192

6.3.2.2	La roue à rochet et le cliquet de Feynman	194
6.3.2.3	Conclusion	196
6.3.3	La réponse de Bohr : L'impossibilité nomologique du scénario de la boîte à photon d'Einstein	198
6.4	La dynamique de l'évolution des expériences de pensée	199
6.5	Conclusion	201
Chapitre 7	La structure des expériences de pensée scientifiques	205
7.1	Introduction	205
7.2	La structure générale des expériences de pensée	206
7.3	Du RS à la CEP : Les cas d'étude	209
7.4	Justification des CEP	211
7.4.1	Scénarios nomologiquement possibles	212
7.4.2	Scénarios qui ne sont pas nomologiquement possibles	215
7.5	L'identité des expériences de pensée	218
7.5.1	Débat sur l'identité des expériences de pensée autour de la boîte à photons	219
7.5.2	Une expérience de pensée, deux scénarios	221
7.6	Les interprétations et l'évolution de la boîte à photons	223
7.6.1	EPR et L'argument d'incomplétude d'Einstein	225
7.6.2	La boîte à photons contre la complétude	229
7.6.2.1	La structure de l'EP de la boîte à photons contre la complétude	233
7.6.2.2	La réponse de Bohr sur la boîte à photons contre la complétude	233
7.6.3	ETP : une boîte à photons différente	235
7.6.3.1	La structure d'ETP	237
7.6.3.2	Similarités et différences entre ces boîtes à photon	238
7.6.4	La double fonction des expériences de pensée contre la complétude : réfutatoire, puis exploratoire	240
7.6.5	Conclusion	242
7.7	Conclusion	243
Conclusion		253
Bibliographie		257

Remerciements

Ce travail s'est étalé une décennie durant, interrompu dans sa troisième année par les aléas de la vie. Il s'est effectué, depuis sa conception, sous la direction d'Anouk Barberousse, à qui je lui dois, entre autre, son achèvement. Elle m'a soutenue pendant toute cette période sans aucune hésitation, m'a encouragé à prendre, et puis à reprendre à bras le corps mon sujet. Elle a cru en moi, même, ou plutôt surtout quand moi je n'y croyais plus. Son encadrement fut précieux, tant sur le fond et la forme que sur la durée. Ce travail s'est même poursuivi à distance, ce qui n'était certainement pas facile. Je la remercie pour tout le temps qu'elle a dû me consacrer durant toutes ces années.

J'ai eu la chance d'avoir en fait deux autres directeurs de thèse, que je souhaite tout autant remercier. Jean Mosconi a été la première personne que j'ai rencontrée au moment où je me suis intéressé, suite à mes études scientifiques, au sujet de la philosophie des sciences. Sans son sens du détail, ce travail n'aurait certainement pas eu cette forme, surtout dans la rédaction en langue française. Max Kistler, qui a accepté de reprendre la direction de cette thèse dans sa dernière année, ce qui a largement facilité son achèvement et sa soutenance au sein de Paris 1.

Je remercie également les institutions qui m'ont financé : L'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, dans laquelle je fus allocataire de recherche, et la fondation des Treilles, qui a financé ma quatrième année.

Tout au long de cette décennie, l'IHPST a été le lieu où je me ressourçais. J'ai tout d'abord découvert la philosophie des sciences dans ses locaux et ses séminaires. C'est dans cet institut que j'ai fait mes premiers pas, tâtonnant, sur des sujets qui m'étaient complètement inconnus. J'ai eu la chance de travailler avec des chercheurs et des doctorants de tout horizon. Je souhaite ici remercier toute son équipe de direction. J'ai eu aussi l'honneur, et la chance, d'organiser un séminaire international en son sein, avec le soutien inconditionnel d'Anouk. Je souhaite remercier en particulier Paul Humphreys, John D. Norton et Anouk qui ont accepté d'être membres de son comité scientifique, au côté d'un jeune doctorant. Aussi, je souhaite remercier Guido Bacciagaluppi ; sans son encadrement de mon DEA et son soutien, ce travail n'aurait peut-être pas vu le jour.

Une mention pour tous les doctorants de l'IHPST, qui ont partagé avec moi toutes ces années de thèse, Cyrille, Marion, Isabelle, Jindřich, Arancha, et tant d'autres. Pour la plupart, leurs années de doctorant sont loin derrière eux.

Enfin, je souhaite particulièrement remercier John D. Norton, avec qui j'ai eu une correspondance depuis mon projet de DEA, avant même la conception de ce travail. Notre correspondance s'est développée suite à plusieurs rencontres. Nos débats ce sont toujours étalées, ce qui m'a permis de bénéficier de sa conception de la philosophie, de ses conseils et de ses critiques. Je souhaite particulièrement souligner son influence sur la dernière partie de cette thèse.

Je tiens pour finir à présenter mes excuses à tous mes proches, en particulier à ceux qui ne sont plus avec nous et à ceux qui viennent de voir le jour durant l'achèvement de cette thèse. Ce travail leur est avant tout dédié.

Chapitre 1

Introduction générale

On trouve les expériences de pensée dans différentes disciplines intellectuelles, de la physique à la métaphysique, de l'éthique à la science politique, des mathématiques à la biologie. L'objet de cette thèse est plus spécifique ; nous analyserons les expériences de pensée scientifiques, en particulier dans le domaine de la physique¹.

Notre démarche philosophique est orientée vers les sciences et leur histoire, au sens où notre but est bien de répondre à des questions d'ordre épistémologique : nous chercherons à analyser le pouvoir épistémique des expériences de pensée, c'est-à-dire que nous chercherons à savoir si elles peuvent fournir des connaissances nouvelles sans consulter la nature, quelle est la nature de ces connaissances et si leurs conclusions sont justifiées ou justifiables. Nous nous poserons ces questions en partant de l'analyse historique de plusieurs cas en physique, en les situant dans leur contexte scientifique.

Nous partirons donc de l'analyse de cas d'expériences de pensée tout au long de la thèse. Dans un premier temps, nous examinerons sept expériences de pensée selon leur fonction « réfutatoire » ou « exploratoire » (*cf.* partie I) : la tour de Pise de Galilée, le démon de Maxwell, la boîte à photon d'Einstein (et la réponse de Bohr), le chat de Schrödinger, l'ascenseur d'Einstein, les jumeaux de Langevin et le canon de Newton. On s'appuiera principalement sur les textes originaux pour ne faire émerger que l'utilisation que chaque scientifique a fait de son expérience de pensée, c'est-à-dire pour étudier la fonction qu'a eue chaque expérience de pensée pour son auteur, fonction exprimée dans la conclusion de l'expérience de pensée.

Dans un deuxième temps, nous pousserons notre analyse historique des trois premiers cas d'étude, et ce dans un double but, critique et constructif : nous critiquerons à la fois d'autres fonctions attribuées à ces expériences de pensée et certaines de leurs analyses épistémologiques.

¹ Dans cette thèse nous laisserons tomber le qualificatif « scientifique » ou « physique », mais elle est bien limitée à ce domaine.

Cela nous permettra de proposer une nouvelle approche épistémologique des expériences de pensée. Elle s'appuiera sur la proposition d'une structure générale et identifiante, capable de montrer comment chaque expérience de pensée arrive à sa conclusion et comment elle la justifie, ou échoue à la justifier.

Comme l'évolution de notre argumentation s'appuie sur les cas qui ont été mentionnés, qui sont en quelque sorte les fils conducteurs de notre argumentation générale, commençons par exposer un petit résumé de ces trois premières expériences de pensée :

1- La tour de Pise de Galilée :

C'est l'expérience de pensée publiée en 1638 dans *Les Discours* (cf. 2.2). Galilée imagine la chute libre de deux mobiles de même matière, l'un lourd et l'autre léger, dans un milieu plein, comme l'air. Puis il imagine qu'on les relie durant leur chute. Comme le mobile lourd est plus rapide que le mobile léger selon le premier principe de la théorie d'Aristote, qui affirme la proportionnalité de la vitesse de chute d'un mobile et de son poids absolu. Galilée déduit, de l'application de ce principe, que le composé, qui est plus lourd que le mobile le plus léger, doit chuter avec une vitesse plus grande que ce dernier. En outre, comme la vitesse lente du mobile léger va retarder la vitesse rapide du mobile lourd, alors la vitesse du composé se trouve aussi, selon le même principe d'Aristote, quelque part entre la vitesse de ces deux mobiles, c'est-à-dire que le principe d'Aristote permet aussi de déduire que la vitesse du composé doit être plus petite que la vitesse du mobile le plus lourd. Galilée arrive alors au résultat absurde suivant : le composé chute à la fois plus rapidement et plus lentement que le mobile le plus léger. Il conclut que le premier principe de la théorie d'Aristote est faux.

Cette expérience de pensée avait été également utilisée par Galilée quatre décennies auparavant, dans le *De Motu* en 1590 (cf. chapitre 5), dans le même but de réfuter le premier principe d'Aristote. La différence entre ces deux occurrences est qu'en 1590 Galilée cherche à montrer, suite à cette réfutation, et avec une analogie archimédienne, que le poids spécifique cause une différence dans la vitesse de chute des mobiles dans le plein, *et aussi dans le vide*, alors qu'en 1638 Galilée soutiendra, suite à une stratégie argumentative complexe, sa théorie sur l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les mobiles dans le *vide*.

2- La boîte à photon d'Einstein :

C'est l'expérience de pensée présentée par Einstein contre la cohérence de la mécanique quantique

lors d'une discussion informelle durant le sixième congrès de Solvay en 1930. Cette version fut rapportée par Bohr en 1949 (cf. 2.3). C'est ce qu'on appelle aujourd'hui l'interprétation de l'expérience de la boîte à photon *contre la cohérence de la mécanique quantique*, par opposition à l'autre interprétation, contre la *complétude de la mécanique quantique* (cf. 7.6). Selon Bohr, Einstein imagine une boîte rempli de photons qui permet de laisser sortir un photon par un obturateur actionné par une horloge. Einstein cherche ensuite à montrer qu'en pesant la boîte, avant et après le départ du photon, on peut calculer sa masse et donc son énergie (en faisant usage de sa formule de $E = mc^2$). Comme l'horloge nous donne aussi le temps de passage du photon, Einstein arrive au résultat suivant : on peut en principe déterminer simultanément le temps de passage du photon et son énergie avec une précision arbitraire, en effectuant des mesures sur la boîte. Comme ce résultat est en contradiction avec le principe d'indétermination de Heisenberg, Einstein conclut que la mécanique quantique est contradictoire.

La réponse de Bohr, qu'il lui apporte le lendemain, consiste à rejeter le résultat d'Einstein, en montrant que c'est impossible de mesurer simultanément le temps de passage du photon et de peser la boîte avec une précision arbitraire. Bohr précise la procédure de pesée et montre qu'elle implique que la boîte à photon doit se déplacer dans un champ gravitationnel. Cela implique, selon la théorie de la relativité d'Einstein, qu'on aura une indétermination de la mesure du temps, produite par le déplacement de l'horloge dans ce champ gravitationnel. Bohr calcule par la suite que cette indétermination est en accord avec le principe d'indétermination de Heisenberg. Il rejette ainsi la conclusion de l'expérience de pensée d'Einstein.

3- Le démon de Maxwell :

C'est l'expérience de pensée parue en 1871 dans *La Chaleur* pour « explorer » la nature de la deuxième loi de la thermodynamique (cf. 3.2). Maxwell imagine un démon, « un petit être habile des doigts et très observateur », capable de discerner la vitesse de chaque molécule et d'ouvrir une porte qui divise un récipient rempli d'un gaz en équilibre thermique, en deux portions A et B. Ce démon laisse passer les molécules lentes de B vers A et les molécules rapides de A vers B. Maxwell obtient alors le résultat suivant : les molécules lentes sont dans A alors que les molécules rapides sont dans B. Ainsi, ce démon élève la température de B et abaisse celle de A sans dépenser aucun travail, ce qui entre en contradiction avec la deuxième loi de la thermodynamique. Maxwell conclut de son expérience de pensée que cette dernière doit être de nature statistique.

À ce stade, même avec ces petits résumés, nous pouvons déjà nous permettre de souligner trois

points essentiels, qui vont nous guider tout au long de notre thèse : le premier sur la fonction des expériences de pensée, le second sur leur forme et le troisième sur notre méthodologie.

Premièrement, les deux premières expériences de pensée sont réfutatoires tandis que celle de Maxwell est plutôt exploratoire, au sens où Maxwell se contenta d'affirmer la nature statistique de la deuxième loi, sans chercher à lui donner sa forme statistique, chose qui reste un thème de discussion actif dans la littérature sur les fondements de la mécanique statistique. Néanmoins, la différence entre ces deux fonctions est subtile, car comme on le verra, Maxwell, en affirmant la nature statistique de la deuxième loi rejette la nature, ou l'interprétation, dynamique de cette même loi. Galilée, en réfutant le premier principe de la théorie d'Aristote avec son expérience de pensée, et donc en rejetant le poids absolu comme cause de la différence des vitesses des mobiles, explore ensuite les différentes causes d'une différence potentielle des vitesses de chute de tous les mobiles, dans le plein et dans le vide en 1590, à l'aide d'autres arguments et d'expériences réelles sur des pendules. La différence entre les fonctions des expériences de pensée est située dans la conclusion principale soutenue par l'auteur d'une expérience de pensée et dans la conclusion que l'expérience de pensée permet de fournir et justifier, *à elle seule*.

Deuxièmement, dans les deux premières expériences de pensée, celles de Galilée et d'Einstein, le scientifique imagine des scénarios *nomologiquement possibles* (cf. chapitre 6) : ce sont des scénarios possibles au sein de certaines théories, lois et principes.

Ceci, comme on le verra, est particulièrement clair dans la réponse de Bohr à Einstein : il rejette précisément la possibilité nomologique du scénario qu'Einstein lui avait présenté la veille. Ce faisant, Bohr précise les processus de mesure impliqués dans le scénario d'Einstein, dans le but de rejeter le résultat du scénario de l'expérience de pensée, selon lequel on peut en principe déterminer simultanément le temps de passage du photon et son énergie avec une précision arbitraire. Bohr rejette donc aussi la conclusion de l'expérience de pensée d'Einstein, selon laquelle la mécanique quantique est contradictoire.

Ce cas d'étude nous amènera naturellement à nous poser la question de la possibilité du démon de Maxwell. Cette question est d'autant plus pressante que la littérature du XX^e siècle est riche de différents exemples d'expériences de pensée qui prétendent montrer qu'un certain mécanisme, mécanique (cf. 6.3.2) ou computationnel (ou intelligent), ne peut pas effectivement séparer les molécules lentes des rapides. Ainsi la question se pose de savoir si ces expériences de

pensée sont capables de rejeter l'expérience de pensée de Maxwell et sa conclusion, de la même façon que Bohr a rejeté celle d'Einstein. Et si ce n'est pas le cas, pourquoi ?

Nous analyserons la notion de possibilité présente dans l'expérience de pensée du démon de Maxwell et nous poserons la question de savoir si Maxwell a conçu son démon comme un mécanisme nomologiquement possible. En regardant de près le sens de la conclusion de cette expérience de pensée portant sur la nature statistique de la deuxième loi de la thermodynamique, on comprendra que ce n'est pas la même notion de possibilité qu'on trouve chez Maxwell et chez Galilée ou chez Einstein/Bohr. On peut aisément voir la différence grâce aux deux questions suivantes.

Si le démon s'avère nomologiquement possible, ou est supposé être nomologiquement possible, que peut-on sauver de la deuxième loi de la thermodynamique ? Si on peut réaliser, même en principe, un mécanisme qui fait passer les molécules lentes d'un côté et les molécules rapides de l'autre, et donc créer un déséquilibre thermique sans dépense de travail, pourquoi ne pas rejeter complètement la deuxième loi ? Si un tel démon est supposé nomologiquement possible dans cette expérience de pensée, le scientifique doit être amené à rejeter la deuxième loi au lieu de conclure qu'elle est de nature statistique.

Si le mécanisme de séparation des molécules, le démon, s'avère nomologiquement impossible, la conclusion de Maxwell se trouve-t-elle rejetée ? La deuxième loi n'est-elle pas de nature statistique même si un démon ne peut pas séparer les molécules lentes des rapides ? On ne peut pas rejeter cette conclusion de l'expérience de pensée de Maxwell si l'on rejette la possibilité nomologique de son scénario, contrairement à ce qui est le cas dans la stratégie de Bohr face à l'expérience de pensée d'Einstein.

C'est en partant de ces questions que nous allons proposer d'introduire une nouvelle notion de possibilité en commençant par mettre en relief une subtilité dans la notion de possibilité nomologique de certains scénarios : ce sont les scénarios des expériences de pensée scientifiques *dont la possibilité nomologique reste indéterminée*. Le démon de Maxwell est un exemple canonique : ce dernier imagine un particulier fictif (un démon) et sa dynamique (il ouvre et ferme une porte) de façon qu'on obtient un processus (celui de la séparation de molécules lentes de rapides) dont la possibilité nomologique reste indéterminée.

Notons à ce stade une distinction fondamentale : nous parlons bien ici *des processus et non de leurs résultats*, c'est-à-dire, dans le cas du démon de Maxwell par exemple, qu'on évalue la possibilité nomologique du processus de séparation des molécules, et non ce à quoi ce processus

aboutit, à savoir les molécules lentes d'un côté et les rapides de l'autre. Nous analyserons aussi le résultat et sa capacité à fournir et à justifier la conclusion d'une expérience de pensée dans le dernier chapitre 7.

Troisièmement, quelques mots concernant notre méthodologie. Nous tenterons de proposer une analyse historique de ces expériences de pensée et de leur fonction. Cette analyse nous servira à critiquer les différentes approches épistémologiques des expériences de pensée que nous qualifions d'indirectes parce qu'elle réduisent les expériences de pensée à un autre outils scientifique : argument logique, cas-limite d'une expérience réelle ou modèle mental. Nous critiquerons également une approche qu'on peut qualifier de directe, mais qui attribue aux expériences de pensée d'autres fonctions que les nôtres, comme celle de révéler et de justifier une nouvelle loi de la nature. Cette approche est en outre basée sur une méthode de justification « mystérieuse », ou tout au moins ontologiquement contraignante, celle de la perception platonicienne d'entités abstraites et de lois de la nature.

Regardons un exemple qui va nous permettre de souligner l'importance d'une analyse historique et fonctionnelle. Pour ce faire, il faut revenir à la tour de Pise de Galilée. Notre analyse historique (*cf.* chapitre 5) montre que Galilée l'avait utilisée pour rejeter la thèse d'Aristote selon laquelle le poids absolu peut causer une différence de vitesse de chute. Néanmoins, Galilée ne pouvait pas se prononcer, suite à son son expérience de pensée, sur la question de savoir s'il existe d'autres facteurs qui peuvent causer une différence dans les vitesses de chute de *tous* les mobiles dans un milieu donnée, ou même dans le vide, et surtout sur la question de savoir si le poids spécifique, et donc la matière des mobiles, cause une différence dans le vide ou non. Durant les quatre décennies qui suivent sa première utilisation de l'expérience de pensée, Galilée a cherché ces causes éventuelles.

En 1590 et en 1638, Galilée parvient à deux conclusions différentes : il conclut d'abord que le poids spécifique cause une différence dans les vitesses de chute dans le vide, alors qu'ensuite il réfute cette conclusion et soutient qu'il n'y a aucune cause à cette différence, et que donc tous les mobiles chutent à même vitesse dans le vide. Cependant, cette conclusion n'est pas due à l'expérience de pensée *à elle seule*. En fait, juste après son expérience de pensée, Galilée propose deux stratégies argumentatives différentes, qui aboutissent à l'une ou à l'autre conclusion. En 1638, Galilée entreprend une argumentation assez complexe, qui se prolonge sur une trentaines de pages, où il considère chaque facteur qui peut influencer la vitesse de chute, afin de les rejeter une après l'autre et d'arriver à sa conclusion sur l'égalité de la vitesse de chute de tous les mobiles dans le

vide. Plusieurs philosophes, en particulier James Robert Brown, attribuent cette conclusion à l'expérience de pensée de Galilée (*cf.* chapitre 4).

Enfin, notre analyse historique et fonctionnelle de plusieurs cas d'étude nous permet aussi de proposer notre propre approche des expériences de pensée (*cf.* chapitre 7), et par la suite de la confronter aux cas d'études et aux débats qu'ils suscitent, notamment celui sur l'identité des expériences de pensée. Ce débat porte sur la question de savoir si et comment certains changements dans le scénario d'une expérience de pensée ont pour effet de créer de nouvelles expériences de pensée.

Passons à présent à la structure de notre thèse ; elle sera divisée en trois grande parties, chacune de deux chapitres.

Partie I : Une classification fonctionnelle

Dans cette partie nous proposerons une classification des expériences de pensée selon leur deux fonctions : *la réfutation* et *l'exploration théorique*.

La fonction d'une expérience de pensée doit être comprise par rapport au but que l'expérimentateur en pensée vise à atteindre lorsqu'il utilise son expérience de pensée, que ce but soit atteint ou non. Savoir si une expérience de pensée mène, ou peut mener, à ce but est une question d'ordre épistémologique qu'on traitera dans les parties II et III de cette thèse. Bien que cette classification fonctionnelle ne soit pas la seule possible, *celle-ci vise à être indépendante d'une quelconque approche épistémologique sur les expériences de pensée*.

Chapitre 2 : La réfutation

Certaines expériences de pensée visent à réfuter une théorie ou un principe théorique en révélant une absurdité ou une contradiction. Cette notion de réfutation doit être comprise au sens large du terme afin d'englober les expériences de pensée qui ne visent pas uniquement à réfuter une théorie, en montrant une inconsistance interne par exemple, mais aussi les expériences de pensée qui visent à soulever certains problèmes au sein d'une théorie, sans pour autant la rejeter complètement.

Dans certains cas, suite au déroulement (*'unfolding'* en anglais) du *scénario* de l'expérience de pensée, on est amené à un résultat jugé absurde, ou à une contradiction. Le scientifique peut alors argumenter contre une théorie en réfutant un de ses principes. Ces expériences de pensée ne visent pas, au moins si on se limite à cette fonction, à argumenter en

faveur d'une théorie ou un aspect théorique. La fonction de réfutation d'une théorie par le biais d'expériences de pensée, au sens large du terme défini dans ce chapitre, constitue une connaissance qu'on peut qualifier de négative.

Dans ce chapitre nous analyserons trois expériences de pensée : la tour de Pise de Galilée (2.2), la boîte à photon d'Einstein et de Bohr (2.3) et le chat de Schrödinger (2.4).

Chapitre 3 : L'exploration théorique

Certaines expériences de pensée sont conçues par les scientifiques pour explorer une théorie ou un aspect théorique, comme la signification ou la portée d'un principe, d'une loi ou d'un concept. Cette exploration peut précéder la formulation bien définie et bien articulée d'une théorie ou lui succéder. L'exploration théorique constitue alors à nous fournir une connaissance qu'on peut qualifier de positive.

Même si cette fonction peut émerger suite à une réfutation (*cf.* chapitre 5), sans qu'elle soit la conclusion de l'expérience de pensée, dans ce chapitre on s'intéressera plutôt aux expériences de pensée dont la fonction principale est l'exploration, même si elles réfutent un aspect théorique au passage. Quand on est en train de faire des expériences de pensée et non pas des expériences réelles, on n'a aucune production de nouvelles données empiriques, et donc la connaissance positive est normalement produite suite à une réfutation. Si la donnée empirique est ancienne, alors il existe déjà une tentative de description théorique de cette donnée, que l'expérience de pensée va réfuter en explorant de nouvelles pistes. Cette exploration se divise alors en deux parties :

- L'exploration théorique qui précède l'articulation d'une théorie : ces expériences de pensée visent à ouvrir de nouvelles pistes théoriques. On analysera alors le démon de Maxwell (*cf.* 3.2) et l'ascenseur d'Einstein (*cf.* 3.6). Cette dernière expérience de pensée donne des arguments en faveur d'un nouveau principe, celui de l'équivalence entre la gravité et l'accélération, qui deviendra par la suite, huit ans après, un postulat de la nouvelle théorie de la gravité, la théorie de la relativité générale d'Einstein.
- L'exploration théorique qui succède à l'articulation d'une théorie : ces expériences de pensée visent à exposer une nouvelle théorie déjà bien articulée ou à exposer sa bonne application. On analysera, respectivement, le canon de Newton (*cf.* 3.4) et les jumeaux de Langevin (*cf.* 3.5).

Partie II : Le débat épistémologique autour de la tour de Pise

Dans la partie II nous examinerons la thèse selon laquelle les expériences de pensée peuvent avoir

une fonction additionnelle, celle de *révéler et justifier des lois de la nature*. Cette fonction est défendue par James Robert Brown, dans son approche épistémologique « platonicienne » des expériences de pensée. Il soutient que Galilée, grâce à son expérience de pensée, et à elle seule, *révèle et justifie* sa loi sur l'égalité des vitesses de chute de *tous* les corps *dans le vide*. À cela, John D. Norton, qui soutient une approche qu'on peut qualifier d'empiriste, répond qu'on peut réduire cette expérience de pensée à un argument déductif capable de révéler et de justifier la loi de Galilée, si on accepte ses prémisses.

Cette partie aura pour but de critiquer ces deux approches et leurs analyses respectives de l'expérience de pensée de la tour de Pise en révélant sa vraie fonction pour Galilée. Nous chercherons à montrer que cette expérience de pensée *n'est pas capable* de révéler, ni *a fortiori* de justifier, la loi de Galilée. *Elle n'était non plus utilisée par Galilée dans ce but*. Cette partie sera divisée en deux chapitres, l'un philosophique, l'autre plutôt historique (avec une conclusion philosophique de nature critique).

Chapitre 4 : Le débat épistémologique sur les expériences de pensée

Dans ce chapitre nous analyserons les deux approches épistémologiques des expériences de pensée de Brown et de Norton. L'expérience de pensée de la tour de Pise de Galilée prend une place centrale dans l'approche de Brown, qui soutient qu'elle a un pouvoir épistémique, semblable à celui conféré aux expériences cruciales, celui du choix théorique. De plus, ce choix théorique s'effectue entre une théorie réfutée par l'expérience de pensée, celle d'Aristote, et une qui est le produit de l'expérience de pensée, celle de Galilée. Brown soutient en effet que l'expérience de pensée de la tour de Pise a permis à Galilée d'établir, donc de révéler et de justifier, et ce de façon *a priori* avec l'aide d'une « perception platonicienne », sa théorie générale de l'égalité des vitesses de chute de *tous* les corps *dans le vide*.

Pour l'empirisme, au moins celui de Norton, le fait de dire quelque chose sur le monde sans aller le consulter, et donc sans nouvelle donnée empirique, ne peut être justifiable que par la logique. Restant fidèle à son empirisme, il réduit les expériences de pensée à des arguments logiques, déductifs ou inductifs. La justification de la conclusion de l'expérience de pensée se réduit ainsi à la justification de la conclusion de l'argument logique qui la remplace. Norton réduit l'expérience de pensée de la tour de Pise à un argument déductif et affirme que sa conclusion, est justifiée dans la mesure où on accepte les prémisses d'un tel argument. Dans ce chapitre on va surtout s'intéresser à la thèse générale de Norton, en particulier sur une des deux conditions qui

définissent les arguments qui remplacent les expériences de pensée, notamment celle selon laquelle les expériences de pensée sont des arguments qui « (ii) *invoquent des particuliers non pertinents pour la généralité de la conclusion* » (cf. 4.4.1). Cette condition sera augmentée d'une thèse qui dénature, ou tout au moins réduit, le rôle des « particuliers » dans les scénarios des expériences de pensée. C'est la thèse d'élimination, qui soutient que les « particuliers » des scénarios des expériences de pensée sont *éliminables* d'un argument remplaçant l'expérience de pensée et menant à la même conclusion. Par « particuliers », nous comprenons des objets (deux mobiles de la même matière, une horloge), des êtres vivants (un physicien dans un ascenseur, un chat), ou tout autre élément fictif imaginé dans les scénarios des expériences de pensée (comme un démon).

Chapitre 5 : La tour de Pise : à la recherche de la cause des différences de vitesse de chute libre

Ce chapitre sera dédié à une analyse historique plus détaillée de l'expérience de pensée de la tour de Pise présentée dans le chapitre 1, dans le but de comprendre la fonction qu'elle a eue pour Galilée, et ce durant quatre décennies.

La première apparition de cette expérience de pensée chez Galilée figure dans un manuscrit, en général daté de 1590, le *De Motu*. L'expérience de pensée est inspirée d'une autre, celle de Jean Baptiste Benedetti (1553), qui a conçu un scénario semblable avec la chute de deux briques identiques. Le jeune Galilée réfute alors la théorie d'Aristote. Par la suite Galilée argumente en faveur d'une théorie « restreinte » de la vitesse de chute, selon laquelle elle est proportionnelle aux poids spécifiques des mobiles amoindris par le poids spécifique du milieu, dans le plein, et donc *aussi dans le vide*.

On analysera dans ce chapitre les deux extrapolations, suite à la conclusion de l'expérience de pensée, des deux lois de la vitesse de chute de Galilée, en 1590 et 1639. On analysera surtout les deux stratégies argumentatives qui vont amener Galilée soit à l'une, soit à l'autre loi.

Cette analyse historique montre que l'expérience de pensée n'a eu qu'une fonction réfutatoire. *À elle seule*, elle ne peut ni révéler ni justifier aucune de ces deux lois, surtout pas la loi générale de Galilée de 1638, alors que c'est la conclusion que défend Brown. De plus, Galilée lui-même ne l'a pas utilisée pour argumenter en faveur de ces lois. Plus précisément, l'expérience de pensée a aussi une fonction d'exploration théorique indirecte, mais au sein de chaque stratégie argumentative de Galilée, dont les conclusions sont en faveur de ces lois.

Cette analyse historique souligne aussi, contrairement à Norton, le rôle des particuliers dans le scénario de l'expérience de pensée (*cf.* 5.5). Ils ont permis à Galilée de faire accepter les idéalizations nécessaires, notamment l'idéalisation consistant à faire abstraction du milieu, sans supposer l'existence du vide, surtout que cette expérience de pensée se situait dans un argument général sur l'existence du vide.

Partie III : Une nouvelle approche des expériences de pensée scientifiques

Les deux premières parties suggèrent que les expériences de pensée doivent être analysées comme des outils scientifiques autonomes (*vis-à-vis* des expériences réelles, des arguments logiques et même des simulations numériques²) et classées indépendamment de toute approche épistémologique. Mais dire cela soulève des questions typiquement philosophiques, auxquelles on tentera de répondre dans cette dernière partie : Peut-on analyser en quoi consiste cet outil et comment il fonctionne, indépendamment d'une quelconque réduction des expériences de pensée ? Chaque expérience de pensée est-elle unique, ou peut-on faire émerger une structure interne commune pour toutes, sans les réduire à un quelconque autre outil ? La classification par fonction présentée dans la partie I suffit-elle à les identifier ?

Dans cette dernière partie, également divisée en deux chapitres, nous proposerons une nouvelle approche des expériences de pensée scientifiques. Cette dernière se veut directe, c'est-à-dire fondée sur l'analyse du mécanisme interne commun des expériences de pensée, et nous permettra de répondre aux deux premières questions par la positive à et la dernière par la négative.

Chapitre 6 : Quelle notion de possibilité doit-elle être utilisée pour analyser les expériences de pensée ?

Dans ce chapitre nous allons proposer une réponse à la question posée dans le titre. Mais auparavant, la question se pose de savoir pourquoi on doit s'intéresser à la notion de possibilité impliquée dans les scénarios des expériences de pensée. La première réponse est liée à la nature de cet outil et à sa fonction : comme ce sont des expériences *de pensée* et non des expériences *réelles*

² Sur le lien entre les expériences de pensée *Cf.* Rawad El Skaf et Cyrille Imbert, *Unfolding in the empirical sciences: experiments, thought experiments and computer simulations*, *Synthese*, November 2013, Volume 190, Issue 16, pp 3451-3474

ou conçues dans le but d'une réalisation future, et comme elles ont pour fonction de nous fournir une connaissance sur le monde, la question de la notion de possibilité mise en jeu dans leur scénarios se pose naturellement. Comment peut-on lâcher deux mobiles de même nature dans un milieu dépourvu de résistance à l'époque où le pompe à air n'existait pas, et où la notion du vide était tenue pour impossible ? Peut-on, ou doit-on, mettre un chat dans une boîte et le laisser à son sort ? Ou même placer un canon sur le sommet d'une montagne haute comme plusieurs fois le rayon de la Terre ? Et enfin peut-on un jour manipuler les molécules comme le démon de Maxwell ? Doit-on même se poser cette question dans le cadre de l'expérience de pensée du démon de Maxwell ? À l'époque de Maxwell ? Et par la suite ?

Afin de répondre à ces questions, surtout celles concernant le démon de Maxwell, nous allons pousser notre analyse historique de ce cas d'étude.

Dans ce chapitre nous allons analyser une subtilité dans la notion de possibilité des scénarios des expériences de pensée. Nous commencerons par critiquer la *thèse de la possibilité nomologique*, selon laquelle le scénario d'une (bonne) expérience de pensée doit être nomologiquement possible. Cette thèse se trouve, bien que formulée différemment, dans de nombreuses approches épistémologiques des expériences de pensée, de Kuhn aux plus récentes approches expérimentales (Sorensen, Laymon) ou en termes de modèles mentaux (Nersessian).

Dans le but de critiquer ces approches et par la suite proposer la nôtre (dans le chapitre 7), nous analyserons *la notion de possibilité* impliquée dans les scénarios des expériences de pensée dans deux cas qui ont été examinés dans la partie I ; le démon de Maxwell et le débat entre Einstein et Bohr sur la boîte à photon. Dans le second cas c'est bien un scénario nomologiquement possible qui est supposé par Einstein, et ensuite critiqué par Bohr, tandis que dans le premier, la possibilité nomologique du scénario de Maxwell *reste indéterminée* au sens où que Maxwell ne nous présente pas son démon comme nomologiquement possible, et cela se traduit dans sa conclusion.

Dans notre analyse du rôle des particuliers dans l'expérience de pensée du démon de Maxwell et dans son développement au cour du XX^e siècle, l'importance des particuliers dans les scénarios des expériences de pensée est explicitement soulignée, contre la thèse d'élimination de Norton.

L'examen de ces notions de possibilité et l'évolution de ces deux cas d'études, qui incluent des changement au sein de leurs scénarios, nous permet enfin de proposer une nouvelle façon d'analyser ces expériences de pensée et leur évolution. Elle sera fondée sur l'examen de la dynamique interne des éléments du scénario d'une expériences de pensée. Cette dynamique consiste

à préciser la place des particuliers et des processus - en « arrière-plan » ou au « premier plan » - dans les scénarios. Cette place dépend essentiellement du rôle de ces éléments et de la conclusion de chaque expérience de pensée.

Chapitre 7 : La structure des expériences de pensée scientifiques

Dans ce dernier chapitre, nous proposerons et défendrons notre proposition originale pour analyser la structure des expériences de pensée scientifique. Elle est constituée de cinq étapes qui représentent le mécanisme interne commun des expériences de pensée.

Afin de répondre à une question cible, un scientifique nous amène à suivre un scénario précis. Ce scénario est une description d'un côté des particuliers et de leur dynamique et de processus naturels ou mécaniques, et de l'autre des théories, lois ou principes applicable à ces éléments. Suite aux processus mentaux déployé par le scientifique, on obtient alors un résultat (RS), et enfin suite à ce résultat le scientifique argumente en faveur de sa conclusion et donc répond à la question cible ; c'est la conclusion de l'expérience de pensée, la CEP.

La dernière étape qui fournit la CEP en partant du RS est généralement implicite dans l'expérience de pensée et nous l'explicitons dans ce chapitre. La justification de chaque CEP se trouve dans ce passage du RS à la CEP et aussi dans la notion de possibilité en jeu dans le scénario de l'expérience de pensée.

Cette structure se veut alors assez générale pour inclure toutes les expériences de pensée scientifiques, au moins celles débattues dans la littérature et dont on a analysé un échantillon représentatif dans la partie I. C'est en analysant cet échantillon que la structure que nous proposons va s'imposer tout seule. Elle se veut unificatrice et assez souple pour s'accommoder de leur diversité, plus souple qu'un argument logique, mais plus restrictive sur le pouvoir épistémique d'acquisition de connaissances que l'analyse proposée par Brown. Elle reflète leur fonctionnement interne commun et offre une méthode de justification. Elle est de nature générale et identifiante, capable d'évaluer les expériences de pensée en tant qu'outils scientifiques autonomes.

Enfin, dans ce chapitre, nous allons une fois de plus se tourner vers l'histoire des sciences et analyser la boîte à photon d'Einstein (*cf.* 7.5 et 7.6). Cette analyse nous fournira plusieurs leçons concernant le débat sur l'identité des expériences de pensée. Comme ce débat fut posé pour la première fois à partir de l'analyse de la version de Bohr de la boîte à photon, nous analyserons cette dernière avec notre structure et la dynamique de passage des éléments d'un scénario de l'arrière-

plan vers le premier plan. Nous pousserons plus loin ce débat en incluant les différentes utilisations par Einstein de cette boîte à photon, dans au moins deux autres expériences de pensée dans le domaine de la mécanique quantique.

« Les expériences de pensée sont effectuées dans le laboratoire de l'esprit. Par-delà cette petite métaphore, il est difficile de dire exactement ce qu'elles sont. On les reconnaît quand on les voit »
James R. Brown, 1991

Partie I

Une classification fonctionnelle

Introduction

Faute de définition exhaustive des expériences de pensée, même limitée aux exemples scientifiques, dans cette première partie nous proposerons une classification *fonctionnelle* des expériences de pensée scientifiques basée principalement sur une présentation détaillée et une analyse approfondie de plusieurs exemples. Classer et délimiter les fonctions d'une pratique scientifique ou philosophique avant même de la définir peut être considéré comme accomplir un travail à l'envers. Comment peut-on dire ce qu'un individu X peut faire avant même de savoir s'il appartient à la classe des X, c'est-à-dire avant même de savoir si on parle d'un X ou pas ? La diversité du sujet traité dans cette thèse rend la tâche définitionnelle impossible à accomplir avant que plusieurs exemples ne soient préalablement donnés. Tout au plus on peut donner à ce stade une définition indexicale « ça, c'est une expérience de pensée », énoncé avant d'avoir ou après avoir présenté une expérience de pensée. On remarque cette difficulté définitionnelle dans la littérature, ainsi James Robert Brown commence son livre sur le sujet par « Les expériences de pensée sont effectuées dans le laboratoire de l'esprit. Par-delà cette petite métaphore, il est difficile de dire exactement ce qu'elles sont. On les reconnaît quand on les voit »³. La majorité des philosophes présentent ainsi les récits de la tour de Pise de Galilée (*cf.* 2.2) où deux mobiles chutent séparément puis reliés, du démon de Maxwell (*cf.* 3.2) qui manipule les molécules et sépare les lentes des rapides, des jumeaux de Langevin (*cf.* 3.4) qui se séparent pour que l'un d'eux entreprenne un voyage spatial et de l'ascenseur d'Einstein (*cf.* 3.5) accéléré dans l'espace loin de toute source gravitationnelle, comme étant des expériences de pensée scientifique. De même, faute de définition exhaustive des expériences de pensée, nous suivrons un semblant de consensus et considérerons les cas d'études analysés dans cette première partie comme exemples d'expériences de pensée scientifique.

En première analyse, la fonction d'une expérience de pensée doit être comprise par rapport au but que l'expérimentateur en pensée vise à atteindre lorsqu'il utilise son expérience de pensée, que ce but soit atteint ou pas. Savoir comment et si une expérience de pensée mène, ou peut mener, à ce but est une question d'ordre épistémologique qu'on traitera dans les parties II et III de cette thèse. Bien que cette classification fonctionnelle ne soit pas la seule possible, *celle-ci vise à être indépendante d'une quelconque approche épistémologique sur les expériences de pensée.*

³James Robert Brown, *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, Routledge, 1991, p. 1. Traduit par l'auteur "Thought experiments are performed in the laboratory of the mind. Beyond that bit of metaphor it's hard to say just what they are. We recognize them when we see them".

L'indépendance de la classification proposée dans cette partie contraste avec la dépendance des classifications qu'on retrouve dans la littérature, de part et d'autre du spectre philosophique, par rapport aux approches épistémologiques de leurs auteurs. On peut diviser ces approches classificatoires en deux grande catégories; *logique* et *fonctionnelle*. Elles reflètent les deux approches épistémologiques, l'une radicalement empiriste, celle de John D. Norton (depuis 1991), l'autre radicalement réaliste, celle de James Robert Brown (depuis 1986)⁴.

Pour le premier, les expériences de pensée sont classées en deux types ; celles qui sont réductibles à des arguments déductifs (type 1) et celles qui sont réductibles à des arguments inductifs (type 2). Cette classification s'intègre naturellement dans et dépend intégralement de l'approche épistémologique de Norton, sur laquelle on reviendra en détail dans 4.4. En quelques mots, selon Norton, les expériences de pensée sont des arguments logiques déguisés. Quand on réduit une expérience de pensée à un argument logique de type 1 ou 2, sa structure logique émerge et on pourra alors l'analyser épistémologiquement avec les outils de la logique déductive ou inductive, selon le cas. Un exercice plutôt bien entrepris par Norton dans plusieurs articles. Cette classification n'a de sens ou de pouvoir taxonomique que dans une approche à *la Norton* et donc elle est complètement dépendante de cette dernière.

De l'autre côté du spectre philosophique, on retrouve une classification plus détaillée et à première vue indépendante de l'approche épistémologique de son auteur; celle de Brown. Ce dernier suit la taxonomie de Karl Popper et divise les expériences de pensée selon que leur but (ou ce qui revient au même, leur fonction) est de réfuter ou de soutenir une théorie. Popper⁵ distingue entre les expériences de pensée heuristique (pour illustrer une théorie; il donne l'exemple de l'ascenseur d'Einstein), critique (pour réfuter une théorie; il donne l'exemple de la tour de Pise) et apologétique (pour défendre une théorie critiquée par une expérience de pensée; il donne l'exemple de la version de Bohr de la boîte à photon). Popper se prononce en faveur des expériences de pensée critiques et contre les apologétiques. Il s'appuie sur le débat entre Einstein et Bohr (*cf.* 2.3 et partie III) pour argumenter en faveur de l'utilisation critique de l'expérience de pensée de la boîte à photon par Einstein et contre l'utilisation apologétique par Bohr (nous critiquerons dans le chapitre 7 le critère qui mène Popper à cette conclusion). Tandis que l'analyse de Popper se réduit à un article et qu'il ne propose pas une épistémologie des expériences de pensée, Brown par contre est

⁴ Ces deux approches dont le chapitre 4 et une partie du chapitre 5 leur seront dédié.

⁵ Popper, Karl, 1959, On the use and misuse of imaginary experiments, especially in Quantum Theory, dans *The Logic of Scientific Discovery*, London: Hutchinson, 442–456.

l'un des philosophes les plus engagés dans la littérature épistémologique. Il a publié de nombreux livres et articles depuis 1986 dans le but de défendre le réalisme scientifique en général et une approche réaliste (ou Platoniste) des expériences de pensée en particulier (Cf. 4.3). Brown divise les expériences de pensée en outre en deux types (figure I.1) : *destructives* (critiques) et *constructives* (heuristiques).

Les premières visent à critiquer une théorie, soit en montrant une inconsistance interne (la tour de Pise, cf. 2.2) soit en montrant qu'elle est en désaccord avec « un sens commun très basique »⁶ (le chat de Schrödinger, cf. 2.4).

La division des expériences de pensée constructives est plus élaborée, Brown distingue trois sous-types : médiane, conjecturale, et directe. Une expérience de pensée médiane, comme celle du démon de Maxwell (cf. 3.2), facilite une conclusion tirée d'une théorie spécifique et bien articulée. Une expérience de pensée conjecturale vise à expliquer un phénomène imaginaire, dans le sens qu'il est conjecturé dans l'expérience de pensée sans pour autant exister dans la nature, comme le sceau de Newton, et ceci en postulant la notion de l'espace absolue. Enfin les expériences de pensée directes, comme la tour de Pise (cf. chapitre 4 pour la partie constructive, directe de cette expérience de pensée et chapitre 5 pour la réfutation de ce pouvoir attribué par Brown à l'expérience de pensée) et l'ascenseur d'Einstein (cf. 3.3), visent à établir une théorie, « elles ressemblent aux expériences de pensée médianes dans le fait qu'elles commencent par un phénomène [...] non problématique au lieu d'un phénomène conjecturé. D'autre part les expériences de pensée directes, comme les conjecturales, ne partent pas d'une théorie bien articulée – elles *finissent* par une telle théorie. »⁷

⁶ Brown, *Op.cit.*, p. 36.

⁷ *Ibid.* p. 41, “They resemble mediative thought experiments in that they start with unproblematic (thought-experimental) phenomena, rather than conjectured phenomena. On the other hand, direct thought experiments, like conjectural ones, do not start from a given well-articulated theory—they *end* with one.”.

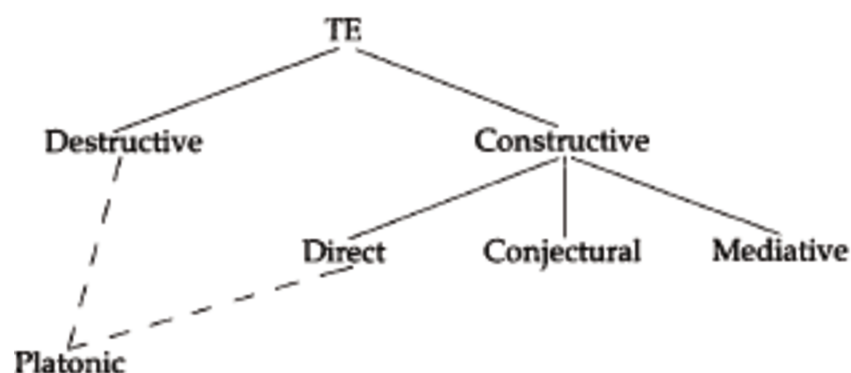


Figure I.1 : La Taxonomie de Brown⁸

La classification fonctionnelle de Brown n'est certes pas directement dépendante de son approche épistémologique, comme chez Norton, mais la figure I.1 nous montre en elle une certaine dépendance de la taxonomie et de l'épistémologie. Avec sa taxonomie fonctionnelle, Brown vise ainsi à défendre une classe très importante, sur laquelle on reviendra en détail dans 4.3. Cette classe se trouve au centre de son épistémologie réaliste : « Il y a une petite classe d'expériences de pensée qui est simultanément dans le camp destructif et dans le camp constructif; les plus remarquables sont celles que j'appelle *Platoniques*. Leur rôle très particulier en science va être décrit et défendu [...] »⁹

Dans cette première partie, nous proposerons donc une classification fonctionnelle, indépendante d'une quelconque approche épistémologique des expériences de pensée, en nous appuyant sur une analyse de plusieurs exemples d'expériences de pensée scientifiques, surtout tirés du domaine de la physique. Leur contexte historique prendra une place importante dans certains cas d'étude, d'où la grande quantité de citations dans cette partie, et même dans cette thèse dès lors qu'on discute l'utilisation par un scientifique d'une expérience de pensée. Sans pour autant empiéter sur le domaine de l'histoire des sciences qui nécessite un grand travail d'historien, le fait que les expériences de pensée les plus intéressantes se trouvent pour la plupart dans un contexte scientifique précis et complexe demande une analyse philosophique historiquement orientée. Cette analyse détaillée de certains cas d'études nous donnera la possibilité d'aborder les questions

⁸ *Ibid.* p. 34.

⁹ *Ibid.* p33. "There is a small class of thought experiments which are simultaneously in the destructive and the constructive camps; these are the truly remarkable ones which I call *Platonic*. Their very special role in science will be described and argued for".

philosophiques et épistémologiques, généralement de nature abstraite, le plus concrètement possible. Ainsi les questions sur le pouvoir épistémique des expériences de pensée, comme celle de savoir si elles peuvent nous fournir des connaissances nouvelles sans même aller consulter la nature, quelle est la nature de cette connaissance, ou celle de savoir si leurs conclusions sont justifiées ou justifiables et si elles sont fiables, seront abordées suite à la présentation des cas d'études dans cette partie I, dans les parties II et III. Nous analyserons alors dans cette partie I les cas d'études en ne nous appuyant que sur les textes originaux de leurs auteurs, pour ne mettre l'accent que sur le but de chaque scientifique dans son utilisation de l'expérience de pensée, donc la fonction qu'a chaque expérience de pensée pour son utilisateur. Cette analyse détaillée de chaque expérience de pensée et de sa fonction, nous servira alors à faire émerger, dans la partie III de la thèse, une structure commune pour les expériences de pensée qui montre comment chacune d'entre elles peut nous fournir une connaissance sur le monde, quelle est la nature de cette dernière et s'il est justifié de l'accepter.

Dans notre classification fonctionnelle, nous diviserons donc les expériences de pensée scientifiques suivant deux fonctions : *la réfutation* et *l'exploration théorique*.¹⁰

Dans le chapitre 2 on développera la première fonction, celle de la réfutation. Certaines expériences de pensée visent à réfuter une théorie ou un principe théorique en révélant une absurdité ou en révélant une contradiction : Galilée conçoit une expérience de pensée qui montre qu'en suivant le premier principe de la théorie aristotélicienne de la vitesse de chute des corps, on peut imaginer une situation où la vitesse de chute d'un corps peut être décrite à la fois comme plus rapide et plus lente que celle d'un autre. Et cela dans le but de réfuter la théorie d'Aristote de la vitesse de chute des corps (*cf.* 2.2). Einstein, selon Bohr, conçoit une expérience de pensée où il montre qu'on peut en principe mesurer simultanément le temps de passage d'un photon et son énergie, et cela avec un degré de précision arbitraire, en contradiction avec le principe d'indétermination de Heisenberg. Et cela dans le but de montrer une contradiction au sein de la mécanique quantique (*cf.* 2.3).

D'autres expériences de pensée amènent à « voir » une conclusion contre-intuitive d'une théorie. Même si ces dernières ne visent pas à réfuter une théorie mais plutôt à identifier un nombre de problèmes en son sein, elles appartiennent aussi à cette fonction de réfutation. Schrödinger décrit une situation où le chat n'est pas, de façon déterminée, mort ou vivant avant d'ouvrir la boîte qui le cachait. Cette situation est pour lui absurde et lui permet de critiquer la mécanique quantique, en

¹⁰ Une troisième fonction, à savoir celle de nous *fournir et justifier les lois de la nature*, sera analysée d'une façon critique dans la deuxième partie de la thèse. Cette fonction ouvre le débat épistémique entre l'empirisme de John D. Norton et le platonisme de James Robert Brown.

soutenant principalement qu'elle est incomplète (cf. 2.4).

Dans le chapitre 3 on abordera la fonction d'exploration théorique des expériences de pensée. Les scientifiques ont surtout utilisé ces expériences de pensée au cours du développement¹¹ théorique, dans le but de mettre en évidence certains aspects liés à ce développement : la cohérence, ou l'incohérence, de la nouvelle théorie ou du nouveau concept avec les théories et concepts établis, pour illustrer un nouveau principe qui servira par la suite à explorer une nouvelle théorie et pour pousser vers un choix entre deux ou plusieurs théories, ou plutôt interprétations théoriques. Une interprétation théorique doit être comprise dans un sens qui nous permet d'inclure les différentes interprétations de la mécanique quantique ainsi que celles qui prétendent fonder une loi phénoménologique, comme la deuxième loi de la thermodynamique, sur ces composants microscopiques; par exemple les interprétations dynamiques, probabilistes ou statistiques de la deuxième loi.

Cette exploration peut précéder la formulation d'une théorie. Il arrive alors que ces usages exploratoires débouchent sur de nouvelles avancées théoriques, voire même sur la création de nouvelles branches de recherche. Pour illustrer cette fonction d'exploration, on analysera deux expériences de pensée. La première sera celle du démon de Maxwell (cf. 3.2), où l'on ne souhaite analyser que l'expérience de pensée de James Clerk Maxwell formulée en 1867 dans une lettre à Peter Guthrie Tait, puis en 1871 dans *La Chaleur*¹². Cette expérience de pensée montre la richesse de la fonction d'exploration théorique ; elle réfute une interprétation dynamique de la deuxième loi de la thermodynamique et défend une interprétation statistique, sans pour autant proposer une formulation bien précise de cette dernière. Ce faisant, elle rétablit une cohérence avec la théorie cinétique des gaz, cohérence qu'on perd avec une interprétation dynamique. La seconde expérience de pensée analysée dans ce chapitre sera l'ascenseur d'Einstein (cf. 3.5) conçu en 1907 puis publié en 1917 et 1938. Par son biais, Einstein vise à illustrer son principe d'équivalence, principe qui sera par la suite un postulat de la nouvelle théorie de la relativité générale.

Cette exploration peut aussi succéder à la formulation d'une théorie dans un but plutôt pédagogique, heuristique ou expositif. Ces expériences de pensée sont utilisées dans le but de montrer qu'une théorie s'applique à des situations apparemment en dehors de son champ

¹¹ On utilise le terme « développement théorique » pour indiquer que la théorie explorée n'est pas encore bien établie.

¹² James Clerk Maxwell, 1891, *La Chaleur*, traduit par G. Mouret, Paris B Tignol. p. 421-422 traduction de J.C. Maxwell, 1871, *Theory of Heat*, London: Longmans, Green et Co.

d'application - le boulet de canon de Newton (*cf.* 3.3) - ou à des situations au première abord paradoxales - les jumeaux de Langevin (*cf.* 3.4).

« La perfection n'est pas de ce monde ; on peut s'en approcher, sans doute, mais on ne peut pas l'atteindre. Entre la donnée empirique et l'objet théorique, il reste, et il restera toujours, une distance impossible à franchir. C'est là que l'imagination entre en scène. »
Alexandre Koyré, 1960

Chapitre 2

La réfutation

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on abordera la première fonction des expériences de pensée, celle de la réfutation. Nous analyserons trois cas d'études en nous appuyant surtout, comme nous l'indiquions plus haut, sur les textes originaux de leurs auteurs, afin seulement de dégager, pour chacune de ces expériences de pensée, le but poursuivi dans son utilisation. Certaines expériences de pensée, des plus discutées dans la littérature, visent à réfuter une théorie, un principe théorique ou une loi de la nature, et cela de deux manières différentes :

Soit en révélant une absurdité : Galilée conçoit l'expérience de pensée de la tour de Pise, analysée dans la section 2.2, dans le but de réfuter la théorie d'Aristote sur la vitesse de chute des corps, en réfutant son premier principe qui établit une proportionnalité linéaire de la vitesse de chute d'un mobile et de son poids absolu. Il imagine un scénario qui mène à un résultat absurde où la vitesse de chute d'un mobile est à la fois plus rapide et plus lente que celle d'un autre. Sans pour autant s'attarder sur cette notion de scénario et de son résultat, sur lesquelles nous reviendrons explicitement dans le chapitre 7, disons que le scénario c'est la partie de l'expérience de pensée où les processus sont décrits, ceux de la chute de deux mobiles chez Galilée ou le mécanisme meurtrier chez Schrödinger. Tandis que le résultat d'un scénario est le produit de ces processus décrits dans le scénario, la situation d'arrivée, un mobile à la fois plus rapide et plus lent, un chat à la fois mort et vivant. On analysera dans ce chapitre l'expérience de pensée de la tour de Pise dans sa version des *Discours* de 1638 de Galilée afin d'insister sur sa fonction réfutatoire. On reviendra dans le chapitre 5 sur une analyse historique plus détaillée qui situe la première apparition de cette expérience de pensée chez Galilée en 1590, et cela dans le but de critiquer les analyses de cette expérience de

pensée qu'on trouve dans la littérature. Il arrive aussi qu'un résultat absurde ne vise pas à réfuter la théorie de départ mais plutôt à montrer des problèmes en son sein. C'est le cas de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger analysée dans la section 2.4. Schrödinger décrit un scénario qui va aboutir à une situation, un résultat, où le chat n'est pas, d'une façon déterminée, mort ou vivant avant qu'on ouvre la boîte qui le cachait. Cette situation est pour ce dernier absurde et lui permet de conclure que la mécanique quantique doit être incomplète. Ainsi cette notion de réfutation doit être comprise au sens large du terme afin d'englober les expériences de pensée qui ne visent pas uniquement à réfuter une théorie en montrant une inconsistance interne, mais aussi les expériences de pensée qui visent à soulever certains problèmes au sein d'une théorie, sans pour autant la rejeter.

Soit en montrant une contradiction : La boîte à photon d'Einstein, analysée dans la section 2.3, consiste à montrer une contradiction. Einstein conçoit l'expérience de pensée de la boîte à photon dans le but de montrer qu'on peut en principe mesurer simultanément le temps de passage d'un photon et son énergie, et cela avec un degré de précision arbitraire, en contradiction avec le principe d'indétermination de Heisenberg. Cette contradiction aurait permis à Einstein, au moins dans la lecture qu'offre Bohr de cette expérience de pensée, d'argumenter que la mécanique quantique est inconsistante. Aurait permis car, comme on le verra, Bohr va réfuter cette expérience de pensée et sa conclusion¹³.

2.2 La tour de Pise de Galilée

L'expérience de pensée de la tour de Pise, analysée dans cette section¹⁴ et par la plupart des philosophes dans la littérature, est celle qui est publiée dans les *Discours* (1638) de Galilée. Dans ce livre, l'auteur met en scène une discussion entre trois personnages : Salviati, le porte-parole de Galilée, Sagredo, qui prend le rôle de l'honnête penseur et Simplicio, le représentant de la pensée scolastique de l'époque et donc des thèses d'Aristote. Galilée, par le biais de son expérience de pensée, visera à réfuter la théorie d'Aristote sur la vitesse de chute libre des corps, en réfutant son premier principe selon lequel chaque corps possède une vitesse propre proportionnelle à son poids, lorsqu'il tombe verticalement selon son mouvement naturel (c'est-à-dire sans que rien n'intervienne qui dirige le mouvement ou influe sur sa vitesse de l'extérieur ; dans notre vocabulaire contemporain, le mouvement naturel selon Aristote correspond ici à un mouvement de chute libre).

¹³ On analysera la réfutation de Bohr dans 6.3 et une différente interprétation du but de cette expérience de pensée dans 7.5

¹⁴ Pour une analyse historique détaillée de la première utilisation de cette expérience de pensée par Galilée dans *De Motu* (1590) et du cheminement de sa pensée, voir chapitre 5 et les références aux travaux de Paolo Palmieri, Maarten Van Dyck, et Alexandre Koyré.

Cette expérience de pensée intervient dans un contexte plus large que la réfutation de la théorie d'Aristote : dans la discussion sur la possibilité de l'existence du vide. Possibilité défendue par Galilée, par opposition à Aristote, avec une série d'arguments dont le premier sera cette expérience de pensée. Dans cette section, on précisera cette discussion générale (2.2.1) avant d'aborder l'expérience de pensée (2.2.2) et enfin sa fonction (2.2.3 et 2.2.4). On citera longuement Galilée, en ne l'interrompant que pour souligner et analyser les points essentiels. Cette discussion générale s'avérera nécessaire pour une bonne analyse de cette expérience de pensée et de sa fonction.

2.2.1 La discussion sur l'existence du vide : la théorie d'Aristote

Commençons par cette discussion. Sagredo demande à ses deux autres interlocuteurs de clarifier leurs positions concernant le vide : « Quant au vide, j'aimerais entendre une appréciation exacte de la démonstration par laquelle Aristote le récuse, et ce que vous, seigneur Salviati, lui répondez.

« SIMP. Aristote, pour autant qu'il m'en souviene, s'élève contre certains anciens qui introduisaient le vide à cause du mouvement, disant que celui-ci ne pourrait avoir lieu sans celui-là. S'opposant à cette thèse, Aristote démontre que tout au contraire la réalité du mouvement (et nous la constatons) rend le vide impossible. Développant son argumentation, il fait d'abord deux suppositions : la première concerne des mobiles de poids différents, se mouvant dans le même milieu, et la seconde un même mobile se mouvant dans différents milieux. Dans le premier cas il admet que des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles même proportion que les poids; en sorte, par exemple, qu'un mobile dix fois plus lourd qu'un autre, descendra dix fois plus vite. Dans le second cas il admet que les vitesses du même mobile dans différents milieux sont inversement proportionnelles à l'épaisseur ou densité de ces milieux; si l'on prête ainsi à l'eau une densité dix fois supérieure à celle de l'air, il veut que dans l'air la vitesse soit dix fois plus rapide que dans l'eau. De cette seconde supposition il tire alors la démonstration suivante : puisque la ténuité du vide diffère infiniment de la corporité, si subtile soit-elle, de n'importe quel milieu plein, un mobile qui dans un milieu plein parcourt une certaine distance en un certain temps, devrait dans le vide se mouvoir instantanément; or le mouvement instantané est impossible; donc on ne peut introduire le vide à cause du mouvement.

Galilée attaquera cet argument aristotélicien sur l'impossibilité du vide en divisant, comme le fait d'ailleurs Simplicio, la théorie d'Aristote sur la vitesse de chute des corps en deux principes. Le premier établit la proportionnalité linéaire¹⁵ de la vitesse de chute d'un mobile et de son poids

¹⁵ « un mobile dix fois plus lourd qu'un autre, descendra dix fois plus vite ».

absolu. Tandis que le second établit la proportionnalité linéaire ¹⁶ inverse de la vitesse de chute d'un mobile et de la résistance du milieu¹⁷. C'est uniquement en séparant ces deux principes que Galilée peut procéder à nier le premier avec son expérience de pensée, et puis le second avec une série d'arguments pour arriver enfin à sa conclusion concernant la possibilité du mouvement dans le vide. Puis, avec une stratégie argumentative assez complexe, à sa loi sur l'égalité de la vitesse de chute de tous les mobiles dans le *vide* (cf. chapitre 5).

S'attaquant au premier principe, Galilée commence par questionner, par le biais de Salviati, le fait qu'Aristote a vérifié expérimentalement sa validité :

SALV. [...] Mais pour vous dire ce que ces anciens pourraient répondre le cas échéant, et afin de mieux percevoir jusqu'à quel point la démonstration d'Aristote est valable, il me semble que l'on peut s'élever contre ses suppositions et les nier toutes deux. Pour la première je doute qu'Aristote ait jamais vérifié expérimentalement s'il est vrai que deux pierres, dont l'une est dix fois plus pesante que l'autre et qu'on laisse tomber au même instant d'une hauteur de cent coudées, par exemple, aient des vitesses si différentes que la plus grande touche déjà terre alors que l'autre n'a même pas descendu dix coudées.

SIMP. On voit pourtant d'après ses propres paroles qu'il a fait l'expérience puisqu'il dit : *Nous voyons le plus lourd*; ce verbe «voir» indique le recours à l'expérience.

SAGR. Mais moi, qui en ai fait l'essai, seigneur Simplicio, je vous assure qu'un boulet d'artillerie pesant cent ou deux cents livres, ou même davantage, ne précédera même pas d'une palme, en touchant terre, une balle de mousquet dont le poids n'excède pas une demi-livre, et cela après une chute commune de deux cents coudées.

Sagredo souligne ici que l'expérience ne donne pas raison à Aristote. En faisant l'expérience on observe en effet une inégalité entre la chute de corps de différent poids, dans un même milieu, l'air, mais cette différence est minime et ne suit nullement la proportionnalité linéaire d'Aristote. Afin de montrer que cette différence n'est pas causée par le poids des mobiles (mais causée par la résistance du milieu, cf. 2.2.3) et réfuter ainsi le premier principe de la théorie d'Aristote, Galilée aura recours à l'expérience de pensée de la tour de Pise.

¹⁶ « si l'on prête ainsi à l'eau une densité dix fois supérieure à celle de l'air, il veut que dans l'air la vitesse soit dix fois plus rapide que dans ».

¹⁷ Le fait que cette proportionnalité soit linéaire ou suit une fonction différente ne change en rien la critique de Galilée. On ignorera par la suite ce caractère linéaire de la proportionnalité, sauf quand Galilée souligne que dans la nature on observe une petite différence dans la vitesse de chute de mobiles de même matière.

2.2.2 L'expérience de pensée de la tour de Pise

Galilée, par le biais de Salviati, propose de démontrer la fausseté du premier principe de la théorie d'Aristote « sans autre expérience, à l'aide d'une démonstration brève et concluante ». Mais avant de proposer à Simplicio son expérience de pensée, Salviati va fixer deux restrictions relatives à la nature des mobiles dont il sera question, puis demander une concession de la part de Simplicio relativement au comportement de ces mobiles quand ils sont en chute libre :

SALV. On peut d'ailleurs prouver sans autres expériences, à l'aide d'une démonstration brève et concluante, qu'un mobile plus pesant ne se meut pas plus rapidement qu'un mobile moins pesant, à condition que leur matière soit identique et qu'ils soient, en somme, semblables à ceux dont parle Aristote. Dites-moi donc, seigneur Simplicio, si vous admettez qu'un corps grave, lorsqu'il tombe, a une vitesse naturellement déterminée, c'est-à-dire telle qu'elle ne peut être augmentée ni diminuée sinon par violence ou par quelque obstacle.

SIMP. Il n'est pas douteux que le même mobile dans le même milieu a une vitesse fixée et déterminée par nature, qui ne peut être augmentée sinon en lui conférant un nouvel *impeto*, ni diminuée sinon en le ralentissant par quelque obstacle.

Tandis que la première restriction est précise et concerne la matière des mobiles en chute libre : *ils doivent être de la même matière*, la seconde est plus générale et impose que les mobiles doivent être semblables à ceux dont parle Aristote. Cette précision doit être comprise ici en relation avec une analyse ultérieure de Galilée, celle de la chute d'un mobile d'or et ensuite de ce même mobile réduit en feuille (sur laquelle on reviendra un peu plus tard). Galilée souhaite ici limiter sa discussion, et ainsi son expérience de pensée, à la chute libre des mobiles considérés par Aristote, où les autres facteurs n'influencent pas la vitesse de chute, où il n'y a que l'effet du poids du mobile qui mérite considération : *des mobiles de même matière et dont ni la forme, ni un autre facteur, n'influencent la vitesse de chute*.

Deuxièmement, la concession demandée par Salviati à Simplicio « qu'un corps grave, lorsqu'il tombe [en chute libre] a une vitesse naturellement déterminée » lui sert à exclure une sorte de réponse de Simplicio selon laquelle le composé considéré dans l'expérience de pensée ci-dessous ne serait pas un corps naturel et donc n'aurait pas de vitesse déterminée par la nature. Cette concession permet aussi à Salviati d'en aborder une autre, qui jouera un rôle déterminant dans son expérience de pensée (*cf.* chapitre 5) ; celle concernant la façon d'augmenter ou de diminuer la vitesse de chute du mobile : [la vitesse de chute] « ne peut être augmentée ni diminuée sinon par violence ou par quelque obstacle ».

Ces précisions permettront à Galilée d'affirmer que :

SALV. Si donc nous avons deux mobiles possédant des vitesses naturelles inégales, il est clair qu'en attachant le plus lent au plus rapide la vitesse de celui-ci serait partiellement ralentie par le plus lent, et celle du plus lent partiellement accrue par le plus rapide. N'êtes-vous pas d'accord avec moi sur ce point?

SIMP. Il ne peut, à mon avis, en aller autrement.

Galilée est maintenant prêt à présenter à Simplicio le scénario de son expérience de pensée :

SALV. Mais s'il en est ainsi, et s'il est vrai encore qu'une grande pierre se meut, par exemple, avec huit degrés de vitesse et une plus petite avec quatre degrés, il s'ensuivra, si on les attache, que l'ensemble se mouvra avec une vitesse inférieure à huit degrés ; or les deux pierres, réunies, forment une pierre plus grande que celle qui se mouvait avec huit degrés de vitesse, et la plus grande se meut par conséquent moins vite que la plus petite, ce qui va contre votre supposition. Vous voyez donc comment, si vous supposez qu'un mobile plus grave se meut plus vite qu'un mobile moins grave, j'en conclus, de mon côté, qu'un mobile plus grave se meut moins vite.»¹⁸

Galilée arrive au résultat selon lequel la proportionnalité de la vitesse et du poids nous mène à une absurdité ; si l'on suppose qu'un mobile plus pesant se meut plus vite qu'un mobile moins pesant, on peut alors conclure qu'un mobile moins pesant se meut plus vite qu'un mobile plus pesant. De cette absurdité, Galilée conclut que le premier principe de la théorie d'Aristote sur la proportionnalité de la vitesse et du poids doit être faux. C'est la fonction principale de cette expérience de pensée, celle de la réfutation.

Tout en réservant notre analyse détaillée des autres fonctions de cette expérience de pensée au chapitre 5, nous souhaitons en dire quelque mots à ce stade pour souligner le rôle de la résistance du milieu, ou plutôt l'absence de ce rôle dans l'expérience de pensée.

2.2.3 Le rôle de la résistance du milieu : une autre fonction pour l'expérience de pensée de la tour de Pise ?

Galilée est-il fondé à prétendre réfuter la théorie aristotélicienne de la vitesse de chute sans aborder le rôle de la résistance du milieu ? La théorie d'Aristote ne nous dit-elle pas que la vitesse est *inversement proportionnelle à la résistance aussi* ? Comme le note si bien Alexandre Koyré :

¹⁸ Galileo Galilei, 1638, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, Traduit par Maurice Clavelin, Presses Universitaires de France 1995, p. 52-55 [105-108]. La numérotation de pages entre crochets réfère au texte de Galilée.

« Si, dans sa critique-réduction à l'absurde de la dynamique d'Aristote que nous venons d'examiner [l'expérience de pensée de la tour de Pise], Galilée n'a pas tenu compte de la résistance opposée par le milieu au mouvement du corps descendant, n'en concluons pas qu'il ait, en général, méconnu le rôle qu'elle joue dans cette dynamique. Bien au contraire : c'est par la critique de la conception aristotélicienne concernant les rapports de la puissance à la résistance qu'il en viendra à démontrer, au moyen d'une expérience imaginaire, non seulement la possibilité de mouvement dans le vide, mais aussi le fait que, dans le vide, tous les corps tombent avec la même vitesse, et que c'est justement la résistance du milieu qui explique qu'il ne le font pas dans le plein.

Pourquoi, alors, a-t-il négligé d'en parler jusqu'ici ? Peut-être parce que, ayant présenté la dynamique aristotélicienne comme fondée sur deux principes-axiomes affirmant : a) que la vitesse est proportionnelle à la force motrice, et b) qu'elle est inversement proportionnelle à la résistance, a-t-il estimé devoir en faire la critique séparément; peut-être aussi parce que, habituellement, cette résistance — celle de l'air — est minime et, de ce fait, négligeable. »¹⁹

Koyré a tout à fait raison d'indiquer que Galilée, dans son expérience de pensée, qu'il appelle par ailleurs une « critique-réduction à l'absurde », a négligé de parler de la résistance du milieu jusqu'à présent. Il en propose deux raisons qui ne sont pas mutuellement exclusives, mais au contraire complémentaires :

La première est que Galilée a divisé sa critique en deux parties, comme on l'a souligné ci-dessous, en divisant la théorie d'Aristote en deux principes, et donc néglige l'effet de la résistance afin de critiquer les deux principes séparément.

La seconde raison semble, au première abord plus sujette à controverse : comme la résistance de l'air est minime, elle est donc négligeable. Si cette raison est comprise comme une supposition du vide, alors elle est problématique car Galilée ne peut pas procéder à cette supposition²⁰ ; comme son expérience de pensée intervient dans le contexte de la discussion de la possibilité du vide, ainsi on l'a vu au début avec la question de Sagredo à ses deux interlocuteurs. Si idéaliser la résistance du milieu revient à accepter la possibilité du vide et du mouvement dans le vide, alors cette idéalisation rend tout l'argument de la possibilité de l'existence du vide circulaire. Cette seconde raison invoquée par Koyré doit être plutôt comprise de la façon suivante : la résistance du milieu, dans le cas de la chute libre des mobiles décrits par cette expérience de pensée, de même matière et dont la forme n'influence pas la vitesse de chute, est minime et peut être négligée (cf. 5.4). Comme on va le voir ci-dessous, Galilée va comparer la chute d'un lingot d'or et la chute de ce même lingot réduit en feuilles pour ainsi montrer l'effet de la résistance pour des mobiles dont la forme du mobile joue un rôle, et donc la résistance du milieu aussi. La limitation du

¹⁹ Alexandre Koyré, 1960, *Le De Motu Gravium* de Galilée. De l'expérience imaginaire et de son abus, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, Tome 13 n°3, pp. 205-206.

²⁰ Norton souligne ce point dans sa discussion visant à montrer que les expériences de pensée ne sont que des arguments logiques (Cf. chapitre 5). On analysera l'approche de Norton et sa reconstruction de cette expérience de pensée en argument déductif dans la partie II de cette thèse.

scénario de l'expérience de pensée à des mobiles de même matière donne à Galilée la possibilité de négliger l'effet qu'a la résistance du milieu sur la vitesse de chute sans pour autant supposer l'existence du vide ; la résistance du milieu affecte en fait disproportionnellement les mobiles de différentes matière (cf. chapitre 5 pour une analyse de cette limitation depuis la première utilisation par Galilée de cette expérience de pensée en 1590). Aussi, l'effet de la résistance est *presque* identique pour les mobiles de même matière dont les formes ne diffèrent pas (deux boules et non une boule et une feuille). Presque, car on verra ci-dessous et dans 5.4, que cette résistance sera en fait responsable de la petite différence entre les vitesses de chute de ces mobiles.

Dans le cas où il n'y a aucune autre différence entre les mobiles que celle de leurs grandeurs, et donc de leurs poids, Salviati va en effet affirmer juste après son expérience de pensée :

« SALV. [...] Nous en concluons donc que les mobiles grands et petits, et possédant un même poids spécifique [de même matière], se meuvent avec une même vitesse. »²¹

C'est cette citation qui est reprise par la plupart des philosophes intéressés par le débat sur les expériences de pensée dans leurs analyses de ce cas d'étude²², et ce dans le but d'argumenter en faveur ou en défaveur de la capacité de cette expérience de pensée à *révéler et justifier* la théorie de Galilée concernant l'égalité de la vitesse de chute des mobiles. C'est en se basant sur cette citation que certains auteurs affirment que Galilée a montré l'égalité de vitesse de chute libre par le biais d'une expérience de pensée. En effet, Galilée semble affirmer ici, suite à son expérience de pensée, l'égalité de la vitesse de chute des mobiles. Mais c'est le cas uniquement pour les mobiles de même poids spécifique, c'est à dire de la même matière, et *dans le plein*, car Galilée, pour l'instant, ne peut pas encore parler du vide. Tout en réservant notre analyse de cette conclusion « constructive » de l'expérience de pensée de la tour de Pise à la partie II de la thèse, nous souhaitons souligner ici qu'il ne faut pas prendre la conclusion de Galilée à la lettre. Galilée est ici trop pressé en concluant de son expérience de pensée à cette égalité dans le plein, car en réalité il y a une petite différence et c'est exactement la résistance du milieu qui en est responsable. Comme le note Koyré :

« [La vitesse de chute] dépend [...] pour ceux [les mobiles] qui à tous ces égards sont pareils, de leur volume. La résistance mécanique est, en effet, fonction du rapport de la surface du corps à son poids ; or ce rapport est moindre dans les corps grands que dans les petits, et c'est cela qui explique — question que Sagredo avait posée quelque temps auparavant, et à laquelle il revient

²¹ Galilée *Op. Cit.* p. 56 [109].

²² Par exemple Brown affirme "Galileo's wonderful argument in the *Discorsi* to show that all bodies, regardless of their weight, fall at the same speed" (1991, *Op.cit.* p. 1). On *remarque* que Brown ne limite pas cette conclusion à des mobiles de même matière, mais au contraire il est explicite qu'elle est valable pour *tous les corps*. Cf. chapitre 4 et 5 pour une analyse détaillé de l'approche de Brown et de son analyse de cette expérience de pensée.

maintenant — : pourquoi un boulet de canon tombe-t-il plus vite qu'une balle de mousquet ? Le poids du corps, encore une fois, n'y est pour rien »²³

Que cette conclusion doive être comprise vis-à-vis de la proportionnalité linéaire de la vitesse et du poids soutenue par Aristote est tout aussi explicite dans le texte de Galilée. Il affirme à plusieurs reprises qu'il y a une petite différence de vitesse de chute entre mobile lourd et léger en chute libre dans un milieu plein comme l'air. Par exemple, Galilée fait soulever cette critique par Simplicio afin de donner à Salviati l'opportunité de répondre :

«SIMP. Votre raisonnement est fort bien conduit, en vérité; cependant. il me semble difficile de croire qu'une larme de plomb puisse tomber aussi vite qu'un boulet de canon.

SALV. Vous devriez dire : un grain de sable qu'une meule de moulin.

Mais je ne voudrais pas, seigneur Simplicio, qu'à l'instar de beaucoup d'autres, vous fassiez dévier notre discussion de son but principal pour vous attacher à une de mes paroles *qui s'écarterait d'un cheveu de la vérité*, et ainsi dissimuler sous ce cheveu l'insuffisance de tel autre, grosse comme un câble de navire. Aristote dit qu'une «boule de fer de cent livres, tombant de cent coudées, touche terre avant qu'une boule d'une livre ait parcouru une seule coudée », et je vous dis, moi, qu'elles arrivent en même temps; vous constatez, *en faisant l'expérience*, que la plus grande précède la plus petite de deux doigts, c'est-à-dire que quand celle-là frappe le sol, celle-ci s'en trouve encore à deux doigts ; *or, derrière ces deux doigts vous voudriez cacher les quatre-vingt-dix-neuf coudées d'Aristote*, et, parlant seulement de ma petite erreur, passer sous silence l'énormité de l'autre. (C'est nous qui soulignons).

Or, derrière ces deux doigts vous voudriez cacher les quatre-vingt-dix-neuf coudées d'Aristote. On voit bien que Galilée savait qu'en faisant réellement l'expérience on trouve une différence, mais elle est petite et ne suit nullement la proportionnalité linéaire d'Aristote, qui prédit une différence beaucoup plus grande. S'il y a une différence, elle n'est pas due à la différence de poids, surtout si on néglige l'effet de la résistance comme le fait Galilée dans son expérience de pensée. Cette différence est en fait due à l'effet de la résistance du milieu sur les surfaces différentes des deux mobiles. Comme le note Koyré ci-dessus « La résistance mécanique est, en effet, fonction du rapport de la surface du corps à *son poids* » (C'est nous qui soulignons), et donc celle ci est bien sûr lié à la différence entre les poids des mobiles. Mais pour Galilée, se ne sont que des facteurs *accidentels*, car si on néglige la résistance du milieu, la différence de poids ne peut pas causer une différence de la vitesse de chute, proportionnellement linéaire ou suivant une quelconque autre

²³ Koyré *Op. Cit.* p. 236. et Galilée *Op.cit.* p.74 [134].

fonction (cf. 5.2 pour l'analyse par Galilée des facteurs accidentels, et en particulier cf. 5.3 et 5.4 sur l'effet de la résistance du milieu sur les surfaces différentes des mobiles de même matière).

Galilée va explicitement mettre en évidence un des effets de la résistance du milieu sur un de ces facteurs accidentels, les différentes formes des mobiles, du fait qu'il considère la chute des mobiles dans le plein. Il propose ainsi un contre-exemple à l'égalité des vitesses de chute libre, celui de la feuille et du lingot d'or. En effet, l'égalité de chute ne s'obtient pas quand la forme des mobiles joue un rôle, comme l'indique Salviati :

Aristote déclare que des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu (et pour autant que le mouvement dépend du poids) avec des vitesses proportionnelles à leurs poids, et il illustre son affirmation avec des mobiles où la pure action de la gravité est seule perceptible, laissant de côté, comme peu importants, d'autres facteurs tels que les formes des mobiles, sur lesquels l'action du milieu peut être assez forte pour altérer l'effet de la seule gravité; et de fait on observe que l'or, le plus pesant de tous les corps, flotte dans l'air lorsqu'il est transformé en minces feuilles, ce que font également des pierres réduites en une fine poussière. Mais si vous voulez conserver à la proposition son universalité, vous devez montrer que la proportion des vitesses se retrouve dans tous les corps, et qu'une pierre de vingt livres se meut dix fois plus vite qu'une pierre de deux livres; ce qui, je vous le dis, est faux, car tombant d'une hauteur de cinquante ou de cent coudées, elles arrivent à terre en même temps. »²⁴

Que Galilée souhaite seulement critiquer la proportionnalité de la vitesse et du poids dans son expérience de pensée sans avoir à considérer l'effet de la résistance du milieu se reflète dans ce passage où il insiste sur le fait qu'il considère des mobiles « où la pure action de la gravité est seule perceptible ». Il savait bien que dans le plein, la résistance joue un rôle, mais il savait aussi que ce rôle ne sauve pas le principe de la proportionnalité linéaire de la vitesse et du poids. L'effet de la résistance du milieu sur la vitesse de chute ne sauve pas non plus la proportionnalité linéaire inverse de la vitesse et de la résistance, que Galilée considère par la suite en donnant plusieurs arguments en sa défaveur pour enfin arriver à sa théorie générale sur l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps *dans le vide* (cf. chapitre 5).

2.2.4 Conclusion

De cette expérience de pensée, Galilée peut conclure, et a en effet conclu, que la thèse de la proportionnalité de la vitesse et du poids, exprimée par le premier des deux principes de la théorie d'Aristote, est fautive. Si le poids des mobiles influençait proportionnellement la vitesse de chute, on pourrait imaginer un scénario qui aboutit à un résultat absurde où un mobile (le composé des deux

²⁴ Galilée, *Op.cit.* pp. 55-56 [109-110].

mobiles de même matière) pourrait être décrit comme se mouvant avec une vitesse à la fois plus grande et plus petite qu'un autre (le plus grand des deux mobiles).

Nous soutenons que la conclusion de Galilée doit être comprise de la façon suivante : la différence de poids des mobiles de même matière ne peut pas *causer* la différence de vitesse de chute de ces mobiles, car sinon on arriverait à l'absurdité décrite dans le résultat du scénario de l'expérience de pensée. Le premier principe de la théorie d'Aristote concernant la proportionnalité entre la vitesse de chute et le poids est donc faux. Que Galilée souhaite bien rechercher *les causes* de la différence de vitesse de chute de tous les mobiles, dans le plein et puis dans le vide, suite à sa réfutation de la théorie d'Aristote (et donc du poids comme cause de cette différence), sera analysé et défendu dans le chapitre 5. L'expérience de pensée sert uniquement à réfuter le poids comme cause de cette différence de vitesse de chute, quand elle existe, sans pour autant établir ou rejeter d'autres causes.

Notons enfin que cette expérience de pensée prend une place centrale dans le débat sur le pouvoir épistémique des expériences de pensée scientifiques (*cf.* chapitre 4). Malgré l'intérêt qu'elle a suscitée, la conclusion que Galilée a tirée, ou aurait pu tirer, de son expérience de pensée reste un sujet de controverses. Outre sa réfutation de la théorie d'Aristote, de son premier principe, Galilée était-il en mesure, par le *seul* moyen de son expérience de pensée, comme le soutient Brown par exemple, *d'établir* sa propre théorie sur l'égalité de la vitesse de chute de tous les corps dans le vide ? Une première réponse négative émerge de notre analyse dans cette section. On verra dans le chapitre 5 que le Galilée de 1590 conclut, après l'expérience de pensée de la tour de Pise, que la vitesse de chute, dans le plein et dans le vide, est proportionnelle au poids *spécifique*, c'est-à-dire dépend de la matière des mobiles. Cette deuxième analyse historique renforcera notre réponse négative en montrant que Galilée a en effet soutenu une autre conclusion que celle soutenu par Brown suite à la même expérience de pensée.

2.3 La boîte à photon d'Einstein et de Bohr

Aucune théorie scientifique n'a eu autant de critiques par la voie d'expériences de pensée que la mécanique quantique, plus précisément son interprétation dite de « Copenhague ». Cette interprétation, historiquement la première, est celle proposée par Niels Bohr, Werner Heisenberg et Max Born. Même s'ils ne défendaient pas tous trois la même interprétation, cette approche a cependant été appelée *l'*interprétation de Copenhague par leurs opposants, qui critiquaient ce qu'ils

avaient en commun. L'expérience de pensée de la boîte à photon, présentée dans cette section, fait partie de ces critiques contre l'interprétation de Copenhague. Elle fut présentée par Einstein lors d'une discussion au sixième congrès Solvay de 1930 et n'a donc pas figuré dans la publication des actes du congrès. Les congrès Solvay sont des conférences internationales en physique et en chimie qui, depuis 1911, se tiennent presque tous les trois ans à Bruxelles et qui ont largement contribué à l'avancement de la mécanique quantique au début du XX^e siècle. Le débat²⁵ entre Einstein et Bohr sur la mécanique quantique, riche en expériences de pensée²⁶, débuta durant le cinquième congrès Solvay de 1927 suite à leur rencontre. Dans cette section, on présentera une de ces expériences de pensée, celle de la boîte à photon.

Regardons auparavant la cible de l'expérience de pensée dans le cadre de la mécanique quantique. Elle porte sur le statut des relations d'indétermination. Le principe d'indétermination (on dit aussi « les relations d'indétermination »)²⁷, en mécanique quantique, fut énoncé pour la première fois par Werner Heisenberg en 1927²⁸. Ce dernier soutient que la mesure simultanée de deux variables conjuguées (comme la quantité de mouvement et la position ou l'énergie et le temps) pour une particule donnée entraîne une limitation de la précision de chacune de ces mesures. À savoir, plus on a de précision de la mesure d'une des variables conjuguées, moins on en a pour l'autre. Pour la position (q) et la quantité de mouvement (p), plus on a de précision de la mesure de la position, moins on en a pour la quantité de mouvement, et vice versa. Ce principe peut être exprimé par l'inégalité $\Delta p \cdot \Delta q > \hbar / 2$, où \hbar est la constante de Planck (h) réduite ($h/2\pi$) ; h exprime le seuil d'énergie minimum que l'on peut mesurer sur une particule et est égale à $6,63 \cdot 10^{-34}$ joules.secondes.

Einstein, selon les souvenirs de Bohr, présente l'expérience de pensée de la boîte à photon afin de

²⁵ Don Howard, Revisiting the Einstein-Bohr Dialogue, *Iyyun: The Jerusalem Philosophical Quarterly* 56, 2007, "Standard histories of the Einstein-Bohr debate have it beginning in earnest during the personal encounter between Einstein and Bohr at the 1927 Solvay meeting", p. 4.

²⁶ "A well-entrenched narrative tells the story of the Einstein-Bohr debate as one in which Einstein's tries, from 1927 through 1930, to prove the quantum theory incorrect via thought experiments exhibiting in-principle violations of the Heisenberg indeterminacy principle, only to have Bohr find the flaw in each, after which Einstein shifts his direction of attack, faulting the quantum theory now not as incorrect, but incomplete. In 1935, the Einstein, Podolsky, and Rosen (EPR) paper, [...] represents the high-water mark of this critique." *Ibid*, p. 1.

²⁷ Le statut de ces relations dans la mécanique quantique, ou la question de savoir si elles représentent un principe de la mécanique quantique ou non, ainsi que leur sens, restent un sujet largement débattu en philosophie des sciences qui mérite une thèse à part entière. En effet, Ernan McMullin a analysé dans sa thèse de doctorat en 1954 les « différents sens du "quantum principle of uncertainty" » (Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of QM in historical perspective*, John Wiley and Sons, 1974, p. 79). Ainsi je me contenterai d'exposer l'expérience de pensée sans entrer dans ce débat.

²⁸ Werner Heisenberg, 1927, Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Zeitschrift für Physik*, 43.

réfuter le principe d'indétermination pour l'énergie et le temps. « Selon Bohr », car comme la discussion durant les congrès n'est pas publiée, notre seule source primaire dans ce chapitre sera l'article de Bohr de 1949²⁹. Einstein s'y prend de la façon suivante : Il nous demande d'imaginer « le dispositif indiqué à la [Figure 2.1], consistant en une boîte [qui contient un certain nombre de radiations] avec un trou dans un de ses côtés, qui peut être ouvert ou fermé par un obturateur déplacé au moyen d'une horloge au sein de la boîte »³⁰. Puis il nous demande de commencer par peser la boîte, puis d'ouvrir le volet pendant un bref instant au cours duquel un seul photon peut s'échapper de la boîte, et enfin de peser de nouveau la boîte. L'horloge nous donne le temps de passage d'un photon, la balance nous donne la différence de masse de la boîte avant et après le passage d'un photon. En faisant usage de l'équation d'Einstein $E = mc^2$, on peut calculer l'énergie. Cette différence d'énergie, en conformité avec le principe de conservation de l'énergie, serait alors l'énergie du photon émis. Par conséquent, on peut en principe déterminer simultanément le temps de passage du photon à travers la fente et son énergie, et cela avec un degré de précision arbitrairement grand « en contradiction manifeste avec l'indétermination réciproque des quantités de temps et d'énergie dans la mécanique quantique »³¹.

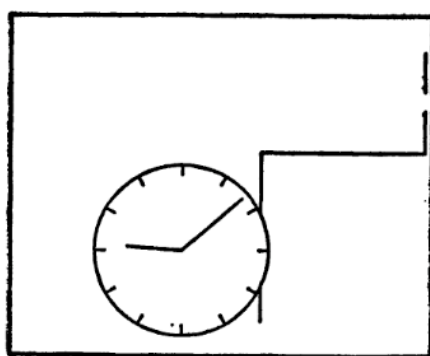


FIG. 7

Figure 2.1: La boîte à photon d'Einstein (Figure 7 dans Bohr 1949, *Op.cit.*)

Mais l'histoire selon Bohr continue par son triomphe ; en effet, il trouva une faille dans le

²⁹ Niels Bohr, 1949, Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics, dans Schilpp P.A. (ed.) ; *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*, Cambridge University Press, 1949, chapitre 7 pp. 199-241.

³⁰ "Einstein proposed the device indicated in Fig. 7 consisting of a box with a hole in its side, which could be opened or closed by a shutter moved by means of a clock-work within the box" ³⁰ Bohr, *Op.cit.* p. 225.

³¹ "in definite contradiction to the reciprocal indeterminacy of time and energy quantities in quantum mechanics." *Ibid.* p. 226.

raisonnement d'Einstein le lendemain de cette fameuse discussion³². Cette faille, selon Bohr, est dans le détail du dispositif imaginaire de la boîte à photon, en particulier les procédures de la pesée de la boîte et de la mesure du temps par l'horloge, ainsi que les théories qui décrivent le comportement de l'horloge. En supposant que l'horloge peut nous donner le temps exact de passage du photon par le trou de la boîte à l'instant de sa fuite, Einstein décrit en effet le comportement de cette horloge avec la théorie newtonienne. Or l'horloge se trouve dans un champ gravitationnel ; cependant la théorie classique ne prend pas en compte le ralentissement des horloges en déplacement dans ce champ gravitationnel. La réponse de Bohr consiste alors à expliciter la procédure de la pesée qui produira comme effet ce champ gravitationnel, son effet sur la mesure du temps fait par l'horloge dans la boîte, et à rappeler les théories qu'Einstein aurait dû utiliser pour décrire le comportement de cette horloge dans un champ gravitationnel. Pour montrer la faille dans le raisonnement d'Einstein, Bohr fait appel à la théorie de relativité. Il raisonne de la façon suivante :

« Cet argument constituait un grave défi et a donné lieu à un examen approfondi de l'ensemble du problème. À l'issue de la discussion [...] il est devenu clair, cependant, que cet argument ne pouvait être maintenu.

[...]

En effet, dans l'examen du problème, [...] il est essentiel de tenir compte de la relation entre la fréquence d'une horloge et sa position dans un champ gravitationnel, bien connue par [la formule du] décalage vers le rouge [...].

Notre discussion a tourné autour de la possibilité de l'utilisation d'un appareil incorporant le dispositif d'Einstein dessiné dans la [Figure 2.1] dans le même style pseudo-réaliste que les précédentes figures. La boîte, dont un segment est montré pour exposer son intérieur [dans la Figure 2 ci-dessous], est suspendue à un peson à ressort et est munie d'un pointeur pour lire la position sur une échelle fixée sur le support du peson. La pesée de la boîte peut ainsi être effectuée avec une précision donnée Dm si on règle la balance à sa position zéro au moyen de charges appropriées. Le point essentiel est maintenant que toute détermination de cette position avec une précision donnée Dq impliquera une indétermination minimale Dp dans le contrôle de la quantité de mouvement de la boîte reliée à Dq par la relation (3) [la relation d'indétermination sur la position et la quantité de mouvement]. Cette indétermination doit évidemment être encore plus petite que l'impulsion totale qui, pendant tout l'intervalle T de la procédure d'équilibrage, peut être donnée par le champ gravitationnel à un corps ayant une masse Dm , ou

$$Dp \text{ approx} = h / Dq T \cdot g \cdot Dm, \quad (6)$$

où g est la constante de gravité. Plus grande est la précision de q donnée par une lecture du pointeur, plus grand sera l'intervalle de temps d'équilibrage T , si une précision donnée Dm du pesage de la boîte avec son contenu doit être obtenue.

³² “After a sleepless night over this argument Bohr rebutted Einstein's challenge with Einstein's own general theory of relativity” Jammer *Op.cit* p. 134.

Maintenant, d'après la théorie de la relativité générale, une horloge, lorsque elle est déplacée dans la direction de la force de gravité par une quantité Dq , va changer sa fréquence de manière telle que sa lecture

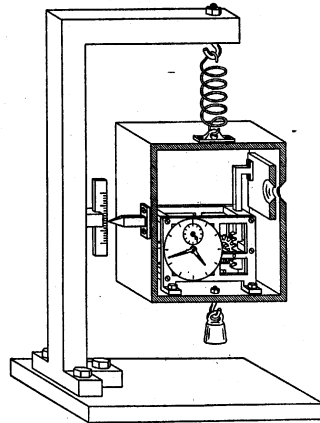


FIG. 8

[Figure 2.2: La boîte à photon “pseudo-réaliste” selon Bohr]

au cours d'un intervalle de temps T différera d'un montant DT donnée par la relation

$$DT / T = (1/c^2) g Dq . \quad (7)$$

En comparant (6) et (7), on verra donc qu'après la procédure de pesage il y aura dans notre connaissance de l'ajustement de l'horloge une indétermination de

$$DT > h / (c^2 Dm) ,$$

Avec la formule (5) [$E = mc^2$], cette relation conduit à nouveau à

$$DT \cdot DE > h,$$

en conformité avec le principe d'indétermination. Par conséquence, une utilisation de l'appareil comme moyen de mesurer l'énergie du photon avec précision nous empêchera de contrôler le

moment de sa fuite. »³³

Bohr, dans cette longue citation, analyse l'expérience de pensée d'Einstein en explicitant la procédure de la pesée de la boîte et son effet sur la mesure du temps lors du passage du photon avec l'horloge. Comme cette procédure de pesée, décrite par Bohr dans son texte et avec la Figure 2.2 « pseudo-réaliste », implique que la boîte à photon se déplace dans un champ gravitationnel et donc, selon la théorie de la relativité d'Einstein, on aura une indétermination dans la mesure du temps qui est produite par le déplacement de l'horloge dans ce champ gravitationnel. Ce changement concernant la théorie applicable à l'appareil imaginaire permet à Bohr de retrouver la relation d'indétermination pour les variables de temps et d'énergie.

On remarquera enfin que Bohr utilise la relation d'indétermination pour les variables de position et de quantité de mouvement quand il fait appel ci-dessus à la relation (3).

³³ "This argument amounted to a serious challenge and gave rise to a thorough examination of the whole problem. At the outcome of the discussion, [...], it became clear, however, that this argument could not be upheld. In fact, in the consideration of the problem, [...] it was essential to take into account the relationship between the rate of a clock and its position in a gravitational field well known from the red-shift.

Our discussion concentrated on the possible application of an apparatus incorporating Einstein's device and drawn in Fig. 8 in the same pseudo-realistic style as some of the preceding figures. The box, of which a section is shown in order to exhibit its interior, is suspended in a spring-balance and is furnished with a pointer to read its position on a scale fixed to the balance support. The weighing of the box may thus be performed with any given accuracy Dm by adjusting the balance to its zero position by means of suitable loads. The essential point is now that any determination of this position with a given accuracy Dq will involve a minimum latitude Dp in the control of the momentum of the box connected with Dq by the relation (3). This latitude must obviously again be smaller than the total impulse which, during the whole interval T of the balancing procedure, can be given by the gravitational field to a body with a mass Dm , or

$$Dp \text{ approx} = h / Dq T \cdot g \cdot Dm, \quad (6)$$

where g is the gravity constant. The greater the accuracy of the reading q of the pointer, the longer must, consequently, be the balancing interval T , if a given accuracy Dm of the weighing of the box with its content shall be obtained.

Now, according to general relativity theory, a clock, when displaced in the direction of the gravitational force by an amount of Dq , will change its rate in such a way that its reading in the course of a time interval T will differ by an amount DT given by the relation

$$DT / T = (1/c^2) g Dq, \quad (7)$$

By comparing (6) and (7) we see, therefore, that after the weighing procedure there will in our knowledge of the adjustment of the clock be a latitude

$$DT > h / (c^2 Dm),$$

Together with the formula (5), this relation again leads to

$$DT \cdot DE > h,$$

in accordance with the indeterminacy principle. Consequently, a use of the apparatus as a means of accurately measuring the energy of the photon will prevent us from controlling the moment of its escape." Bohr, *Op.cit* p. 226-228.

En conclusion, comment doit-on analyser cet épisode où deux scientifiques utilisent ce qui semble être une même expérience de pensée mais avec deux conclusions différentes et contradictoires ? On reviendra sur cette question dans le chapitre 7. Mais notons qu'il existe aussi deux interprétations de la conclusion de l'expérience de pensée d'Einstein. On a vu que dans l'interprétation présentée dans cette section, « l'interprétation contre la cohérence », publiée par Bohr en 1949 et défendue par Jammer, Einstein visait le principe d'indétermination de Heisenberg pour exhiber une contradiction au sein de la mécanique quantique. Selon l'autre interprétation, « l'interprétation contre la complétude », celle présentée par Ehrenfest dans une lettre à Bohr de 1931 et défendue par Don Howard³⁴, Einstein viserait en fait à réfuter la complétude de la mécanique quantique. Cette incomplétude de la mécanique quantique fera l'objet d'autres expériences de pensée et d'arguments, notamment par Einstein (*cf.* 7.6 pour une analyse de l'argument et de l'expérience de pensée EPR et de cette interprétation de la boîte à photon contre la complétude de la mécanique quantique.) et, comme on le verra dans la section suivante, par Erwin Schrödinger.

2.4 Le Chat de Schrödinger

La question de savoir si la mécanique quantique est une théorie complète, au sens où elle offrirait une description complète de la réalité physique, ou bien si la description offerte par cette dernière est partielle et laisse de côté certains détails, a fait couler beaucoup d'encre. Elle a fait couler beaucoup d'encre et a excité l'imagination des physiciens : en effet, les attaques contre la complétude de la mécanique quantique s'appuient principalement sur des expériences de pensée. On a conclu à la section précédente qu'une des interprétations de la boîte à photon visait l'absence de complétude et non pas l'incohérence de la mécanique quantique. L'exemple qu'on analysera dans cette section est celui d'Erwin Schrödinger, à savoir l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. Même si cet exemple est souvent cité en relation avec le problème de la mesure en mécanique quantique, Schrödinger visait aussi, si ce n'est principalement, la complétude de la mécanique quantique³⁵.

Commençons par examiner l'expérience de pensée pour l'analyser par la suite. Schrödinger va soutenir que la mécanique quantique offre une « image floue » de la réalité physique et qu'elle

³⁴ Don Howard 1985, 1990 et 2007.

³⁵ *Cf.* l'analyse d'Arthur Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, 1986, où il analyse la correspondance entre Schrödinger et Einstein concernant la complétude de la mécanique quantique et conclut qu'elle montre que "Schrödinger's cat and Einstein's similar example not as pointed to the measurement problem but rather as new versions of EPR. They are indeed arguments for incompleteness that bypass the need for an additional premise having to do with locality (or separation) [c'est une référence explicite aux arguments et expériences de pensée contre la complétude d'Einstein]", p. 6.

est donc *incomplète*. Il propose d'imaginer le scénario suivant :

« Un chat est enfermé dans une enceinte d'acier avec le dispositif infernal suivant (qu'il faut soigneusement protéger de tout contact direct avec le chat) : un compteur Geiger est placé à proximité d'un minuscule échantillon de substance radioactive, si petit que, durant une heure, il se peut qu'un seul des atomes se désintègre, mais il se peut également, et avec une égale probabilité, qu'aucun ne se désintègre ; en cas de désintégration, le compteur crépite et actionne, par l'intermédiaire d'un relais, un marteau qui brise une ampoule contenant de l'acide cyanhydrique. Si on abandonne ce dispositif à lui-même durant une heure, on pourra prédire que le chat est vivant à condition que, pendant ce temps, aucune désintégration ne se soit produite. La première désintégration l'aurait empoisonné. La fonction ψ de l'ensemble exprimerait cela de la façon suivante : en elle, le chat vivant et le chat mort sont (si j'ose dire) mélangés ou brouillés en proportions égales.

De telles situations ont ceci de particulier qu'à une indétermination initialement limitée au domaine atomique est associée une indétermination macroscopique qu'il est possible de *lever* par l'observation directe. Voilà qui nous empêche d'accepter de manière naïve qu'un modèle flou puisse représenter la réalité. En soi, cela n'a rien de confus ni de contradictoire. Il y a une différence entre une photographie prise en bougeant ou avec une distance mal réglée, et un cliché représentant des nuages ou une nappe de brouillard. »³⁶

Cette expérience de pensée apparaît dans l'article de Schrödinger du 29 novembre 1935 intitulé « La situation actuelle en mécanique quantique ». Schrödinger analyse, comme son titre l'indique, la situation de la mécanique quantique. Il introduit l'expérience de pensée du chat dans la partie 5 intitulée « Les variables sont-elles réellement floues ? » et l'utilise afin de répondre à cette question par la négative. Schrödinger introduit dans cette section la notion de fonction d'onde ou d'état, ψ , même si son analyse n'est faite qu'à la partie 7 du même article. Ce sont ses propres idées des années 1926-1927 que Schrödinger de 1935 critique, comme il le disait à Einstein dans une lettre du 19 Août 1935 : « Il y a longtemps déjà que j'ai dépassé le stade où je me disais que la fonction ψ pouvait être considérée, plus ou moins, comme une représentation directe de la réalité. »³⁷ Puis Schrödinger continue la lettre avec une description presque identique, à quelques détails près, de l'expérience de pensée du chat.

Ce sont l'interprétation de la fonction ψ et la question de savoir si elle représente ou non une réalité physique qui sont au centre de cette expérience de pensée. Avant d'analyser l'expérience de pensée, examinons plus précisément cette fonction ψ . L'état d'un système quantique, quel qu'il soit (un électron ou plusieurs atomes), est décrit par cette fonction ψ qui est un vecteur dans un espace de

³⁶ Erwin Schrödinger, 1935, Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik » *Naturwissenschaften*, 23, pp. 807-812, 823-828, 844-849. Traduction française Michel Bitbol, 1992, *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil, p. 106-107. En fait ce n'est pas un article mais un exposé en trois livraisons.

³⁷ Michel Bitbol *Op.cit* p. 156 note 45.

Hilbert. Une particularité de la mécanique quantique est que dans son cadre, un état quantique peut consister en la superposition de plusieurs états. Pour le cas d'un atome radioactif, que Schrödinger utilise dans l'expérience de pensée du chat, la fonction ψ de l'atome après une heure sera la superposition des deux états *stable* et *désintégré* ; notons cet état superposé « stable/désintégré ».

À ce point, il faut souligner aussi qu'un état quantique décrit par la fonction ψ peut évoluer dans le temps de deux façons différentes : une évolution de type 1 concerne son évolution dans le temps quand il est laissé à lui même ou quand il interagit avec quelques particules ; elle est donnée par l'équation de Schrödinger, une équation différentielle *déterministe*. Une évolution de type 2 se produit quand on effectue une mesure d'une variable (ou observable), comme la position, par exemple. On dit que suite à cette mesure, la fonction d'onde « se réduit » et l'on obtient alors une valeur déterminée (« sharp » en anglais) pour la variable mesurée. La fonction ψ , ou le carré de son module pour être précis, ne permet de calculer que les différentes probabilités des différentes valeurs qu'une variable donnée peut avoir à un instant donné. Si l'on s'intéresse à la position par exemple, la fonction ψ nous dit qu'on peut trouver le système dans plusieurs positions avec différentes probabilités pour chacune (données par la règle de Born) à un instant t . Quand on effectue la mesure de position, la fonction d'onde se réduit à l'une de ces valeurs. Ainsi les prédictions de cette théorie, contrairement à la mécanique classique, sont *probabilistes*.

Maintenant, selon l'interprétation de Copenhague, cet aspect probabiliste doit être compris objectivement, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible d'ajouter quoi que ce soit à notre connaissance de l'état pour rendre les prédictions certaines. Cette incertitude n'est pas le fruit de notre ignorance mais du caractère fondamentalement indéterministe du monde quantique. Ce caractère indéterministe est le résultat de l'évolution de type 2, celui de la mesure, vu que l'évolution de type 1 est bien déterministe.

Revenons à notre expérience de pensée et au malheureux chat. Schrödinger questionne cette interprétation objective de cette incertitude. Arthur Fine résume ce questionnement de la façon suivante : « Schrödinger nous demande s'il faut penser la fonction ψ comme spécifiant une réalité floue pour les observables quantiques, comparable à la façon dont un état classique peut être considéré comme spécifiant des valeurs numériques déterminées pour toutes les observables classiques. »³⁸ La réponse de Schrödinger est négative et il va chercher à montrer, par le biais de son expérience de pensée, que si la fonction ψ décrit une réalité elle-même floue, on peut alors

³⁸ Arthur Fine, *Op.cit* p. 64. Traduit par l'auteur "Schrödinger asks whether we should think of the ψ -function as specifying a fuzzy reality for the quantum observables in a way comparable to how a classical state can be thought of as specifying numerically sharp values for all the classical observables."

envisager des situations où ce flou contaminera des objets macroscopiques, comme le chat.

Schrödinger attaque dans son expérience de pensée l'interprétation de Copenhague, qui propose de comprendre la fonction ψ de l'atome en superposition stable/désintégré au niveau microscopique comme reflétant une réalité floue ; « des nuages ou une nappe de brouillard ». Il soutient au contraire que ce flou est dans la description ou l'image comme « une photographie prise en bougeant ou avec une distance mal réglée ». Ainsi l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique doit être incomplète, car la réalité n'est pas floue, sinon on peut avoir un résultat tout à fait bizarre pour le chat ; à savoir un chat dans un état superposé de vie et de mort, ce qui est absurde selon Schrödinger.

Cette expérience de pensée met en évidence au moins un autre aspect problématique de la mécanique quantique. En fait, cet état superposé du chat est une conséquence directe du formalisme quantique. La fonction ψ d'un état superposé évolue dans le temps en suivant l'évolution de type 1 si le système ne subit pas de mesure. Cette évolution conserve aussi ce caractère superposé au cours du temps. Quand cette particule dans un état superposé interagit avec d'autres particules, ces dernières passent aussi à un état de superposition. Comme le chat est composé de plusieurs particules, alors l'état du chat devient superposé. Cette description d'un chat superposé qu'« il est possible de lever par l'observation directe », contredit ce que Jammer appelle « principe de distinction d'état ou brièvement PDE : Les états d'un système macroscopique pouvant être distingués par une observation macroscopique sont distincts les uns des autres qu'ils soient observés ou non. [...] et l'on déduit de l'expérience de pensée du chat que] la description de la réalité physique par la mécanique quantique n'est pas complète. »³⁹ Le fait que cette indétermination, que ce soit au niveau microscopique ou macroscopique, disparaisse quand on observe, met en évidence un autre problème de la mécanique quantique, celui de la mesure.

Ce problème de la mesure émane du fait que la fonction ψ peut évoluer de deux façons différentes, mais qu'il manque un principe pour décider laquelle va avoir lieu. Le plus qu'on peut dire est que, quand on effectue une mesure, le système entreprend une évolution de type 2, sinon il évolue d'une façon déterministe en suivant l'équation de Schrödinger, une évolution de type 1. Or le système quantique n'est pas en mesure de savoir s'il va ou non être mesuré, et donc s'il doit entreprendre une évolution déterministe et continue de type 1 ou indéterministe et discontinue de type 2. Le

³⁹ “the principle of state distinction,” or briefly PSD: states of a macroscopic system which could be told apart by a macroscopic observation are distinct from each other whether observed or not. [...] hence the quantum mechanical description of physical reality is not complete.” Jammer, *Op. cit* p. 216.

problème est que la mécanique quantique n'offre pas de définition claire de ce qu'est une mesure et des circonstances dans lesquelles il faut appliquer l'une ou l'autre règle d'évolution. En d'autres termes, comment est-il possible de réconcilier les deux descriptions suivantes offertes par la mécanique quantique ? Son évolution selon la règle de type 1 qui le décrit dans un état de superposition et son évolution selon la règle de type 2 qui le décrit dans un état bien déterminé, ou bien mort ou bien vivant, suite à une observation. Norton analyse cette expérience de pensée comme étant au centre « de ce problème de mesure. Il dépend du fait qu'un système quantique peut évoluer de deux façon [...] Ce que Schrödinger a réalisé c'est qu'il y a de l'arbitraire dans notre division entre l'évolution de Schrödinger [type 1] et la réduction du paquet d'onde [type 2]. [...] Ce qui décide en dernier lieux si le chat est mort ou vivant est notre observation [...] C'est un sentiment largement répandu qu'il y a quelque chose de faux dans une théorie qui permet à l'observation de jouer un rôle si important. La plupart des gens ont un sens instinctif que la réalité de la vie ou de mort pour le chat n'est pas décidée uniquement par notre observation. »⁴⁰ Si cela est vrai et que la mesure joue un rôle si décisif dans cette théorie, alors il est nécessaire d'avoir une réponse claire à la question de savoir ce qui compte comme une opération de mesure. Une question qui s'avère être l'un des problèmes les plus difficiles dans la mécanique quantique.⁴¹ Ce problème de mesure met en évidence une autre fonction de cette expérience de pensée, la fonction d'*exploration théorique*. Elle sera discuté dans le chapitre suivant.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé trois expériences de pensée utilisées par leurs auteurs dans un but critique que nous avons appelé « fonction de réfutation ». Cette fonction de réfutation doit être comprise au sens large du terme afin de nous permettre de catégoriser les expérience de pensée de la tour de Pise et de la boîte à photon d'un côté, et celle du chat de Schrödinger⁴² de l'autre, sous la

⁴⁰ John D. Norton, *Einstein for everyone*, Nullarbor Press, 2007 Webbook chapitre 36, http://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/quantum_theory_measurement/index.html. Traduit par l'auteur "the measurement problem. It depends on the fact that a quantum system can evolve in time in two ways.[...] What Schroedinger realized was that there was quite some arbitrariness in our division between Schroedinger evolution and wave collapse [...] What finally decides whether the cat is alive or dead is our observation [...] There is a widespread sense that there is something wrong with a theory that allows observation to play such an important role. Most people have an instinctive sense that the fact of life or death for the cat is not decided merely by our observation."

⁴¹ Huw Price, Einstein and the quantum spooks, dans C. Stewart & R Hewitt (eds.), *Waves of the Future* (Science Foundation for Physics, 2005), 221-233. Traduit par l'auteur " 'What counts as a measurement?' turns out to be one of the hardest problems to answer in quantum mechanics. Today, it is called the Quantum Measurement Problem. Many people think that it still doesn't have a satisfactory solution (although this is a controversial issue)." p. 224.

⁴² En fait ce problème mérite aussi d'apparaître dans le chapitre 3 de cette thèse comme relevant de la fonction d'exploration puisqu'on peut comprendre Schrödinger comme explorant le statut de la fonction ψ dans la mécanique quantique.

même fonction. Comme on l'a vu, cette dernière ne vise pas à réfuter la mécanique quantique mais uniquement sa complétude. Réfuter une théorie, dans un sens restreint, revient à montrer une contradiction en son sein et mènera à la rejeter, comme dans le cas d'Einstein et de Galilée. Dans un sens large, la fonction de réfutation d'une expérience de pensée doit être comprise d'une façon telle qu'elle permette aux expériences de pensée qui ne visent qu'à soulever certains problèmes au sein d'une théorie, sans pour autant la rejeter, d'y figurer. Nous définissons ainsi cette fonction de réfutation, car dans ces expériences de pensée, le scientifique vise à faire apparaître un résultat absurde⁴³. Cette absurdité va lui permettre de « réfuter » la cible théorique visée par son expérience de pensée ; la chute d'un mobile plus rapidement et plus lentement qu'un même autre amène Galilée à réfuter la théorie d'Aristote en réfutant son premier principe, et la situation d'un chat mort et vivant amène Schrödinger à réfuter la complétude de la mécanique quantique.

Finalement il faut noter que la fonction d'au moins deux de ces trois expériences de pensée ne s'arrête pas à la réfutation. Même si c'est là leur fonction principale, elles ont aussi une fonction *d'exploration théorique*, qu'on abordera dans le chapitre suivant. Dans le cas de Galilée, la réfutation de la théorie d'Aristote avec son expérience de pensée sera suivie directement d'une *exploration théorique* basée sur cette conclusion et qui va lui permettre d'argumenter en faveur de sa théorie de la vitesse de chute, dans ses deux versions de 1590 et 1638 (*cf.* chapitre 5). L'exploration théorique du concept de mesure dans le cadre de la mécanique quantique suit directement la conclusion de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. On peut aussi dire que la conclusion concernant l'incomplétude de la mécanique quantique ouvre une piste d'exploration théorique d'une future théorie complète (celle des variables caché par exemple). Même la boîte à photon d'Einstein, au cas où ce dernier aurait été fondé, grâce à son expérience de pensée, à réfuter l'interprétation de Copenhague, aurait peut être eu une conséquence d'exploration théorique afin d'explorer comment remplacer cette interprétation. Dans le chapitre suivant, on analysera quatre expériences de pensée dont la fonction principale sera celle de l'exploration théorique, même si au passage elles réfutent un aspect de la théorie.

⁴³ Certaines expériences de pensée visent à montrer une absurdité mais uniquement dans le but de montrer que ce n'en est pas une. Les jumeaux de Langevin en sont un exemple car cette expérience de pensée ne réfute pas la théorie de relativité mais plutôt montre que l'absurdité n'est en effet qu'une pseudo-absurdité. Par conséquent cette expérience de pensée n'a pas de fonction réfutationnelle comme on le verra dans le chapitre 3.

Chapitre 3

L'Exploration théorique

3.1 Introduction

Nous avons examiné dans le précédent chapitre trois expériences de pensée dont la fonction pour leurs auteurs peut être qualifiée de négative, celle de la réfutation. Dans ce chapitre nous aborderons une fonction des expériences de pensée qu'on peut qualifier de positive, celle de l'exploration théorique. Ici encore, nous nous appuyons presque uniquement sur les textes originaux de leurs auteurs, pour ne mettre l'accent que sur le but visé par chacun d'eux à travers son expérience de pensée. Certaines expériences de pensée sont conçues par les scientifiques pour explorer une théorie ou un aspect théorique, comme la signification ou la portée d'un principe, d'une loi ou d'un concept. Cette exploration peut précéder la formulation bien définie et bien articulée d'une théorie ou lui succéder.

Dans le premier cas l'expérience de pensée précède la formulation précise et bien articulée d'une théorie. Le scientifique, par le biais de son expérience de pensée, imagine un scénario et explore, pour ainsi dire, un cadre théorique précis. Le but du scientifique n'est pas ici de réfuter une théorie, même si comme on le verra dans les deux cas examinés dans ce chapitre il va en fait réfuter une interprétation d'une loi (dans le cas du démon de Maxwell) ou rejeter une notion théorique, le mouvement absolu (dans le cas de l'ascenseur d'Einstein), mais d'explorer de nouvelles voies théoriques.

Pour illustrer et analyser cette fonction d'exploration, nous analyserons deux expériences de pensée qui précèdent l'articulation d'une théorie. D'abord, l'expérience de pensée du démon de Maxwell (3.2), formulée en 1867 dans une lettre de Maxwell à Peter Guthrie Tait et puis plus formellement en 1871 dans son livre *La Chaleur*⁴⁴, dans le but de montrer la nature statistique de la deuxième loi de la thermodynamique. La seconde est l'expérience de pensée d'Einstein⁴⁵

⁴⁴ James Clerk .Maxwell, 1891, *Op.cit.*

⁴⁵ Albert Einstein, 1907, p. 66-70; Einstein and Infeld, 1938, pp. 230-35

communément appelée « l'ascenseur d'Einstein » (3.5) ; elle a permis d'illustrer le *principe d'équivalence* entre la gravité et l'accélération (ou de leur référentiel). Ce dernier devient par la suite la base de la nouvelle théorie de la gravité, la théorie de la relativité générale. Ainsi débute pour Einstein l'exploration d'une nouvelle théorie, la relativité générale ; son articulation va prendre huit ans.

Dans le deuxième cas, cette exploration théorique succède à la formulation bien articulée d'une théorie, et ce dans le but de l'exposer. Nous analyserons deux expériences de pensée illustrant ce cas : le boulet de canon de Newton (3.4), publié à la fin des *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*⁴⁶, (dorénavant *Principia*) et les jumeaux de Langevin. Newton, dans cette expérience de pensée, a pour but d'exposer que le mouvement de projectiles terrestres et la rotation orbitale des planètes, en particulier la rotation de la Lune autour de la Terre, obéissent aux mêmes lois de la mécanique et sont unifiées par sa théorie : les objets terrestres et les objets célestes obéissent aux mêmes lois, contrairement à ce qui était soutenu par Aristote. L'expérience de pensée des jumeaux de Langevin (3.6), présentée lors du Congrès international de Philosophie de Bologne en 1911 et publiée ensuite dans « L'évolution de l'espace et du temps »⁴⁷, a pour but d'exposer la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, en particulier l'effet de la dilatation du temps.

3.2 Le Démon de Maxwell

Aucune autre expérience de pensée n'a attiré autant d'intérêt scientifique et philosophique que celle du démon de Maxwell⁴⁸. L'intérêt scientifique de cette expérience de pensée réside d'abord dans les différentes formes qu'a prises cette expérience de pensée, avec différents buts, depuis sa conception par James Clerk Maxwell en 1867. Le démon a subi une telle métamorphose que les théoriciens de l'informatique quantique y font désormais appel. Son évolution et sa métamorphose durant le XX^e siècle sont étroitement liées à la naissance d'une nouvelle branche scientifique liant la thermodynamique à l'informatique, à savoir la thermodynamique de l'information⁴⁹. Ensuite,

⁴⁶ Isaac Newton, 1726, *Mathematical principles of natural philosophy*, Traduit par Andrew Motte, 1846, To which is added Newton's System of the World.

⁴⁷ Paul Langevin, 1911, L'Évolution de l'espace et du temps, *Scientia* 10: 31–54.

⁴⁸ La préface de la seconde édition du volumineux livre sur le sujet commence ainsi "Since publication of the first edition ... 13 years ago, more new relevant bibliographic references were generated than in the 120 years of Maxwell's demon's life!" Leff, Harvey S. and Rex, Andrew, 2003, *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.

⁴⁹ Cf. Léo Szilard en 1929, Léon Brillouin 1949, Rolf Landauer 1960 et Charles Bennett 2003.

malgré cet intérêt scientifique, cette expérience de pensée, dans la version originale de Maxwell ainsi que dans celles développées depuis, ne trouve pas la place qu'elle mérite dans le débat épistémologique sur les expériences de pensée. Même si dans la littérature philosophique générale elle est longuement analysée⁵⁰, rares sont les philosophes qui ont utilisé cet exemple dans leurs approches épistémologiques⁵¹. Nous soutenons et nous montrerons dans ce chapitre qu'elle remplit une fonction cruciale, celle de l'exploration théorique. La subtilité de cette expérience de pensée, relative en particulier au rôle du démon, à la notion de possibilité à laquelle renvoie son scénario (*cf.* partie III) ainsi qu'à la conclusion concernant la nature statistique de la deuxième loi de la thermodynamique, se révèle, à notre avis, être la raison pour laquelle elle n'a pas eu la place qu'elle mérite dans ce débat.

Dans cette section nous présenterons l'expérience de pensée du démon selon Maxwell et les conclusions qu'il en tire. Dans la section 3.2.1, nous situerons l'expérience de pensée dans son contexte historique, c'est-à-dire dans la discussion sur le cadre atomiste de la conception de la matière avec la théorie cinétique et au début du développement de la mécanique statistique. C'est bien ce cadre historique qui nous permettra de comprendre la conclusion de Maxwell concernant la « nature statistique » de la deuxième loi de la thermodynamique. Dans la section 3.2.2, nous exposerons l'expérience de pensée du démon de Maxwell publiée en 1871. Dans la section 3.2.3, nous analyserons la conclusion de Maxwell sur la nature statistique de la deuxième loi de la thermodynamique, pour enfin conclure, dans la section 3.2.4, sur sa fonction d'exploration théorique ; Maxwell, en affirmant que la deuxième loi est de nature statistique, sans pour autant proposer une formulation précise de cette dernière, ouvre une voie pour l'exploration théorique de sa forme statistique, forme qui reste jusqu'à nos jours au centre de nombreux débats.

⁵⁰ On notera qu'elle est longuement analysée par Norton, un des protagonistes de ce débat, sans pour autant qu'il fasse un lien entre ce cas d'étude et son approche épistémologique sur les expériences de pensée. Les travaux de Norton sur le démon de Maxwell s'inscrivent dans ce qu'on appelle le débat sur l'exorcisme applicable au démon de Maxwell. C'est-à-dire sur les différentes tentatives de montrer si un démon peut réussir à contourner la deuxième loi, la nature d'un tel démon, la forme de la deuxième loi et enfin les raisons de l'éventuel échec du démon à contourner une interprétation de la deuxième loi.

⁵¹ Roy Sorensen et Brown sont deux exceptions, mais ils abordent marginalement cet exemple. Norton a longuement analysé et écrit sur le démon de Maxwell et son évolution sans pour autant en tirer des conclusions relatives au débat sur les expériences de pensée ou sur son approche épistémologique des expériences de pensée.

3.2.1 Le contexte historique : La thermodynamique rencontre la théorie cinétique

Pour comprendre le but de Maxwell et donc la fonction de l'expérience de pensée du démon, il faut se situer à cette époque du XIX^e siècle, où l'on s'intéresse sérieusement à la conception atomiste de la matière en général et des gaz en particulier. Comme la thermodynamique s'est développée sans se préoccuper de la conception de la matière, elle va se trouver en tension avec la nouvelle théorie cinétique des gaz qui visait à expliquer le comportement des gaz par le *mouvement* des molécules dans le vide. Rétrospectivement, on peut affirmer que ce qui manquait avant Maxwell, c'est une approche statistique pour décrire ce comportement. En fait, le développement de la théorie cinétique, surtout par Rudolf Clausius, supposait que toutes les molécules dans un gaz homogène à une température donnée ont la même vitesse. C'est Maxwell qui en 1860⁵² lui donnera sa forme entièrement statistique quand il affirmera que les collisions entre molécules produisent une distribution statistique des vitesses qui suit la loi de Gauss. Par conséquent, les molécules dans un gaz en équilibre thermique auront différentes vitesses et ainsi différentes énergies cinétiques : un gaz à n'importe quelle température, élevée ou basse, aura des molécules lentes et des molécules rapides. Les conséquences de cette affirmation, surtout sur la deuxième loi de la thermodynamique, seront explorées par Maxwell à l'aide de son expérience de pensée du démon. Avant d'aborder cette dernière, jetons un regard sur le développement de la thermodynamique et le statut de ses lois.

Maxwell retrace de la façon suivante le développement de la thermodynamique depuis Sadi Carnot (1824)⁵³, dans le paragraphe qui précède une introduction implicite de son démon. Il commence par en énoncer les lois dans le but de les comparer :

« Le principe de conservation de l'énergie, dans son application à la chaleur, est communément appelé la *première loi de la thermodynamique*. Il peut être énoncé comme suit : quand du travail est transformé en chaleur, ou de la chaleur en travail, la quantité de travail est équivalente à la quantité de chaleur.

Le principe de Carnot ne se déduit pas de cette loi, [il] repose sur un principe plus général qui est appelé la *seconde loi de la thermodynamique*.

Étant admis que la chaleur est une forme de l'énergie, il est établi, d'après cette seconde loi, qu'il est impossible que dans les phénomènes de la nature, sans intervention extérieure, une partie quelconque de la chaleur d'un corps soit transformée en travail mécanique, excepté dans le cas où la chaleur passe d'un corps dans un autre corps à plus basse température.

Clausius [...] énonce cette loi comme suit :

⁵² James Clerk Maxwell, Illustrations of the Dynamical Theory of Gases, *Philosophical Magazine* XIX, 1860, pp. 19-32; XX, 1860, pp. 21-37.

⁵³ Sadi Carnot, 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, Imprimerie Guiraudet.

Il est impossible à une machine fonctionnant d'elle-même, sans être soumise à une action extérieure quelconque, de faire faire passer de la chaleur d'un corps à un autre corps à une température plus élevée [...] »⁵⁴

Dans ce petit paragraphe Maxwell expose en quelques lignes les deux lois de la thermodynamique classique, ou phénoménologique. Phénoménologique, car elle ne prend pas en compte la constitution de la matière et repose sur deux lois empiriques, elle bénéficie alors d'une importante confirmation empirique. Tandis que la première loi nous dit qu'on a toujours une équivalence entre la quantité de chaleur dépensée et la quantité de travail fournie, c'est-à-dire qu'on ne peut jamais avoir du travail gratuit, la deuxième loi nous dit que pour obtenir de l'énergie en forme de travail, la chaleur doit toujours circuler d'un réservoir chaud vers un réservoir froid, et jamais l'inverse. Mais examinons de manière plus précise cette deuxième loi et son développement. Comme le note Maxwell, elle trouve son origine dans le principe de Carnot, et il l'énonce, quelque pages auparavant, de la façon suivante : « [S]i une machine réversible donnée, marchant entre la température plus haute T et la température plus basse T_0 , et recevant une quantité Q de chaleur à la température T , produit une quantité $[W]$ de travail mécanique, aucune autre machine, quelle que soit sa construction, ne peut produire une plus grande quantité de travail, en empruntant la même quantité de chaleur entre les mêmes températures. »⁵⁵

Le principe de Carnot fut formulé avant la théorie de la thermodynamique et dans le contexte de la théorie calorique de la chaleur qui décrivait la chaleur comme une substance indestructible, le calorique. Cette théorie considérait que la chaleur, par analogie avec un fluide, était une substance qui ne pouvait qu'être soit ajoutée à un corps, soit enlevée d'un corps, soit transférée d'un corps à un autre.

Pour prouver ce principe, Carnot part de l'impossibilité d'une machine à mouvement perpétuel de premier espèce, à savoir une machine qui produirait du travail gratuit, sans consommation de calorique. S'il existe une machine de rendement supérieur à la machine réversible alors on peut fusionner ces deux machines pour produire du travail gratuit et perpétuel. Cette machine est une absurdité, d'où il s'ensuit pour Carnot que le rendement de la machine réversible est maximal. Carnot supposait la conservation du calorique, c'est-à-dire faisait l'hypothèse selon laquelle *toute* la

⁵⁴ Maxwell [1871] 1891, *Op.cit* p. 198-199.

⁵⁵ *Ibid.* p. 196. La formulation de Carnot de 1824 « La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport de calorique. », p. 20.

quantité de chaleur, Q , qui a servi à fournir du travail W dans la machine réversible est conservée et transférée du réservoir chaud au réservoir froid.

Mais suite à la démonstration par Joule de l'équivalence de la chaleur et du travail, qui a servi de base pour l'énoncé de la première loi de la thermodynamique (le principe de la conservation de l'énergie), la quantité de chaleur n'est plus considérée comme étant conservée. La quantité de chaleur Q prise du réservoir chaud produit du travail W et une quantité $(Q - W)$ est rejetée dans le réservoir froid. Clausius défend le maintien du principe de Carnot, mais le modifie pour prendre en compte cette non-conservation de la quantité de chaleur. Il introduit pour la première fois la deuxième loi de la thermodynamique en 1850 pour sauver le principe de Carnot : tandis que Carnot vise à montrer qu'une machine à mouvement perpétuel de première espèce peut être déduite de la contradiction de son principe, Clausius procède un peu différemment. C'est une machine à mouvement perpétuel de seconde espèce qui peut être conçue suite à la violation de ce principe : une machine qui transférerait la chaleur d'un réservoir froid vers un réservoir chaud sans aucun apport de travail, ce qui est absurde pour Clausius. C'est cela qui aboutit à la formulation de la deuxième loi de la thermodynamique quelques années plus tard, dans la version que Maxwell cite ci-dessus. La deuxième loi ainsi développée est affichée comme universelle et phénoménologique, s'appliquant à toutes les échelles sans renvoyer à la constitution atomique de la matière ni aux mouvements de ses atomes.

La question que Maxwell se pose, et explore dans *La Chaleur*, est de savoir quelles sont les conséquences de la constitution atomique de la matière sur ces deux lois.

Maxwell commence par aborder cette question en regardant de près la différence de ces conséquences sur la première et la deuxième loi de la thermodynamique : les lois de la mécanique sont compatibles avec la première loi mais pas avec la deuxième. Pour montrer cette différence, Maxwell va utiliser implicitement son démon, qui sera décrit explicitement 150 pages plus tard :

« Supposons qu'un corps contienne de l'énergie sous forme de chaleur ; quelles sont les conditions auxquelles cette énergie ou une partie de cette énergie peut être enlevée au corps ? Si la chaleur d'un corps consiste dans le mouvement de ses parties, et si nous étions capables de distinguer ces parties et de guider et contrôler leurs mouvements par un mécanisme d'une nature quelconque, nous pourrions alors, en disposant notre appareil de manière à saisir toutes les parties mobiles du corps et par une transmission mécanique convenable, transférer l'énergie de toutes ces parties du corps chauffé, sous forme de mouvement ordinaire, à un autre corps quelconque. Le corps chauffé serait rendu ainsi absolument froid, et toute son énergie thermique serait convertie dans le mouvement visible de quelque autre corps.

Or si cette supposition implique une contradiction directe avec la seconde loi de la thermodynamique, elle est compatible avec la première loi. *La seconde loi est, par conséquent, équivalente à une négation de notre pouvoir d'accomplir l'opération qui vient d'être décrite, soit par une transmission mécanique, soit par tout autre procédé.* D'où il s'ensuit que, si la chaleur d'un corps consiste dans le mouvement de ses parties, les parties distinctes qui se meuvent doivent être *si petites, qu'il n'existe aucun moyen pour nous de les saisir et les arrêter* »⁵⁶

Maxwell veut montrer ici que l'impossibilité, exprimée par la deuxième loi, d'utiliser l'énergie de la chaleur d'un seul corps en le refroidissant pour produire du travail, ne peut pas être exprimée par les lois de la mécanique. En effet, ces lois n'interdisent pas un mécanisme qui dirige chaque molécule. Ce mécanisme est aussi compatible avec la première loi, l'énergie totale restant constante. La deuxième loi doit alors « exprimer un certain aspect essentiel non mécanique de la nature. Si c'est pour recevoir une explication au niveau moléculaire, cette explication doit se référer à la petitesse des molécules, ou de manière équivalente, à leur très grand nombre. »⁵⁷ On verra dans la section suivante que cette conclusion sera explicite dans l'expérience de pensée du démon exposé vers la fin de *La Chaleur*.

3.2.2 L'expérience de pensée

L'expérience de pensée du démon de Maxwell apparaît pour la première fois dans une lettre à Peter Guthrie Tait en 1867. Maxwell introduit son démon afin de « 'pick a hole' dans la deuxième loi de la thermodynamique, à savoir si deux corps sont en contact, le plus chaud ne peut pas prendre de la chaleur du plus froid sans intervention extérieure ». Puis il demande à Tait de « concevoir un être fini qui connaît les chemins et les vitesses de toutes les molécules par simple inspection, mais qui ne peut pas faire d'autre travail que d'ouvrir et fermer un trou dans le diaphragme [qui sépare deux portions d'un récipient contenant du gaz à des températures différentes] par l'intermédiaire d'un coulisseau sans masse [...] un petit être habile des doigts et très observateur »⁵⁸. Cet être fut baptisé

⁵⁶ Maxwell 1891, *Op.cit, Ibid* p.199-200. C'est moi qui souligne.

⁵⁷M J Klein, *Op. Cit.*. "express some essentially non-mechanical aspect of nature, If it is to receive an explanation at the molecular level, that explanation must refer to the smallness of the molecules, or equivalently, to their enormous number" p.89-90 Traduit par l'auteur

⁵⁸ Lettre de Maxwell à Tait, 11 Décembre 1867, Knott, *Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait*, Cambridge University Press, 1911. "To pick a hole—say in the 2nd law of [thermodynamics]s., that if two things are in contact the hotter cannot take heat from the colder without external agency. [...] Now conceive a finite being who knows the paths and velocities of all the molecules by simple inspection but who can do no work except open and close a hole in the diaphragm by means of a slide without mass.[...] a very observant and neat-fingered being has been employed' pp. 213-214 Traduit par l'auteur

le *Démon intelligent de Maxwell* par William Thomson (Lord Kelvin) en 1874⁵⁹. Si ce démon est capable de trier d'un côté du récipient les molécules lentes et de l'autre les molécules rapides, il pourra alors rendre un corps chaud plus chaud et un corps froid plus froid sans aucune intervention extérieure, en contradiction avec la deuxième loi de la thermodynamique. Maxwell conclut : « seulement nous ne le pouvons pas, n'étant pas assez intelligents »⁶⁰.

Edward E. Daub analyse cette première introduction du démon dans la lettre à Tait comme une exploration de la nature de la dissipation d'énergie. « C'est Maxwell [...] qui a assigné au démon le rôle de mettre en lumière la nature de la dissipation de l'énergie et de montrer que toute l'énergie reste disponible pour un esprit qui peut 'suivre le mouvement de chaque molécule et l'attraper à chaque instant' [Maxwell 1878]. Sans aucun doute Maxwell a au début conçu son [démon] parce qu'il était préoccupé par la dissipation d'énergie »⁶¹. Toujours selon Daub, Maxwell n'arrive à sa conclusion principale concernant la nature statistique de la deuxième loi qu'au bout de trois ans. Quelle que soit la raison de l'introduction de cette expérience de pensée, Maxwell s'explique sur le but principal de son recours au démon dans plusieurs lettres et dans la première version publiée de l'expérience de pensée du démon dans *La Chaleur*.

Dans la section intitulée « Limitation de la seconde loi de la thermodynamique », Maxwell introduit l'expérience de pensée du démon de la façon suivante :

« Avant de conclure, je veux attirer l'attention sur un aspect de la théorie moléculaire qui mérite considération. Un des faits les plus établis en thermodynamique, c'est qu'il est impossible, sans dépenser du travail, de produire une inégalité de température dans un système contenu dans une enveloppe qui ne permet ni changement de volume ni transmission de chaleur, et dans lequel la température et la pression sont partout les mêmes. C'est la seconde loi de la thermodynamique, et elle est absolument vraie, tant que nous ne pouvons agir que sur les corps pris en masse, et que nous n'avons pas la faculté de percevoir ou la possibilité de manier les molécules séparées dont ils sont constituées. Mais si nous concevons un être dont les facultés (sens) soient assez développées pour qu'il puisse suivre chaque molécule dans sa course, cet être dont les attributs seraient cependant finis comme les nôtres deviendrait capable de faire ce que nous ne pouvons faire actuellement. Car nous avons vu que les molécules de l'air

⁵⁹ William Thomson, 1874, The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy » *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, Vol. 8.

⁶⁰ Lettre de Maxwell à Tait, 11 Décembre 1867, Knott 1911 Op. Cit "Only we can't, not being clever enough" p.214. Traduit par l'auteur.

⁶¹ Edward E. Daub, "Maxwell's Demon", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 1 (3):213-227, 1970. "It was thus Maxwell [...], who assigned the demon the role of illuminating the nature of dissipated energy and of showing that all energy remains available for a mind able to 'trace the motion of every molecule and seize it at the right moment'. No doubt Maxwell first conceived his tiny intelligence because he was concerned about energy dissipation." p 217

renfermé dans un récipient et à température uniforme se meuvent cependant avec des vitesses qui sont loin d'être les mêmes, bien que la vitesse moyenne d'un grand nombre d'entr'elles, arbitrairement choisies, reste toujours à peu près exactement la même. Supposons maintenant que le récipient soit divisé en deux portions A et B, par une cloison dans laquelle il y ait une petite ouverture, et qu'un être qui puisse discerner par la vue les molécules individuelles ouvre et ferme cette ouverture, de manière à ne permettre l'introduction de A vers B que des molécules les plus rapidement agitées, et de B vers A, l'introduction des molécules dont le mouvement est lent ; il aura ainsi, sans dépenser de travail, élevé la température de B et abaissé celle de A, malgré la seconde loi de la thermodynamique.

C'est seulement là un des exemples dans lesquels les conclusions tirées de notre expérience des corps en tant que constitués par une nombre immense de molécules, peuvent ne pas s'appliquer à ces observations et expériences plus délicates, que nous pouvons supposer faites par un être qui percevrait et manierait séparément les molécules que nous-même ne pouvons traiter qu'en masse.

Dans les questions relatives à la matière, prise en masse, nous sommes forcés, ne pouvant discerner chaque molécule en particulier, d'avoir recours à ce que j'ai décrit sous le nom de *méthode statistique* de calcul, et d'abandonner la véritable *méthode exacte* [dynamique] consistant à traiter par le calcul le mouvement de chaque molécule en particulier. »⁶²

Maxwell introduit la deuxième loi comme « un des faits les plus établis en thermodynamique ». Comme dans sa lettre à Tait quatre années auparavant, Maxwell arrive à une contradiction avec cette loi au moyen de son démon, qui sépare les molécules lentes des rapides sans dépense de travail. Cependant, à partir de cette contradiction, Maxwell ne rejette pas la deuxième loi mais soutient plutôt qu'il faut la limiter : la deuxième loi de la thermodynamique doit être limitée à des situations où l'on traite les molécules *en masse* et non individuellement : elle doit être de nature « statistique ».

Dans au moins deux lettres, Maxwell s'explique sur la conclusion qu'il tire de son expérience de pensée. Dans la première, de 1870 à John Strutt, Lord Rayleigh, Maxwell écrit le passage suivant concernant son expérience de pensée : « *Moralité*. La 2ème loi de la thermodynamique a le même degré de vérité que l'assertion que si vous jetez un grand verre d'eau dans la mer, vous ne pouvez pas puiser de nouveau le même grand verre d'eau »⁶³. Dans l'autre, à Tait (non datée), dans un passage intitulé « concernant les démons », il résume et clarifie son démon en quatre points. On peut lire au troisième point : « Quel était leur [les démons] but initial ? De

⁶² James Clerk Maxwell, 1891, La chaleur, traduit par G. Mouret, Paris B Tignol. p. 421-422 J.C. Maxwell, 1871, Theory of Heat, London: Longmans, Green and Co.

⁶³ Lettre de Maxwell à Strutt, 6 December 1870, cité dans Edward E. Daub, "Maxwell's Demon", *Hist. Phil. Sci.*, I, no. 3, 1970, p.215 "Moral. The 2nd law of thermodynamics has the same degree of truth as the statement that if you throw a tumblerful of water into the sea, you cannot get the same tumblerful of water out again." Traduit par l'auteur.

montrer que la deuxième loi de la Thermodynamique a seulement une validité statistique. »⁶⁴ Mais que veut dire cette affirmation ? Pour comprendre le sens du mot « statistique » dans la conclusion de Maxwell, il faut revenir encore une fois au contexte historique.

3.2.3 Interprétation dynamique et statistique

L'expérience de pensée du démon, ainsi que l'argument de la fin de la section précédente, semblable à certains détails près à l'expérience de pensée du démon, expose la nature statistique de la deuxième loi. « Statistique » doit être compris d'une part par opposition aux tentatives d'interprétation mécanique, ou dynamique, de Clausius et Boltzmann, de la deuxième loi de la thermodynamique, et d'autre part, en référence à la différence soulignée par Maxwell entre ce qu'il appelle « méthode statistique » et « méthode historique », qu'il appelle « méthode exacte » à la fin de son expérience de pensée ci-dessus.

Suite au développement phénoménologique de la deuxième loi, Clausius en 1871 et Boltzmann en 1866⁶⁵ ont proposé deux interprétations mécaniques de cette loi, c'est-à-dire des interprétations qui tiennent compte de la constitution moléculaire de la matière et obéissent aux lois newtoniennes. Regardons en quoi consistaient ces tentatives.

La deuxième loi décrit le comportement asymétrique de l'évolution des systèmes thermodynamiques dans le temps grâce au concept d'entropie introduit par Clausius en 1865. L'entropie est une fonction de l'état thermodynamique du système et non du trajet que le système a pris pour arriver à cet état. Elle reste constante pour les processus réversibles et elle augmente pour les processus irréversibles. La deuxième loi s'exprime alors de la façon suivante :

Pour les processus réversibles

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Pour les processus irréversibles

$$dS > \frac{dQ}{T}$$

⁶⁴ Knott *Op.cit.*, p. 215. “What was their chief end ? To show that the 2nd Law of Thermodynamics has only a statistical certainty.” Traduit par l'auteur.

⁶⁵ Les titres anglais de leurs deux articles montrent clairement leur but. Celui de Boltzmann “On the mechanical meaning of the second law of thermodynamics” et celui de Clausius “On the reduction of the second law of thermodynamics to general mechanical principles”.

dQ est la chaleur fournie au système (c'est une différentielle inexacte)

T est la température absolue du système ⁶⁶

Donner une *interprétation mécanique ou dynamique* revient à interpréter les quantités qui apparaissent dans ces équations en fonction des coordonnées et des quantités de mouvement des molécules. Clausius et Boltzmann se disputaient la priorité d'avoir déduit cette deuxième loi à partir des lois de la mécanique. Dans une lettre à Tait de 1873 Maxwell se moquait précisément de ces « Allemands » qui se disputaient cette priorité⁶⁷ et utilise l'expérience de pensée du démon pour montrer la nature statistique de la deuxième loi., « aucun énoncé dynamique se soumettra à une telle indignité » écrivait-il à Tait en 1876.

Contrairement à Clausius et Boltzmann, Maxwell défendait une interprétation statistique de la deuxième loi de la thermodynamique et soulignait à plusieurs reprises la différence entre la « méthode historique » (ou dynamique) et la « méthode statistique ». Maxwell va en fait expliquer, dans son article « Molecules »⁶⁸ issu d'une conférence devant la *British Association* à Bradford en 1873, que la méthode historique s'intéresse à l'histoire de chaque individu, molécule dans les théories physiques et être humain dans les théories sociologiques. Tandis que la méthode statistique ne retrace pas l'histoire de chaque individu, molécule ou être humain, mais s'intéresse plutôt à un échantillon de plusieurs individus. L'applicabilité de chaque méthode dépendra du nombre d'individus dans l'échantillon examiné, que ce soit en étudiant les êtres humains ou les molécules :

« Tant que nous devons traiter seulement deux molécules, et que nous possédons toutes leurs données, nous pouvons calculer le résultat de leur rencontre, mais quand nous devons traiter des millions de molécules, dont chacune a des millions de rencontres par seconde, la complexité du problème semble fermer tout espoir d'une solution légitime.

[...]

⁶⁶ p. 84, M.J. Klein, 1970, Maxwell, His Demon, and the Second Law of Thermodynamics, *American Scientist* Vol. 58, No. 1, pp. 84-97.

⁶⁷ Maxwell écrivait à Tait dans son style lyrique "But it is rare sport to see those learned Germans contending for the priority in the discovery that the second law of [thermodynamics] is the Hamiltonsche Princip. [...] The Hamiltonsche Princip, the while, soars along in a region untroubled by statistical considerations while the German Icarus flap their waxen wings in nephelococcygia, amid those cloudy forms which the ignorance and finitude of human science have invested with the incommunicable attributes of the invisible Queen of Heaven" Knott, C. G. 1911, *Op.cit.* pp. 115-116.

⁶⁸ Maxwell, 1873, Molecules, *Nature*, p 437-441.

Les atomistes modernes ont donc adopté une méthode qui est, je crois, nouvelle dans le secteur de la physique mathématique, bien qu'elle ait longtemps été utilisée dans la Section des Statistiques. Lorsque les membres travailleurs de la section F [la section de la statistique] mettent la main sur un rapport de recensement, ou tout autre document contenant les données numériques des sciences économiques et sociales, ils commencent par distribuer l'ensemble de la population en groupes, selon l'âge, l'impôt sur le revenu, l'éducation, la croyance religieuse ou les condamnations pénales. Le nombre d'individus est beaucoup trop grand pour leur permettre de retracer l'histoire de chaque individu séparément, de sorte que, dans le but de réduire leur travail dans les limites humaines, ils concentrent leur attention sur un petit nombre de groupes artificiels. La variation du nombre de personnes dans chaque groupe, et non pas la variation de l'état de chaque individu, est la donnée première à partir de laquelle ils travaillent.

Ceci, bien sûr, n'est pas la seule méthode d'étude de la nature humaine. Nous pouvons observer la conduite des hommes individuels et la comparer avec la conduite que leur caractère précédent et leurs circonstances actuelles nous amènerait à attendre selon la meilleure théorie existante [...] L'une peut être appelé historique et l'autre méthode statistique

Les équations de la dynamique expriment complètement les lois de la méthode historique appliquée à la matière, mais l'application de ces équations implique une parfaite connaissance de toutes les données. Mais la plus petite portion de matière que nous pouvons soumettre à l'expérience est constituée de millions de molécules, dont aucune ne devient jamais sensible individuellement pour nous. Nous ne pouvons, par conséquent, déterminer le mouvement réel d'aucune de ces molécules, de sorte que nous sommes obligés d'abandonner la méthode strictement historique, et d'adopter la méthode statistique qui consiste à traiter de grands groupes de molécules.

Les données de la méthode statistique, comme elle est appliquée à la science moléculaire, sont les sommes de grands nombres de quantités moléculaires. En étudiant les relations entre les quantités de cette sorte, nous rencontrons un nouveau genre de régularité, la régularité des moyennes, sur laquelle nous pouvons suffisamment nous appuyer pour tous les buts pratiques, mais qui ne peut revendiquer ce caractère de précision absolue qui appartient aux lois de la dynamique abstraite.

Ainsi la science moléculaire nous enseigne que nos expériences ne peuvent jamais nous fournir quelque chose de plus que de l'information statistique, et qu'aucune loi déduite d'elles ne peut prétendre à la précision absolue. Mais quand nous passons de la contemplation de nos expériences à celles des molécules elles-

mêmes, nous quittons le monde de la chance et du changement, et entrons dans une région où tout est certain et immuable. »⁶⁹

Maxwell nous explique ici que lorsqu'on s'intéresse à la rencontre de deux molécules ou à l'histoire précise d'un être humain, et qu'on est en possession de toutes leur données, on est, en principe, en mesure d'appliquer la méthode dynamique. Cette méthode nous fournira alors un résultat précis. Mais il ajoute qu'en établissant les rapports de recensement ou en examinant n'importe quel échantillons de gaz, si petit soit-il, on est toujours en présence d'un très grand nombres d'individus ou de molécules, de sorte qu'on se trouve contraint d'utiliser la méthode statistique. Cette dernière s'impose alors, mais « ne peut revendiquer ce caractère de précision absolue qui appartient aux lois de la dynamique abstraite. »

Dans le contexte historique au tout début du des tout premiers développements de la mécanique statistique, la conclusion tirée de l'expérience de pensée du démon sur la nature statistique de la deuxième loi renvoie alors à cette différence que Maxwell constate entre la méthode dynamique et la méthode statistique : la méthode statistique consiste à regarder les molécules *en masse*, tandis que la méthode dynamique, mécanique et historique (trois synonymes pour Maxwell) s'intéresse à l'étude du mouvement et de la rencontre de deux molécules quand on suit le trajet de chacune. Cette méthode ne peut être appliquée que si on a toutes les informations, positions et vitesses, de chaque molécule. On est alors comme le démon et aucune version de la deuxième loi n'est valide pour quelqu'un capable de manipuler ainsi les molécules.

⁶⁹“Thus far we have been considering molecular science as an inquiry into natural phenomena. But though the professed aim of all scientific work is to unravel the secrets of nature, it has another effect, not less valuable, on the mind of the worker. It leaves him in possession of methods which nothing but scientific work could have led him to invent and it places him in a position from which many regions of nature, (...), appear under a new aspect.

The study of molecules has developed a method of its own, and it has also opened up new views of nature. (...)

As long as we have to deal with only two molecules, and have all the data given us, we can calculate the result of their encounter, but when we have to deal with millions of molecules, each of which has millions of encounters in a second, the complexity of the problem seems to shut out all hope of a legitimate solution.

The modern atomists have therefore adopted a method which is I believe new in the department of mathematical physics, though it has long been in use in the Section of Statistics.

(...)

The data of the statistical method as applied to molecular science are the sums of large numbers of molecular quantities. In studying the relations between quantities of this kind, we meet with a new kind of regularity, the regularity of averages, which we can depend upon quite sufficiently for all practical purposes, but which can make no claim to that character of absolute precision which belongs to the laws of abstract dynamics.

Thus molecular science teaches us that our experiments can never give us anything more than statistical information, and that no law deduced from them can pretend to absolute precision. But when we pass from the contemplation of our experiments to that of the molecules themselves, we leave the world of chance and change, and enter a region where everything is certain and immutable. “ *Ibid.*

3.2.4 Conclusion: la fonction d'exploration théorique du démon de Maxwell

L'expérience de pensée du démon de Maxwell montre la tension entre la thermodynamique et la dynamique newtonienne au sein d'une approche atomiste et mécaniste du monde microscopique. L'asymétrie inhérente aux lois de la première ne se retrouve pas dans la seconde, alors que les systèmes thermodynamiques sont composés de particules qui obéissent, selon la vision atomiste, aux lois de la dynamique newtonienne. En concluant que la deuxième loi est de nature statistique, Maxwell laisse la situation théorique dans un état insatisfaisant. Il ne développe pas, au moins pas explicitement, de proposition alternative à la deuxième loi phénoménologique, mais réussit cependant à cibler sa critique en affirmant sa nature statistique. Maxwell voyait dans son expérience de pensée une façon d'exposer cette tension et *d'explorer*, pour ainsi dire, un début de solution pour réconcilier ces deux théories physiques qui proposent deux images apparemment contradictoires du monde. Explorer, car Maxwell montre que la deuxième loi doit être de nature statistique mais n'a pas cherché à lui donner sa forme statistique. Il s'est juste contenté d'indiquer le chemin à prendre - celui de la méthode statistique - ainsi que le chemin à ne pas prendre - celui de la méthode historique ou dynamique. L'expérience de pensée du démon rétablit alors une *cohérence externe*, pour ainsi dire, entre la théorie cinétique et une version statistique de la thermodynamique. Cohérence perdue avec une interprétation dynamique de la deuxième loi.

La possibilité de réaliser un démon tel qu'envisagé par Maxwell sera aussi un sujet d'exploration tout au long du XX^e siècle, jusqu'à nos jours. Depuis sa conception, le démon a reçu une multitude d'interprétations qui dépendent de l'interprétation du démon lui-même, selon qu'on le conçoit comme mécanique ou intelligent, mais aussi des lois auxquelles il doit obéir ainsi que de la conclusion que l'expérience de pensée doit montrer (*cf.* chapitre 6 pour une analyse détaillée des notions de possibilité impliquées dans les scénarios des expériences de pensée, en particulier notre analyse du démon de Maxwell dans 6.3.1). Cette exploration appartient à la littérature du XX^e siècle et non à l'expérience de pensée de Maxwell *per se*.

La fonction d'exploration théorique de cette expérience de pensée continue à prévaloir jusqu'à nos jours. Mais son développement durant le XX^e s'est éloigné du but initial de Maxwell, celui d'explorer la nature statistique de la deuxième loi. Ce développement a naturalisé le démon pour en faire une machine « intelligente », et ce par le biais d'autres expériences de pensée. Ces expériences de pensée, en particulier celle de Szilard en 1929, ont abouti à postuler un coût entropique de l'acquisition d'information (principe de Szilard, 1929) ou de l'effacement de

l'information (principe de Landauer, 1960)⁷⁰. Récemment, de nouvelles analyses semblent revenir sur le rôle principal de cette expérience de pensée⁷¹. De nouvelles questions, dont la réponse ne fait pas consensus, se posent lorsque l'on continue d'analyser cette expérience de pensée. Comment faut-il interpréter les concepts thermodynamiques par le biais de la mécanique statistique ? Quelle est la forme de la deuxième loi qu'on peut, ou qu'on doit, récupérer avec la mécanique statistique ? Le démon est-il consistant avec les lois de la mécanique classique et de la mécanique statistique ? Comment interpréter cette dernière ? De récentes analyses fondationnelles en mécanique statistique se basent sur le démon de Maxwell⁷² et donnent des réponses divergentes.

Nous reviendrons sur cette expérience de pensée dans la partie III de la thèse (chapitre 6 et 7). Passons à présent à trois autres cas d'expériences de pensée à fonction d'exploration théorique : le boulet de canon de Newton (3.3), les jumeaux de Langevin (3.4) et l'ascenseur d'Einstein (3.5). Notre but est d'exposer ces expériences de pensée sans nous attarder sur leur analyse historique. Non parce qu'une telle analyse ne serait pas importante pour mieux comprendre ces expériences de pensée, ainsi que leurs fonctions selon leurs auteurs et leurs contemporains, bien au contraire. Mais notre choix d'analyse historique, qu'on a commencé dans cette partie, s'est porté sur d'autres cas d'études, notamment la tour de Pise de Galilée (*cf.* chapitre 5), et dans une moindre mesure le démon de Maxwell (*cf.* 6.3) et la boîte à photon d'Einstein (*cf.* chapitre 7).

3.3 Le boulet de canon de Newton

L'expérience de pensée du boulet de canon Newton peut être analysée parallèlement à celle du démon de Maxwell. Maxwell veut *limiter* la deuxième loi de la thermodynamique au domaine macroscopique, tandis que Newton veut *élargir* la mécanique décrivant les phénomènes terrestres (sublunaires) pour inclure les phénomènes célestes (supralunaires). Il veut unifier monde sublunaire et monde supralunaire, séparés dans la physique aristotélicienne, grâce aux lois du mouvement et à la gravitation universelle. Newton recourt à son expérience de pensée à la fin des *Principia*, après avoir défendu sa théorie et ses lois, et ce contrairement à Maxwell qui soutenait uniquement que la deuxième loi est de nature statistique mais n'avait pas en sa possession une formulation explicite de

⁷⁰ C.f. Earman et Norton 1998-1999 pour une analyse critique de cette littérature. Nous sommes en accord avec leurs conclusions mais nous n'allons pas développer cette littérature dans cette thèse.

⁷¹ *cf.* Hemmo et Shenker (2012), Norton (2013), Myrvold (2011).

⁷² Le tout récent livre de Meir Hemmo et Orly Shenker est ainsi intitulé *The Road to Maxwell's Demon Conceptual Foundation of Statistical Mechanics*, 2012. *cf.* aussi Wayne C. Myrvold qui défend une approche statistique basée sur les idées de Maxwell et une analyse historique de l'expérience de pensée du démon dans *Statistical mechanics and thermodynamics : A Maxwellian view*, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 42, 2011, pp. 237–243.

cette dernière. Même si l'expérience de pensée du boulet de canon a eu une fonction plutôt pédagogique ou heuristique pour Newton, on peut néanmoins la classer comme expérience de pensée d'exploration théorique : il souhaitait explorer sur un exemple simple comment sa théorie peut décrire le mouvement de projectiles terrestres et la rotation orbitale des planètes.

Newton visait alors, par le biais de son expérience de pensée, à exposer sa théorie. Il ne visait pas à prouver ni à démontrer ou dériver mathématiquement les lois du mouvement ou de la gravitation universelle. En fait, Newton a déjà atteint ces buts dans le développement mathématique de sa théorie physique tout au long des *Principia*. L'expérience de pensée du boulet de canon établit une analogie entre deux types de phénomènes ; le premier est terrestre comme le lancement d'un projectile, le deuxième est céleste, comme la rotation de la Lune autour de la Terre.

Newton commence par expliquer que la physique aristotélicienne sépare les phénomènes terrestres des phénomènes célestes en niant qu'ils obéissent aux mêmes lois :

« [N]ous ne savons pas de quelle manière les Anciens expliquaient comment les planètes en sont venues à être retenues dans certaines limites dans ces espaces libres et à être détournées des trajectoires rectilignes, que, laissées à elles-mêmes, elles auraient poursuivies, vers des révolutions régulières dans des orbites curvilignes. C'est probablement pour donner une sorte de solution à cette difficulté que les orbes solides ont été introduits⁷³.

Newton commence alors par poser le problème de savoir pourquoi les planètes restent en orbite, puis rappelle la solution « des Anciens », qui faisait appel aux orbes solides. Il conçoit alors l'expérience de pensée du boulet de canon pour proposer sa solution, et rejeter en même temps la solution des Anciens. Dans la section intitulée « the action of centripetal forces », Newton explicite sa pensée et son but en imaginant un canon posé sur une très haute montagne au pôle nord de la Terre. Ce canon est capable de tirer des projectiles avec différentes vitesses (Figure 3.1) :

Que c'est au moyen de forces centripètes que les planètes peuvent être retenues dans certaines orbites, *on peut facilement le comprendre*, si l'on considère les mouvements de projectiles (pp. 2-4.); car une pierre qui est projetée est, par la pression de son propre poids, forcée hors de la trajectoire rectiligne que, par la projection initiale seule, elle aurait poursuivie, et amenée à décrire une ligne courbe dans l'air; et

⁷³ “ [W]e do not know in what manner the ancients explained the question, how the planets came to be retained within certain bounds in these free spaces, and to be drawn off from the rectilinear courses, which left to themselves, they should have pursued, into regular revolutions in curvilinear orbits. Probably it was to give some sort of satisfaction to this difficulty that solid orbs had been introduced.”

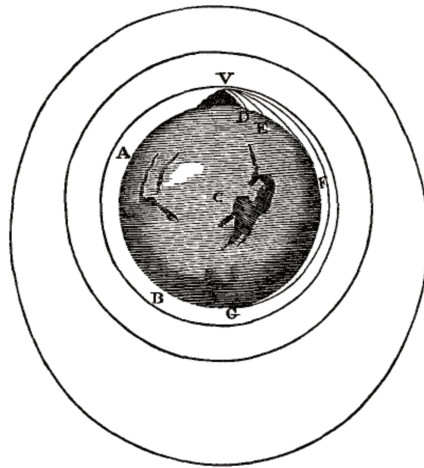


Figure 3.1: Le boulet de canon de Newton (*Principia* p. 513)

par cette voie tordue est enfin ramenée au sol; et plus grande est la vitesse avec laquelle elle est projetée, plus elle va aller loin avant de retomber sur terre. Nous pouvons donc supposer sa vitesse augmentée à tel point qu'elle décrirait un arc de 1, 2, 5, 10, 100, 1000 miles avant son arrivée sur terre, jusqu'à ce qu'enfin, dépassant les limites de la terre, elle doive passer dans l'espace sans la toucher.⁷⁴

On comprendra facilement que les planètes restent sur leurs orbites si on considère le mouvement des projectiles terrestres ! Affirmation pour le moins étonnante pour l'époque. Rappelons-nous que Galilée s'est fait condamner par l'Eglise pour son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* en 1632 à une assignation à résidence, et son ouvrage, qui défendait l'héliocentrisme, sera interdit. De plus, Galilée est obligé d'abjurer publiquement la thèse héliocentrique qui décrivait le mouvement des planètes autour du Soleil et s'opposait à la thèse géocentrique « des Anciens », qui décrivait le mouvement des planètes autour d'une Terre fixe.

Mais revenons au boulet de canon de Newton. Le boulet aurait dû continuer sa course vers l'espace sans retomber sur terre. Donc, pour comprendre la rotation des planètes il faut d'abord comprendre pourquoi ce boulet retombe sur terre, et aussi comprendre pourquoi, s'il est lancé avec une vitesse plus importante, ce projectile retournera au pôle nord et avec la même vitesse. Voici comment Newton explique les trajectoires de ces projectiles terrestres en se basant sur le développement de sa théorie dans les *Principia* :

Que AFB représente la surface de la terre, C son centre, VD, VE, VF les lignes courbes qu'un corps décrirait s'il est projeté dans une direction horizontale à partir du sommet d'une haute montagne

⁷⁴ "That by means of centripetal forces the planets may be retained in certain orbits, we may easily understand, if we consider the motions of projectiles (pp. 2-4); for a stone that is projected is by the pressure of its own weight forced out of the rectilinear path, which by the initial projection alone it should have pursued, and made to describe a curved line in the air; and through that crooked way is at last brought down to the ground; and the greater the velocity is with which it is projected, the farther it goes before it falls to the earth. We may therefore suppose the velocity to be so increased, that it would describe an arc of 1, 2, 5, 10, 100, 1000 miles before it arrived at the earth, till at last, exceeding the limits of the earth, it should pass into space without touching it."

successivement avec de plus en plus de vitesse; et, parce que les mouvements célestes sont à peine retardés par la résistance faible ou nulle des espaces dans lesquels ils s'accomplissent, pour maintenir la parité des cas, nous supposons soit qu'il n'y a pas d'air autour de la Terre, ou au moins qu'il est doté peu ou d'aucun pouvoir de résister; et pour la même raison que le corps projeté avec une vitesse moindre décrit l'arc inférieur VD, et avec une plus grande vitesse l'arc plus grand VE et, en augmentant la vitesse, va de plus en plus loin en F et G, si la vitesse était toujours de plus en plus augmentée, il finirait par aller carrément au-delà de la circonférence de la Terre, et reviendrait à la montagne à partir de laquelle il a été projeté.

Et puisque les aires qu'il décrit lors de ce mouvement au moyen d'un rayon tracé en direction du centre de la terre sont (d'après Prop. 1, Livre 1, *Princip. Math.*) proportionnelles aux temps dans lesquels elles sont décrites, sa vitesse, quand il revient à la montagne, ne sera pas moindre qu'elle n'était au début; et, en conservant la même vitesse, il décrira la même courbe encore et encore, d'après la même loi.⁷⁵

Selon la loi d'inertie, le boulet de canon aurait dû voyager indéfiniment en ligne droite, et, dans une situation où la résistance de l'air est nulle, avec une vitesse constante. Mais en ajoutant l'effet de la gravitation, et donc en appliquant la loi de la gravitation universelle, le boulet sera attiré vers le bas, vers le centre de la Terre (Figure 3.2). Si sa vitesse est faible, le boulet va retomber près de la montagne. Puis, plus la vitesse est grande, le boulet va retomber de plus en plus loin. En partant de ces deux lois, Newton décrit alors le mouvement des projectiles terrestres. Mais si la vitesse est encore augmentée, le boulet va passer le pôle sud, remontera au pôle nord et repartira avec la même vitesse d'origine. Alors il effectuera un mouvement orbital autour de la Terre, comme le fait la Lune. Newton nous dit que c'est « la même raison » qui fait que le boulet de canon retombe sur Terre et continue sa trajectoire en orbite ; cette raison, on s'en doute, est la gravitation.

Newton applique ensuite le même raisonnement pour expliquer les orbites de toutes les planètes. Il procède de la façon suivante, en augmentant considérablement la vitesse de tir et l'altitude de l'emplacement du canon :

Mais si l'on imagine maintenant les corps projetés dans les directions des lignes parallèles à l'horizon de hauteurs plus grandes, que 5, 10, 100, 1000, ou plus de miles, ou plutôt comme autant de demi-diamètres de la Terre, ces corps, selon leur différentes vitesses, et la force de gravité différente en différentes hauteurs, décriront des arcs soit concentriques avec la Terre, soit

⁷⁵ "Let AFB represent the surface of the earth, C its centre, VD, VE, VF the curved lines which a body would describe, if projected in an horizontal direction from the top of an high mountain successively with more and more velocity; and, because the celestial motions are scarcely retarded by the little or no resistance of the spaces in which they are performed, to keep up the parity of cases, let us suppose either that there is no air about the earth, or at least that it is endowed with little or no power of resisting; and for the same reason that the body projected with a less velocity describes the lesser arc VD, and with a greater velocity the greater arc VE, and, augmenting the velocity, it goes farther and farther to F and G, if the velocity was still more and more augmented, it would reach at last quite beyond the circumference of the earth, and return to the mountain from which it was projected.

And since the areas which by this motion it describes by a radius drawn to the centre of the earth are (by Prop. 1, Book 1, *Princip. Math.*) proportional to the times in which they are described, its velocity, when it returns to the mountain, will be no less than it was at first; and, retaining the same velocity, it will describe the same curve over and over, by the same law."

excentriques de diverses façons, et continueront à tourner à travers les cieux dans ces orbites tout comme les planètes le font dans leurs orbites. »⁷⁶

Reprenons le cas particulier de l'orbite de la Lune autour de la Terre. Si la Lune n'était pas attirée vers le centre de la Terre, il n'y aurait rien pour empêcher son mouvement rectiligne. En fait, comme le projectile lancé du sommet de la montagne, la trajectoire de la Lune est redirigée vers le centre de la Terre et cela explique sa rotation orbitale autour de la terre. Le mouvement orbital de la Lune suit en fait la proposition décrite dans la figure 3.2 et que Newton défend au début des *Principia*. Cela montre la fonction de cette expérience de pensée : elle explore une théorie déjà bien articulée dans le but de l'exposer à l'aide d'un exemple simple. La figure 3.2 décrit la trajectoire d'un mobile quelconque attiré loin de son mouvement rectiligne ABC, BCd, CDe, DEf par un centre S, pour décrire un mouvement orbital ABC, BCD, CDE, DEF :

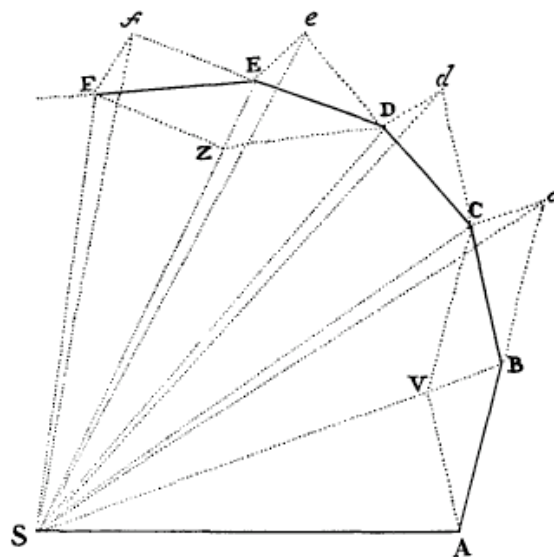


Figure 3.2: Newton, *Principia*, Livre 1, Section II Proposition I théorème I

L'expérience de pensée se base aussi sur différentes propositions des *Principia* et Newton y fait référence dans son analyse ci-dessus. En fait le mouvement orbital des planètes peut être bien décrit mathématiquement avec les lois et propositions des *Principia*. Néanmoins, l'expérience de pensée

⁷⁶ "But if we now imagine bodies to be projected in the directions of lines parallel to the horizon from greater heights, as of 5, 10, 100, 1000, or more miles, or rather as many semidiameters of the earth, those bodies, according to their different velocity, and the different force of gravity in different heights, will describe arcs either concentric with the earth, or variously eccentric, and go on revolving through the heavens in those orbits just as the planets do in their orbits." *Principia*, version de Florian Cajori, 1934, pp. 550-552.

offre un moyen plus simple pour comprendre les phénomènes célestes, par analogie avec les phénomènes terrestres mieux connus.

On retrouve aussi l'analyse du boulet de canon chez Brown, mais ce dernier souligne sa fonction heuristique de la façon suivante: « elle sert comme une sorte d'aide heuristique, un résultat peut-être déjà bien établi, mais l'expérience de pensée peut mener à un sentiment très satisfaisant de compréhension [...] C'est un merveilleux exemple de "l'effet aha" »⁷⁷. C'est en quelque sorte le sentiment d'émerveillement qu'on a quand on comprend un phénomène naturel sans pour autant maîtriser les formules mathématiques qui le décrivent. Par contre, notre analyse souligne sa fonction heuristique à travers sa fonction d'exploration théorique : Newton expose comment sa théorie décrit, et unifie, les phénomènes terrestres et célestes avec les mêmes lois.

3.4 Les jumeaux de Langevin

Le deuxième exemple d'expérience de pensée succédant à l'élaboration d'une théorie est celle de Paul Langevin de 1911. Ce dernier vise à exposer et expliciter une des nombreuses conséquences de la relativité restreinte qui heurtent, ou heurtaient à l'époque, notre sens commun ou notre compréhension commune de certaines notions et concepts physiques, en particulier sur la notion de la dilatation du temps. Il est appelé « paradoxe de Langevin » pour ces raisons, sans que le mot « paradoxe » désigne une contradiction logique insurmontable.

Avant d'aborder l'expérience de pensée, la précision suivante est nécessaire pour savoir dans quel cadre théorique on se situe, car la dilatation du temps est une conséquence déduite de la théorie de la relativité restreinte ainsi que générale. Dans le premier cas, la dilatation du temps est l'effet du déplacement à grande vitesse, tandis que dans le second c'est la différence de la distance par rapport à une masse gravitationnelle qui affecte les horloges. Dans cette expérience de pensée, nous allons uniquement aborder le premier cas, le fait qu'une horloge qui se déplace à une vitesse constante est plus lente que les horloges stationnaires sur Terre. Comme l'expérience de pensée est conçue avant la relativité générale, cette précision semble aller de soi. Mais, en fait, la résolution de ce paradoxe peut aussi faire appel à la relativité générale.

⁷⁷Brown, James Robert and Fehige, Yiftach, "Thought Experiments", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2010 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <http://plato.stanford.edu/archives/win2010/entries/thought-experiment/>. "serve as a kind of heuristic aid. A result may already be well established, but the thought experiment can lead to a very satisfying sense of understanding [...] It's a wonderful example of the 'aha effect'."

Dans l'expérience de pensée des jumeaux, la nouvelle théorie est la relativité restreinte qu'Einstein a développée six ans auparavant en 1905. La dilatation du temps ou le ralentissement des horloges en mouvement est la conséquence de la relativité restreinte que Langevin visait à exposer. Langevin présente son expérience de pensée lors du Congrès international de Philosophie de Bologne en 1911. Il s'y prend en imaginant un voyageur spatial :

« Il résulte de ce qui précède que ceux-là auront moins vieilli dont le mouvement pendant la séparation aura été le plus éloigné d'être uniforme, qui auront subi le plus d'accélération. Cette remarque fournit un moyen concevable, à celui qui voudrait y consacrer deux années de sa vie, de savoir ce que sera la Terre dans deux cents ans, d'explorer l'avenir de la Terre en faisant dans la vie de celle-ci un saut en avant qui pour elle durera deux siècles et pour lui durera deux ans, mais ceci sans espoir de retour, sans possibilité de venir nous informer du résultat de son voyage, puisque toute tentative de ce genre ne pourrait que le transporter de plus en plus avant dans l'avenir de la Terre.

Il suffirait pour cela que notre voyageur consente à s'enfermer dans un projectile que la Terre lancerait avec une vitesse suffisamment voisine de la lumière, quoique inférieure, ce qui est physiquement possible, en s'arrangeant pour qu'une rencontre, avec une étoile par exemple, se produise au bout d'une année de la vie du voyageur et le renvoie vers la Terre avec la même vitesse. Revenu à la Terre ayant vieilli de deux ans, il trouvera en sortant de son arche notre globe vieilli de deux cents ans si sa vitesse est restée dans l'intervalle inférieure d'un vingt-millième seulement à la vitesse de la lumière. »⁷⁸

Même si Langevin n'imagine qu'un seul voyageur et non pas des jumeaux, son expérience de pensée dans son format le plus connu concerne deux frères jumeaux et s'analyse de la façon suivante :

- (1) Le jumeau T reste sur Terre.
- (2) Son frère jumeau, S, fait le voyage spatial, aller/retour de et vers la Terre, à une vitesse proche de celle de la lumière.

Du point de vue du jumeau T et selon le principe de dilatation du temps de la relativité restreinte, l'horloge du voyageur S dans la fusée est plus lente que celle de son frère qui est resté sur Terre. Par conséquent, et si on relie le ralentissement d'une horloge au ralentissement de notre horloge biologique, le voyageur S revient moins âgé que son jumeau terrestre T.

Plaçons-nous maintenant de l'autre point de vue, celui du voyageur S. Selon le principe de relativité du mouvement, le voyageur S voit son frère T voyager à une vitesse proche de celle de la lumière relativement à lui. Pour lui, la Terre, et donc son frère T, se meut à une vitesse proche de celle de la lumière, et, si l'on applique le même raisonnement qu'auparavant, les horloges terrestres

⁷⁸ Paul Langevin, 1911, L'évolution de l'espace et du temps, *Scientia* 10: 31–54. p. 50.

sont plus lentes que les horloges de la fusée. Donc à son retour sur Terre, le voyageur S trouve son frère T moins vieux que lui.

C'est là l'apparente contradiction que Langevin soulève avec son expérience de pensée. Il est impossible, au moment de la rencontre des deux frères (si cela est possible après 200 ans), que le voyageur S soit à la fois plus vieux et plus jeune que son frère T. On a donc là un scénario imaginaire qui débouche sur un résultat absurde. Pour Langevin, la question n'est pas de réfuter la relativité restreinte ni la dilatation du temps mais plutôt de savoir quelle est l'erreur qui conduit à ce résultat absurde. Ce résultat paraît surprenant, car chacun des frères voit l'autre en déplacement et ainsi, selon une application naïve du principe de la relativité du mouvement, chacun des deux frères peut se considérer comme stationnaire tandis que l'autre est en mouvement. En ajoutant le phénomène de la dilatation du temps, chaque frère voit alors l'autre comme étant plus vieux. Comment la contradiction apparente est-elle résolue, et comment s'explique, dans le cadre standard de la relativité restreinte, le vrai phénomène, à savoir que l'un des jumeaux, le voyageur S, est à son retour plus jeune que son frère jumeau resté sur Terre ?

Même s'il n'est pas question de frères jumeaux pour Langevin, ce dernier va s'attaquer au même paradoxe :

« Ainsi la dissymétrie tenant à ce que le voyageur seul a subi, au milieu de son voyage, une accélération qui change le sens de sa vitesse et le ramène au point de départ sur la Terre, se traduit par ce fait que le voyageur voit la Terre s'éloigner et se rapprocher de lui pendant des temps égaux chacun pour lui à un an, tandis que la Terre, prévenue de cette accélération seulement par l'arrivée d'ondes lumineuses, voit le voyageur s'éloigner d'elle pendant deux siècles et revenir pendant deux jours, pendant un temps quarante mille fois plus court.

Si l'on cherche maintenant dans quelles conditions un semblable programme pourrait se réaliser, on se heurte, naturellement, à des difficultés matérielles énormes. »⁷⁹

Langevin cherche à expliquer que cette anomalie n'est qu'apparente, en exposant la relativité restreinte et ses conséquences : l'erreur ici est que nous ne pouvons pas appliquer le même raisonnement pour les deux frères, car leurs situations ne sont pas symétriques ; le principe de relativité du mouvement ne s'applique pas. Le voyageur S va s'éloigner de son frère T puis il va faire un demi-tour pour revenir sur terre, c'est-à-dire qu'il va changer de référentiel galiléen. Bien que la vitesse reste la même, la direction ne l'est plus. Du point de vue du voyageur S, la dilatation du temps de l'horloge du jumeau T ne se produit pas de façon uniforme tout au long du voyage, alors que du point de vue de celui de l'observateur terrestre T, l'horloge de son frère S retarde tout

⁷⁹ *Ibid*, p. 52.

au long du voyage. Par conséquent, c'est bien le voyageur S qui est plus jeune que son frère T à son retour sur Terre.

Notons enfin que la solution de ce paradoxe apparent n'est pas unique. Jammer 2006 souligne en analysant cette expérience de pensée :

« Nous ne discuterons pas les nombreuses solutions de ce paradoxe proposé dans le cadre conceptuel de la théorie de la relativité restreinte. Nous ne vous expliquerons pas non plus comment Albert Einstein, Max Born, ou Christian Møller, entre autres, ont invoqué la théorie de la relativité générale pour résoudre ce paradoxe. Et nous ne commenterons pas l'assertion d'Herbert Dingle que ce paradoxe réfute toute la théorie de la relativité, ou sur l'assertion plus récente et moins radicale de Martel Gerteis, qu'Einstein a commis une erreur de calcul dans sa dérivation de la dilatation du temps »⁸⁰.

Jammer s'intéresse en fait à l'expérience de pensée d'Einstein de 1905 qui met en scène des montres. C'est exactement le même raisonnement que celui de Langevin, mais pas sous une forme d'expérience de pensée :

« Il est à la fois évident que ce résultat [à savoir la dilatation du temps] s'obtient toujours si l'horloge se déplace de A à B dans une ligne polygonale, et aussi quand les points A et B coïncident. Si nous supposons que le résultat prouvé pour une ligne polygonale est également valable pour une ligne courbe continue, nous arrivons au résultat suivant: Si l'une des deux horloges synchrones en A est déplacée dans une courbe fermée à vitesse constante jusqu'à ce qu'elle retourne en A, le voyage prenant t secondes, alors d'après l'horloge qui est restée au repos, l'horloge qui a voyagé aura à son arrivée en A un retard de $1/2 t \sqrt{2/c^2}$ secondes. »⁸¹;

Enfin, Jammer fait le lien explicite entre les horloges d'Einstein et les jumeaux de Langevin :

« La conclusion d'Einstein qu'une horloge se déplaçant dans une courbe fermée, à partir d'un point A, se trouvera, en revenant à A, retardée par rapport à l'horloge stationnaire à A, était bien « curieuse », car elle conduit à un paradoxe qui agita d'importantes controverses entre grands physiciens et philosophes. Elle est devenue connue comme le « paradoxe de l'horloge », « le paradoxe

⁸⁰ “We will not discuss the numerous solutions of this paradox proposed within the conceptual framework of the special theory of relativity. Nor will we explain how Albert Einstein, Max Born, or Christian Møller, among others, invoked the general theory of relativity to resolve this paradox. Nor will we comment on Herbert Dingle’s claim that this paradox disproves the whole theory of relativity, or on the more recent and less radical claim by Martel Gerteis, that Einstein committed an arithmetical error in his derivation of time dilation.” Traduit par l’auteur. Max Jammer, 2006, *Concepts of Simultaneity, From Antiquity to Einstein and Beyond*, JHU Press, p. 165.

⁸¹ “It is at once apparent that this result [i.e. the time dilation] still holds if the clock moves from A to B in any polygonal line, and also when the points A and B coincide. If we assume that the result proved for a polygonal line is also valid for a continuously curved line, we arrive at the following result: If one of two synchronous clocks at A is moved in a closed curve with constant velocity until it returns to A , the journey lasting t seconds, then by the clock which has remained at rest the traveled clock on its arrival at A will be $1/2 t \sqrt{2/c^2}$ second slow.” “ Traduit par l’auteur. A. Einstein, 1905 “Zur Elektrodynamik bewegter Körper,” *Annalen der Physik* **17**, 819–981, Note 6, chapter 7 , pp. 904–905. Cité par Jammer 2006, *Op.cit.* p.164.

du vieillissement asymétrique», «le paradoxe des voyageurs de Langevin» ou, le plus souvent, «le paradoxe des jumeaux ».⁸²

Passons à présent à la dernière expérience de pensée de ce chapitre, l'ascenseur d'Einstein. C'est un cas d'exploration théorique, comme le démon de Maxwell, qui précède l'articulation d'une théorie.

3.5 L'ascenseur d'Einstein

Einstein est assurément le scientifique qui a conçu le plus d'expériences de pensée : il s'est imaginé en train de courir à la vitesse de la lumière, il a imaginé des expériences avec des corps noirs, des aimants, deux corps fluides, etc. (*cf.* Norton 1991 pour une analyse détaillée de plusieurs expériences de pensée d'Einstein). Ce fait ne nous étonne guère car il a révolutionné la science avec ses deux théories de la relativité et il était un fervent critique de l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique : nous remarquons en effet, sans analyser la cause de ce phénomène, que les expériences de pensée sont employées plus fréquemment durant le développement de nouvelles théories scientifiques, dans le double but de les critiquer et de les explorer. Nous avons vu comment Einstein critiquait l'interprétation de la mécanique quantique avec la boîte à photon. Dans cette section, nous analyserons son utilisation des expériences de pensée dans un but qu'on peut qualifier de positif, celui de l'exploration théorique.

Nous avons exposé quelques conséquences de la relativité restreinte d'Einstein à travers l'expérience de pensée des jumeaux de Langevin. Cette théorie se limite aux mouvements uniformes, et l'étape suivante pour Einstein est de chercher à étendre la relativité du mouvement aux mouvements accélérés, donc d'élaborer sa théorie de relativité générale. Plusieurs expériences de pensée seront employées par Einstein durant le développement de cette théorie. L'une des plus anciennes (1907) et des plus importantes (« the happiest thought of my life » selon Einstein⁸³), est celle de l'ascenseur. Einstein cherchait par ce moyen à montrer l'équivalence entre la gravité et l'accélération, un des principes de base de la future théorie de la relativité générale. C'est le principe

⁸² "Einstein's conclusion that a clock moving in a closed curve, starting at a point *A*, will be found, on returning to *A*, to be lagging behind a clock stationary at *A*, was indeed "peculiar," for it led to a paradox that stirred up widespread and heated controversies among leading physicists and philosophers. It became known as the "clock paradox," "the paradox of the asymmetric aging," "the paradox of Langevin's travellers," or, most frequently, "the twin paradox." traduit par l'auteur, Jammer, *Op.cit.*, pp. 164-165.

⁸³ Norton introduit cette expérience de pensée de la façon suivante : "The flash came in Einstein's first step. In 1907, while still a patent clerk, he was pondering how one might produce a relativistic theory of gravity and he was not having much success. Then he was struck by the fact that an observer in free fall no longer feels his own weight. He then hit upon what he called "the happiest thought of my life." One can produce gravity in gravity free space merely by reversing the process. Acceleration creates a gravitational field. This is his "principle of equivalence." Norton 2007, non publié.

d'équivalence⁸⁴, au moins une partie selon Norton : « (i) l'équivalence physique exacte du référentiel accéléré uniformément avec un champ inertiel et le référentiel correspondant avec un champ gravitationnel homogène non-accéléré, de sorte que (ii) on peut maintenant considérer le référentiel accéléré comme non-accéléré. L'ensemble de ce postulat est le principe de l'équivalence. Ici, je m'occuperai de l'argument d'Einstein pour (i) [avec l'expérience de pensée de l'ascenseur]. Si Einstein a réussi à établir (ii) reste une question controversée. »⁸⁵

Cette expérience de pensée sera publiée en 1917, puis en 1938⁸⁶ (Norton souligne qu'en 1911 et 1916 Einstein la présente sous forme d'argument qui aboutit à la même conclusion). Dans cette section, nous allons exposer la version parue dans le livre d'Einstein et Infeld de 1938.

Avant de présenter l'expérience de pensée dans la section intitulée « à l'extérieur et à l'intérieur de l'ascenseur⁸⁷ », Einstein et Infeld rappellent que la loi d'inertie « a été acquise par la contemplation d'une expérience idéalisée » et soulignent que « nous avons reconnu l'importance de l'expérience idéalisée créée par la pensée. Ici encore, nous discuterons d'expériences idéalisées. Bien qu'elles aient l'air fantastique, elles vont, cependant, nous aider à comprendre sur la relativité autant qu'il est possible par nos méthodes simples. Nous avons, auparavant, des expériences idéalisées avec une chambre en mouvement uniforme. Ici, pour changer, nous aurons un ascenseur qui tombe. »⁸⁸

Ces « expériences idéalisées » vont nous aider à *comprendre* la théorie de relativité. Cette affirmation ne nous étonne guère ; comme cette expérience de pensée est publiée en 1938, elle succède à l'élaboration de la théorie. Elle joue alors une fonction d'exploration théorique à caractère pédagogique ou heuristique ; Einstein en 1938 s'en sert pour exposer sa théorie de la

⁸⁴ On dénombre trois principes d'équivalence, l'un faible qui est discuté dans cette expérience de pensée et l'autre forte. Cf. Norton 1985 pour une analyse du principe d'équivalence d'Einstein.

⁸⁵ "(i) the exact physical equivalence of the uniformly accelerating frame with inertial field and the corresponding unaccelerated frame with a homogeneous gravitational field, so that (ii) one could now regard the accelerated frame as unaccelerated. This entire postulate is the principle of equivalence. Here I shall be concerned with Einstein's argument for (i) [avec l'expérience de pensée de l'ascenseur]. Whether Einstein succeeded in establishing (ii) remains controversial." Traduit par l'auteur, p. 137 John D. Norton, 1991, *Thought Experiments in Einstein's Work*, dans *Thought Experiments In Science and Philosophy*, eds. T. Horowitz, G. J. Massey, Savage, MD: Rowman and Littlefield, 1991. pp.129-144.

⁸⁶ Einstein 1917, p. 66-70; Einstein and Infeld 1938, pp. 230-35.

⁸⁷ "outside and inside the lift".

⁸⁸ "was gained by the contemplation of an idealized experiment ... we recognized the importance of the idealized experiment created by thought. Here again, idealized experiments will be discussed. Although these may sound very fantastic, they will, nevertheless, help us to *understand* as much about relativity as is possible by our simple methods. We had previously the idealized experiments with a uniformly moving room. Here, for a change, we shall have a falling lift." *Ibid* p. 226.

relativité générale avec un exemple simple. Mais il faut se rappeler qu'Einstein l'a conçue en 1907, huit ans avant la publication de la théorie de la relativité générale, et à l'époque elle avait un rôle différent. Elle a permis à Einstein d'explorer une théorie future qui devait décrire cette équivalence entre gravitation et accélération.

Einstein commence par décrire le scénario de l'expérience de pensée d'un ascenseur en chute libre depuis une très haute tour et par la suite s'attaque au cas d'un ascenseur tiré avec une force constante dans un espace éloigné de toute source gravitationnelle :

« Quelqu'un à l'extérieur a fixé une corde à l'ascenseur et tire, avec une force constante, dans le sens indiqué dans notre dessin [figure 3.3]. La manière dont cela se fait est indifférente. Étant donné que les lois de la mécanique sont valides dans ce c.s. [co-ordinate system, système de coordonnées], l'ensemble de l'ascenseur se déplace avec une accélération constante dans le sens du mouvement. Encore une fois, nous allons entendre l'explication des phénomènes en cours dans l'ascenseur, donnée à la fois par les observateurs à l'extérieur et ceux qui sont à l'intérieur.⁸⁹

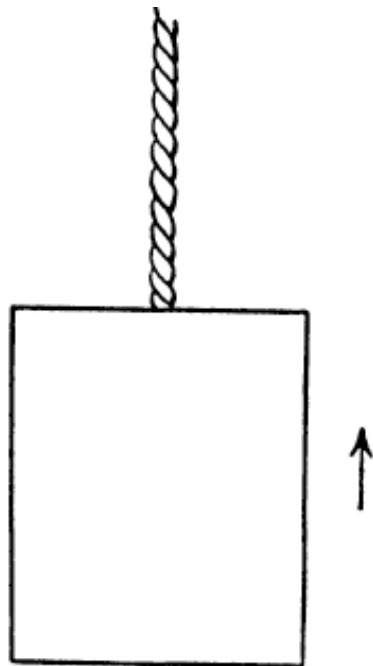


Figure 3.3 L'ascenseur d'Einstein (Einstein et Infeld 1938, p. 230)

Einstein imagine le scénario d'un ascenseur tiré avec une force constante, qui subit donc une accélération constante. Cet ascenseur, loin de toute source gravitationnelle, contient un physicien

⁸⁹ “Someone outside has fastened a rope to the lift and is pulling, with a constant force, in the direction indicated in our drawing [figure 3.3]. It is immaterial how this is done. Since the laws of mechanics are valid in this c.s., the whole lift moves with a constant acceleration in the direction of the motion. Again we shall listen to the explanation of phenomena going on in the lift and given by both the outside and inside observers.”

qui ne peut pas voir l'extérieur, et qui conduit certaines expériences. Ce physicien est parfois décrit comme étant né à l'intérieur de l'ascenseur et d'autres fois comme ayant été drogué et mis à l'intérieur sans qu'il le sache. Quoiqu'il en soit, l'important est que ce physicien ne peut pas savoir qu'il est dans cet ascenseur en mouvement accéléré, loin de toute source gravitationnelle.

Puis, Einstein imagine la discussion suivante avec un observateur extérieur qui est en mouvement avec l'ascenseur :

L'observateur extérieur : Mon c.s. est inertiel. L'ascenseur se déplace avec une accélération constante, car une force constante agit. Les observateurs à l'intérieur sont en mouvement absolu, pour eux, les lois de la mécanique ne sont pas valides. Ils ne trouvent pas que les corps sur lesquels aucune force n'agit sont au repos. Si un corps est laissé à lui-même, il se heurte bientôt au plancher de l'ascenseur, car le sol se déplace vers le haut, vers le corps. C'est ce qui se passe exactement de la même manière pour une montre et un mouchoir. Il me semble très étrange que l'observateur à l'intérieur de l'ascenseur doive toujours être sur le « sol », parce que dès qu'il saute, le sol va le rejoindre à nouveau.

L'observateur intérieur : Je ne vois aucune raison de croire que mon ascenseur est en mouvement absolu. Je suis d'accord que mon c.s., rigidement lié avec mon ascenseur, n'est pas vraiment inertiel, mais je ne crois pas que cela ait quelque chose à voir avec le mouvement absolu. Ma montre, mon mouchoir, et tous les corps tombent parce que tout l'ascenseur est dans un champ gravitationnel. Je remarque exactement les mêmes types de mouvement que l'homme sur la Terre. Il les explique très simplement par l'action d'un champ gravitationnel. La même chose vaut parfaitement pour moi.⁹⁰

Cette discussion met en évidence deux interprétations différentes capable de décrire les expériences effectuées à l'intérieur de l'ascenseur en accélération, mais loin de toute force gravitationnelle. L'observateur extérieur, en admettant la notion newtonienne de mouvement absolu, décrit l'observateur intérieur comme étant en mouvement absolu, car pour ce dernier les lois de la physique newtonienne ne sont pas valides : les objets qui ne subissent aucune force ne sont pas au repos. Il considère par contre que son référentiel à lui est inertiel et il sait que l'ascenseur est en accélération uniforme, car il subit une force constante loin de toute force gravitationnelle. En même temps, l'observateur intérieur voit que les objets se comportent comme s'il était sur Terre et les décrit comme subissant une force gravitationnelle, mais sans aucune accélération. L'observateur intérieur infère alors qu'il est stationnaire dans un champ gravitationnel.

⁹⁰ "The outside observer: My c.s. is an inertial one. The lift moves with constant acceleration, because a constant force is acting. The observers inside are in absolute motion, for them the laws of mechanics are invalid. They do not find that bodies, on which no forces are acting, are at rest. If a body is left free, it soon collides with the floor of the lift, since the floor moves upward toward the body. This happens exactly in the same way for a watch and for a handkerchief. It seems very strange to me that the observer inside the lift must always be on the "floor", because as soon as he jumps the floor will reach him again.

The inside observer: I do not see any reason for believing that my lift is in absolute motion. I agree that my c.s., rigidly connected with my lift, is not really inertial, but I do not believe that it has anything to do with absolute motion. My watch, my handkerchief, and all bodies are falling because the whole lift is in a gravitational field. I notice exactly the same kinds of motion as the man on the earth. He explains them very simply by the action of a gravitational field. The same holds good for me."

Einstein souligne que ces deux descriptions, peuvent expliquer les expériences effectuées dans l'ascenseur, et que les deux sont cohérentes :

Ces deux descriptions, l'une par l'observateur extérieur, l'autre par l'observateur intérieur, sont tout à fait cohérentes, et il n'y a aucune possibilité de décider laquelle d'entre elles est juste. Nous pouvons admettre l'une ou l'autre pour la description des phénomènes dans l'ascenseur : soit le mouvement non uniforme et l'absence d'un champ gravitationnel, avec l'observateur extérieur, soit le repos et la présence d'un champ gravitationnel, avec l'observateur à l'intérieur.⁹¹

L'analyse faite par Einstein de la cohérence de ces deux descriptions aboutit à la conclusion qu'il n'y a aucune façon possible de décider si l'une doit être rejetée au profit de l'autre. Einstein va alors réfuter la légitimité du recours à la notion de mouvement absolu par l'observateur extérieur :

L'observateur extérieur peut supposer que l'ascenseur est en mouvement non uniforme "absolu". Mais un mouvement qui est effacé par l'hypothèse de l'action d'un champ gravitationnel ne peut pas être considéré comme un mouvement absolu.⁹²

Comme cette notion de mouvement absolu est remplacée aisément, dans la description de l'observateur intérieur, par sa supposition, suite aux expériences qu'il conduit, qu'il est dans un champ gravitationnel, alors Einstein rejette cette notion. Einstein ne s'arrête pas là, il va même proposer une expérience possible, peut-être une expérience « *cruciale* », pour tenter de séparer ces deux descriptions, et rejeter l'une au détriment de l'autre. Il imagine alors l'expérience suivante, qui consiste à faire entrer un faisceau de lumière par un trou dans l'ascenseur en mouvement. Il va imaginer encore une fois la discussion entre ces deux observateurs :

Il existe, peut-être, un moyen de sortir de cette ambiguïté de ces deux descriptions différentes, et on pourrait peut-être décider en faveur de l'une contre. Imaginez qu'un rayon lumineux pénètre dans l'ascenseur horizontalement à travers une fenêtre latérale et atteint le mur opposé après un très court laps de temps. Voyons encore une fois comment le chemin de la lumière serait prédit par les deux observateurs.

L'observateur extérieur, qui croit au mouvement accéléré de l'ascenseur, dirait: Le rayon lumineux pénètre par la fenêtre et se déplace horizontalement, le long d'une ligne droite et à vitesse constante, vers le mur opposé [figure 3.4]. Mais l'ascenseur se déplace vers le haut, et pendant le temps où la lumière se déplace vers le mur opposé, l'ascenseur change de position. Par conséquent, le rayon le rencontrera en un point pas exactement à l'opposé de son point d'entrée, mais un peu en dessous. La différence sera très faible, mais elle existe néanmoins, et le rayon lumineux se déplace, par rapport à

⁹¹ "These two descriptions, one by the outside, the other by the inside, observer, are quite consistent, and there is no possibility of deciding which of them is right. We may assume either one of them for the description of phenomena in the lift: either non-uniform motion and absence of a gravitational field with the outside observer, or rest and the presence of a gravitational field with the inside observer."

⁹² "The outside observer may assume that the lift is in "absolute" non-uniform motion. But a motion which is wiped out by the assumption of an acting gravitational field cannot be regarded as absolute motion."

l'ascenseur, non pas le long d'une ligne droite, mais plutôt le long d'une ligne légèrement courbée. La différence est due à la distance parcourue par l'ascenseur pendant le temps où le rayon traverse l'intérieur.⁹³

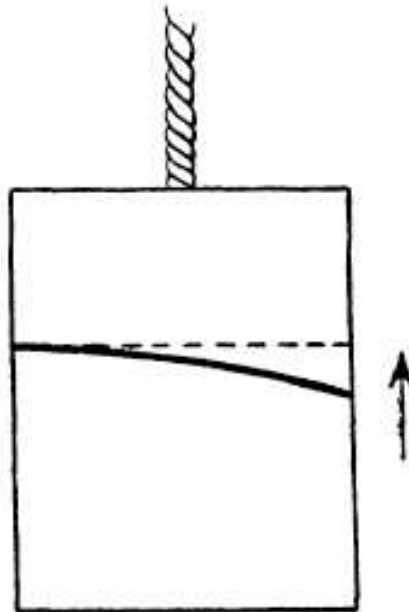


Figure 3.4 : Un faisceau de lumière pénétrant l'ascenseur d'Einstein (*Ibid.* p. 233)

L'observateur intérieur, qui croit à l'action du champ gravitationnel sur tous les objets dans son ascenseur, dirait : il n'y a pas de mouvement accéléré de l'ascenseur, mais seulement l'action du champ gravitationnel. Un rayon de lumière est en apesanteur et, par conséquent, ne sera pas affecté par le champ gravitationnel. Si le rayon est envoyé dans une direction horizontale, il rencontrera le mur à un point exactement opposé à celui par lequel il est entré.⁹⁴

À partir de cette expérience « cruciale » Einstein affirme qu'apparemment il existe une façon de trancher entre ces deux descriptions, et donc tout son argument précédent sur l'équivalence de ces deux descriptions sera détruit:

⁹³ "There is, possibly, a way out of the ambiguity of two such different descriptions, and a decision in favour of one against the other could perhaps be made. Imagine that a light ray enters the lift horizontally through a side window and reaches the opposite wall after a very short time. Again let us see how the path of the light would be predicted by the two observers.

The outside observer, believing in accelerated motion of the lift, would argue: The light ray enters the window and moves horizontally, along a straight line and with a constant velocity, toward the opposite wall [figure 3.3]. But the lift moves upward, and during the time in which the light travels toward the wall the lift changes its position. Therefore, the ray will meet at a point not exactly opposite its point of entrance, but a little below. The difference will be very slight, but it exists nevertheless, and the light ray travels, relative to the lift, not along a straight, but along a slightly curved line. The difference is due to the distance covered by the lift during the time the ray is crossing the interior."

⁹⁴ "*The inside observer*, who believes in the gravitational field acting on all objects in his lift, would say: there is no accelerated motion of the lift, but only the action of the gravitational field. A beam of light is weightless and, therefore, will not be affected by the gravitational field. If sent in a horizontal direction, it will meet the wall at a point exactly opposite to that at which it entered."

Il semble, d'après cette discussion, qu'il y a une possibilité de décider entre ces deux points de vue opposés, puisque le phénomène serait différent pour les deux observateurs. S'il n'y a rien d'illogique dans l'une des explications que nous venons de citer, alors tout notre argument précédent est détruit, et nous ne pouvons pas décrire tous les phénomènes de deux façons cohérentes, avec et sans un champ gravitationnel.⁹⁵

Mais immédiatement après, Einstein va rejeter la description offerte par l'observateur intérieur. Il va en fait expliquer l'erreur dans le raisonnement de l'observateur intérieur pour écarter la possibilité que cette expérience permette de faire un choix entre les deux descriptions, et donc sauver sa conclusion précédente :

Mais il y a, heureusement, une faute grave dans le raisonnement de l'observateur intérieur, ce qui permet de sauver notre conclusion précédente. Il a dit : « Un rayon de lumière est en apesanteur et, par conséquent, ne sera pas affecté par le champ gravitationnel. » Cela ne peut pas être vrai ! Un rayon de lumière transporte de l'énergie et l'énergie a une masse. Mais chaque masse inertielle est attirée par le champ gravitationnel, puisque les masses inertielles et gravitationnelles sont équivalentes. Un rayon de lumière va infléchir sa trajectoire dans un champ gravitationnel, exactement comme le ferait un corps s'il était lancé horizontalement avec une vitesse égale à celle de la lumière. Si l'observateur intérieur avait raisonné correctement et avait pris en compte la courbure des rayons lumineux dans un champ gravitationnel, alors ses résultats auraient été exactement les mêmes que celles d'un observateur extérieur.⁹⁶

Puis il ajoute la précision suivante qui explique pourquoi on ne voit pas les rayons de lumière s'infléchir sur Terre, en présence du champ gravitationnel terrestre, tout en affirmant que la courbure de la lumière est vérifiée expérimentalement, par Eddington en 1919, lors de l'éclipse solaire. Expérience par ailleurs analysée comme déterminante dans la vérification de sa théorie de la relativité générale :

Le champ gravitationnel de la terre est, bien sûr, trop faible pour que la courbure des rayons lumineux en son sein puisse être prouvée directement par l'expérience. Mais les fameuses

⁹⁵ "It seems from this discussion that there is a possibility of deciding between these two opposite points of view as the phenomenon would be different for the two observers. If there is nothing illogical in either of the explanations just quoted, then our whole previous argument is destroyed, and we cannot describe all phenomena in two consistent ways, with and without a gravitational field."

⁹⁶ "But there is, fortunately, a grave fault in the reasoning of the inside observer, which saves our previous conclusion. He said: "A beam of light is weightless and, therefore, will not be affected by the gravitational field." This cannot be right! A beam of light carries energy and energy has mass. But every inertial mass is attracted by the gravitational field, as inertial and gravitational masses are equivalent. A beam of light will bend in a gravitational field exactly as a body would if thrown horizontally with a velocity equal to that of light. If the inside observer had reasoned correctly and had taken into account the bending of light rays in a gravitational field, then his results would have been exactly the same as those of an outside observer."

expériences réalisées pendant les éclipses solaires montrent, de façon concluante quoique indirectement, l'influence d'un champ gravitationnel sur le chemin d'un rayon lumineux.⁹⁷

En conclusion, Einstein va lui-même expliciter la fonction d'exploration théorique que possède son expérience de pensée, y compris en 1938 :

Il résulte de ces exemples qu'il existe un espoir fondé de formuler une physique relativiste. Mais pour cela, nous devons d'abord résoudre le problème de la gravitation.

Nous avons vu dans l'exemple de l'ascenseur la cohérence des deux descriptions. Le mouvement non uniforme peut être admis, ou ne pas l'être. Nous pouvons éliminer le mouvement "absolu" de nos exemples avec un champ gravitationnel. Mais il n'y a rien d'absolu dans le mouvement non uniforme. Le champ gravitationnel est capable de l'anéantir complètement.

Les fantômes du mouvement absolu et des c.s. inertiels peuvent être expulsés de la physique et une *nouvelle physique relativiste construite*. Nos expériences idéalisées montrent comment le problème de la théorie de la relativité générale est étroitement liée à celle de la gravitation et pourquoi l'équivalence de la masse gravitationnelle et inertielle est donc essentielle pour cette connexion. Il est clair que la solution du problème de la gravitation dans la théorie de la relativité générale doit être différente de sa solution dans la théorie newtonienne. Les lois de la gravitation doivent, comme toutes les lois de la nature, être formulées pour tous les c.s. possibles, alors que les lois de la mécanique classique, telle que formulées par Newton, ne sont valides que dans les c.s. inertiels. » (C'est nous qui soulignons)⁹⁸

Bien sûr, en 1938 il va exposer tout de suite après sa théorie de relativité générale, tandis qu'en 1907 il ne pouvait évidemment le faire, puisque cette expérience de pensée a précédé cette théorie de huit années. Einstein est explicite en 1938 : « a new relativistic physics *built* »

Notons enfin un fait intéressant concernant le mouvement absolu, cette notion sera soutenue ou rejetée au moyen d'expériences de pensée : Newton argumente en sa faveur avec l'expérience de pensée des seaux. Cette dernière sera réinterprétée par Mach pour réfuter la conclusion de Newton. Et enfin, comme on vient de le voir, Einstein écarte cette notion de sa nouvelle physique, également

⁹⁷ "The gravitational field of the earth is, of course, too weak for the bending of light rays in it to be proved directly, by experiment. But the famous experiments performed during the solar eclipses show, conclusively though indirectly, the influence of a gravitational field on the path of a light ray."

⁹⁸ "It follows from these examples that there is a well-founded hope of formulating a relativistic physics. But for this we must first tackle the problem of gravitation.

We saw from the example of the lift the consistency of the two descriptions. Non-uniform motion may, or may not, be assumed. We can eliminate "absolute" motion from our examples by a gravitational field. But then there is nothing absolute in the non-uniform motion. The gravitational field is able to wipe it out completely.

The ghosts of absolute motion and inertial c.s. can be expelled from physics and a new relativistic physics built. Our idealized experiments show how the problem of the general relativity theory is closely connected with that of gravitation and why the equivalence of gravitational and inertial mass is so essential for this connection. It is clear that the solution of the gravitational problem in the general theory of relativity must differ from the Newtonian one. The laws of gravitation must, just as all laws of nature, be formulated for all possible c.s., whereas the laws of classical mechanics, as formulated by Newton, are valid only in inertial c.s." Traduit par l'auteur, Albert Einstein et Leopold Infeld, 1938, *The evolution of physics*, Cambridge University Press, pp. 231- 235.

grâce à une expérience de pensée. Ce procédé s'avère alors un outil de choix dans le support ou la critique de la notion de mouvement absolu, notion dont le moins que l'on puisse dire est qu'elle échappe aux méthodes traditionnelles et empiriques.

3.6 Conclusion

La fonction d'exploration théorique des expériences de pensée qui viennent après l'élaboration d'une théorie, on s'en doute, est moins sensationnelle, car moins scientifiquement féconde, que celles qui la précèdent; la théorie est déjà établie et ces expériences de pensée ne font que clarifier son application. Dans ces cas, la théorie décrit déjà le phénomène imaginé dans le scénario de l'expérience de pensée, et ce d'une façon mathématiquement précise. Le phénomène imaginaire peut refléter un phénomène naturel bien connu, comme la rotation orbitale des planètes, ou refléter un phénomène bizarre au premier abord, mais qui est en fait bien expliqué par cette théorie, comme le retardement de l'horloge, physique ou biologique, quand on est en mouvement. Ces expériences de pensée ne jouent alors qu'un rôle pédagogique ou heuristique de nature explicatif.

En revanche, les expériences de pensée qui précèdent l'élaboration d'une théorie poussent les scientifiques vers de nouvelles avenues théoriques : la mécanique statistique et la relativité générale dans nos deux exemples. Leur pouvoir d'exploration s'avère alors propice à de nouvelles avancées théoriques. Le démon de Maxwell, dans toutes ses versions, explore en fait de nouvelles avenues théoriques, avec plus ou moins de succès, la thermodynamique de l'information étant un exemple de théorie discutable qui se base sur différentes versions de l'expérience de pensée du démon de Maxwell.⁹⁹

⁹⁹ Cf. Earman and Norton 1999 pour une critique des approches basées sur la thermodynamique de l'information et pour une analyse des différentes expériences de pensée d'un démon intelligent depuis Szilard 1929.

Partie II

Le débat épistémologique autour de la tour de Pise

Introduction

Dans la première partie de cette thèse, nous avons classé les expériences de pensée selon leurs fonctions. Nous avons analysé plusieurs cas d'étude, en nous appuyant sur les textes originaux de leurs auteurs, pour ne mettre l'accent que sur le but de chaque scientifique dans son utilisation de l'expérience de pensée. Nous n'avons pas cherché s'ils étaient fondés à soutenir telle ou telle conclusion, ou si l'expérience de pensée justifie sa conclusion. Nous avons seulement exposé la fonction qu'avait chaque expérience de pensée pour son utilisateur. Dans les deux parties suivantes, nous allons regarder si et comment chaque expérience de pensée justifie sa conclusion.

Dans la partie III, nous proposerons et défendrons une structure générale des expériences de pensée. Mais auparavant, nous analyserons dans cette partie II, de façon critique, les deux approches épistémologiques qui rythment le débat actuel sur les expériences de pensée. La première est celle de John D. Norton, qui propose une méthode de justification des expériences de pensée en les réduisant à des arguments logiques. La conclusion de l'expérience de pensée est alors justifiée si la conclusion de l'argument, déductif ou inductif, est justifiée. La seconde, celle de James Robert Brown, permet à celui-ci d'affirmer que certaines expériences de pensée, les expériences de pensée *platoniciennes* (selon sa classification, présentée dans l'introduction de la partie I), « transcendent l'empirisme » : leurs conclusions sont justifiées par une sorte de perception platonicienne, ou d'intuition, des objets abstraits (les lois de la nature), analogue à notre faculté de perception sensorielle des objets du monde physique (un rocher par exemple).

Cette partie II aura pour but de critiquer ces deux approches et leurs analyses respectives de l'expérience de pensée de la tour de Pise en révélant sa vraie fonction pour Galilée. Nous chercherons à montrer que cette expérience de pensée n'est pas capable de nous *révéler* et de *justifier* la loi de Galilée sur l'égalité de vitesse de chute libre de *tous* les corps dans le *vide*. *Elle n'était pas non plus utilisée par Galilée dans ce but*. Cette fonction a été attribuée par Brown à cette expérience de pensée et reprise par la suite dans un but critique par Norton. Cette partie sera divisée en deux chapitres :

Dans le chapitre 4, nous présenterons le débat épistémologique sur les expériences de pensée scientifiques, principalement l'opposition entre les conceptions de Norton et de Brown. Ce débat

peut se comprendre principalement à travers l'expérience de pensée de la tour de Pise, car c'est l'exemple canonique de l'expérience de pensée platonicienne pour Brown. Norton, pour sa part, propose une réduction de cet exemple à un argument logique. Nous exposerons ces deux approches, en particulier leurs analyses du cas de la tour de Pise. Nous réservons nos critiques pour la fin du chapitre 5, après une analyse historique de l'expérience de pensée de Galilée. Cette analyse historique contraste avec l'analyse anhistorique de Brown, que l'on trouve assez fréquemment dans la littérature. Norton, dans sa réponse à Brown, utilise aussi cette version anhistorique, même s'il précise que l'expérience de pensée se situe dans la discussion sur la possibilité de l'existence du vide.

Dans le chapitre 5, nous retraçons l'histoire de cette expérience de pensée depuis sa première introduction par Galilée, dans un manuscrit non publié de 1590, le *De Motu*. Pour être précis, son origine se trouve probablement, selon Koyré, chez Jean Baptiste Benedetti, mais avec un scénario un peu différent, impliquant la chute de deux briques identiques. Galilée, tout comme Benedetti avant lui, utilise cette expérience de pensée pour réfuter le premier principe de la théorie d'Aristote sur la vitesse de chute, principe qui établit la proportionnalité linéaire de la vitesse de chute d'un mobile et du poids absolu de ce mobile (cf. 2.2). Après cette réfutation, le jeune Galilée, tout comme Benedetti, défend une première théorie de la vitesse de chute : la vitesse de chute d'un mobile est proportionnelle à son poids spécifique dans un milieu donné. On verra que Galilée argumente en faveur de cette théorie au moyen d'une analogie archimédienne sur la flottabilité des corps (cf. 5.2.2), analogie qui suivra l'expérience de pensée.

Quatre décennies plus tard, Galilée a recours, à deux reprises, à la même expérience de pensée. La première fois dans les *Apostilles à Rocco*, puis quelques années plus tard, dans les *Discours*. Dans ces deux occurrences des années 1630, Galilée utilise l'expérience de pensée de la tour de Pise dans le même but qu'en 1590, c'est-à-dire un but réfutatoire. La différence entre 1590 et les années 1630 se trouve dans ce qui suit la réfutation d'Aristote : maintenant Galilée va déployer une stratégie argumentative complexe, qui commence par l'expérience de pensée, mais n'est nullement limitée à cette dernière, pour défendre sa théorie "générale" sur l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps *dans le vide* (cf. 5.3)

Cette analyse historique et fonctionnelle nous permettra de tirer plusieurs conclusions sur les deux approches de Norton et Brown, dans 5.4 et 5.5 respectivement :

Nous verrons que chez Norton, le rôle attribué aux « particuliers », c'est à dire les objets

(deux mobiles de la même matière, une horloge), des êtres vivants (un physicien dans l'ascenseur, un chat), ou tout autre élément fictif imaginé dans les scénarios des expériences de pensée (un démon), est problématique, ou du moins pas assez précisé : il soutient qu'ils sont *éliminables* de l'argument qui remplacera l'expérience de pensée. Donc le choix et le rôle des particuliers pertinents dans une expérience de pensée est marginalisé chez Norton. On reviendra dans le chapitre 6 sur cette notion de particuliers, spécifiquement sur les différentes notions de possibilité associées à ces particuliers dans les scénarios des expériences de pensée.

Du côté opposé, l'approche platonicienne de Brown se trouve considérablement affaiblie par notre analyse de l'expérience de la tour de Pise, dans la mesure où cette approche se fonde principalement sur le pouvoir que cette expérience de pensée aurait de nous *révéler* et de *justifier* la théorie générale de Galilée. Or, non seulement l'expérience de pensée de la tour de Pise n'était pas utilisée par Galilée dans ce but, mais elle ne peut pas non plus révéler, *à elle seule*, la théorie générale de la vitesse de chute. En effet, les deux théories de Galilée, restreinte et générale, sont compatibles avec l'égalité de la vitesse de chute des mobiles de même matière dans le vide.

Chapitre 4

Le débat épistémologique sur les expériences de pensée

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, divisé en trois sections, nous analyserons une partie du débat épistémologique actuel sur les expériences de pensée scientifiques.

Dans la section 4.2, à caractère introductif, nous retraçons l'origine de ce débat, qui se situe dans une tentative pour répondre à la question épistémologique formulée par Kuhn. Cette dernière reflète notre étonnement face à la faculté des expériences de pensée à nous fournir une connaissance nouvelle de la nature. Nous analyserons la question de Kuhn en plusieurs étapes : dans cette section nous abordons toutes les notions explicites, comme « connaissance nouvelle », tandis que dans le chapitre 6 nous analyserons la supposition sous-jacente concernant la « familiarité » des données dans une expérience de pensée. La plupart des approches épistémologiques prennent comme point de départ la question de Kuhn. Nous en examinerons deux dans ce chapitre.

Dans la section 4.3, nous présenterons l'approche platonicienne de Brown. Ce dernier attribue à certaines expériences de pensée, les expériences *platoniciennes*, le pouvoir de *révéler et justifier* une nouvelle loi de la nature, et ce de façon *a priori*. Cette fonction nous rappelle la fonction conférée aux *expériences cruciales*, c'est-à-dire celle du choix théorique. Nous analyserons le cadre réaliste général de Brown (4.3.1), son approche platonicienne des expériences de pensée (4.3.2), son analyse de l'expérience de pensée de la tour de Pise (4.3.3) et enfin la notion de

¹⁰⁰ "Thought experiments are supposed to give us knowledge of the natural world. From where does this knowledge come?" Traduit par l'auteur.

fonction platonicienne (4.3.4).

Dans la section 4.4, nous présenterons l'approche compatible avec l'empirisme de Norton. Ce dernier critique l'approche de Brown, en particulier son analyse de la tour de Pise, et réduit l'expérience de pensée à un argument déductif dont la conclusion est la loi de la chute des corps de Galilée. Nous analyserons d'abord l'approche de Norton (4.4.1), puis sa réduction de l'expérience de pensée de la tour de Pise à un argument déductif. Nous commenterons, en particulier, son introduction d'une prémisse « cachée » mais indispensable pour que l'argument puisse *révéler* et *justifier* la conclusion (4.4.2). Enfin nous présenterons la version, proposée par Gendler, d'un argument à trois prémisses auquel l'expérience de pensée de la tour de Pise pourrait être réduite, sans particuliers (4.4.3).

Dans ce chapitre, nous limiterons notre analyse du débat épistémologique sur les expériences de pensée aux deux approches de Brown et de Norton, bien que l'on trouve dans la littérature différentes approches épistémologiques qui s'étalent sur tout le spectre philosophique. La raison principale est que ce sont bien ces deux approches qui rythment ce débat ; la plupart des philosophes proposent leur propre approche en critiquant principalement le réalisme radical de Brown et l'empirisme radical de Norton. Une deuxième raison est qu'on peut diviser ces autres approches en deux grandes catégories : approches *expérimentales* et approches du type *modèle mental*, qu'on abordera, d'une façon critique, dans le chapitre 6. Précisément, nous critiquerons une particularité commune de ces approches ; elles demandent toutes que les scénarios des expériences de pensée soient nomologiquement possibles, ou en principe réalisables.

4.2 La question épistémologique

Dans son article de 1964, Thomas Kuhn formule *la question épistémologique*¹⁰¹ qui sera traitée par la plupart des philosophes des sciences s'intéressant au sujet des expériences de pensée scientifiques, sans pour autant qu'ils se rapprochent d'un consensus. C'est plutôt l'inverse que l'on trouve dans cette littérature, à savoir une multitude de réponses et d'approches épistémologiques. Kuhn pose la question de savoir « comment, [...] en se fondant exclusivement sur des *données familières*, une expérience de pensée peut mener à de *nouvelles connaissances* ou à une

¹⁰¹ Cette question est souvent appelée paradoxe de Kuhn. Ne voyant aucun paradoxe au sens logique du terme, nous préférons l'appeler question.

compréhension nouvelle de la nature » (C'est nous qui soulignons)¹⁰², et y répond. Cette question demande une analyse en plusieurs étapes. Dans la première étape, qui sera entreprise dans ce chapitre, nous analyserons la question sans regarder de près les suppositions qui lui sont sous-jacentes, et que nous présentons ci-dessous.

La première concerne la « familiarité » des « données » dans une expérience de pensée. Nous donnerons une analyse plus poussée au chapitre 6, surtout concernant la condition de familiarité, mais il est nécessaire d'en dire quelques mots ici. Kuhn suppose que les données qui figurent dans le scénario de l'expérience de pensée, ou les particuliers pour reprendre le terme de Norton (*cf.* 4.4), doivent être « déjà connues » et « largement acceptées ». Leur nature doit être « familière ». Les données qui figurent dans le scénario de l'expérience de pensée doivent *ressembler* aux données du monde réel, certes idéalisées (Kuhn utilise le concept de *vérisimilitude*). Pour en dire plus, il faut définir ce qui compte comme « données » dans une expérience de pensée scientifique et analyser la nature de cette dernière, en particulier déterminer si elle est possible, et en quel sens (*cf.* chapitre 6). Dans cette partie II, nous commencerons notre analyse de cette notion de données ou de « particulier » dans l'approche de Norton.

La deuxième supposition sous-jacente concerne notre étonnement, légitime, face au constat selon lequel on obtient une connaissance nouvelle à partir d'une expérience de pensée. Cet étonnement émane de la thèse sous-jacente à la question de Kuhn, selon laquelle une connaissance nouvelle doit nécessairement être le produit d'une donnée nouvelle, provenant d'un contact avec le phénomène étudié. Cette nouveauté épistémique appelle une explication quand elle provient de données familières, déjà connues, surtout si cette nouveauté est mise en regard de celle qu'une expérience réelle peut fournir, et dont la conclusion se base sur de nouvelles données empiriques. Cet étonnement paraît aller de soi et Kuhn ne fait qu'explicitement la bonne question qui vient naturellement à l'esprit.

La question épistémologique de Kuhn consiste alors à demander, si les expériences de pensée sont censées nous donner une connaissance nouvelle de la nature, d'où vient cette connaissance. Conclure quelque chose de nouveau concernant la nature sans aller la consulter semble effectivement mystérieux. Pour analyser ce pouvoir épistémique « mystérieux » des expériences de pensée, il faut dire ce qu'on entend par « connaissance nouvelle » qu'on obtient suite à une expérience de pensée. Ensuite, il faut dire comment une expérience de pensée peut nous fournir

¹⁰² Kuhn, Thomas S., 1964, "A Function for Thought Experiments", dans T. Kuhn, *The Essential Tension*, Chicago: University of Chicago Press, 1977, 240–265. "How [...] relying exclusively upon familiar data, can a thought experiment lead to new knowledge or to new understanding of nature?", traduit par l'auteur, p. 241.

cette connaissance nouvelle et comment elle la justifie. Parmi plusieurs approches qui proposent d'analyser ce pouvoir épistémique, on en examinera deux dans ce chapitre. Le débat qu'elles suscitent s'étale sur tout le spectre philosophique et est rythmé par les deux approches qui se trouvent à ces deux extrémités. Ce sont l'approche platonicienne de James Robert Brown (4.3) et l'approche compatible avec l'empirisme de John D. Norton (4.4).

Tamar Szabò Gendler résume le débat entre Norton et Brown par deux questions, en adoptant l'approche classique tripartite de la connaissance comme croyance vraie justifiée :

- (1) Est ce que les nouvelles croyances, que nous formons sur la base de la contemplation de scénarios imaginaires, sont effectivement formées à la suite d'inférences, inductives ou déductives, de prémisses connues à des conclusions qu'elles impliquent ?
- (2) Dans la mesure où les nouvelles croyances ne sont pas ainsi formées, sont-elles justifiées?¹⁰³

Tandis que Norton répond à (1) positivement et à (2) par la négative, Brown donne des réponses inverses. On remarquera que même si, de chaque côté du débat, plusieurs exemples d'expériences de pensée sont utilisées, la tour de Pise tient une place centrale, surtout dans l'approche de Brown : c'est son exemple canonique d'expérience de pensée « *platonicienne* ». C'est la version de l'expérience de pensée de Galilée défendue par Brown que Norton reprend, dans le but de réfuter son pouvoir platonicien. Enfin, c'est cette expérience qui est également analysée par leurs critiques : Gendler (1998) par exemple critique l'approche de Norton ainsi que celle de Brown en analysant la tour de Pise à son tour. Ce faisant, elle propose une approche alternative, le constructivisme. De même, afin d'évaluer ces deux approches (*cf.* 5.4 et 5.5 qui suivent notre analyse historique de la tour de Pise des sections précédentes du chapitre 5), nous examinerons dans ce chapitre leurs analyses de la tour de Pise (4.3.3 et 4.4.2).

4.3 James Robert Brown : une approche platonicienne

L'approche épistémologique des expériences de pensée de Brown s'insère dans sa critique générale contre l'empirisme. Il voit dans les expériences de pensée un outil qui transcende l'empirisme et propose une épistémologie « platonicienne » des expériences de pensée afin de répondre à la question formulé par Kuhn. Selon lui, certaines expériences de pensée peuvent nous révéler une nouvelle loi de la nature et sont fondées à le faire par une sorte d'intuition. Pour défendre son

¹⁰³ Tamar Szabò Gendler, Thought Experiments Rethought — and Reperceived, *Philosophy of Science*, 71: 1152–1164. Traduit par l'auteur, "(1) Are the new beliefs that we form on the basis of the contemplation of imaginary scenarios actually formed as the result of inference from known premises to inductively or deductively implied conclusions? (2) To the extent that the new beliefs are not so-formed, are they justified?" Traduit par l'auteur, p. 1153.

approche, Brown se situe dans le cadre du réalisme scientifique en adoptant deux grandes positions philosophiques : le réalisme mathématique de Gödel (qui lui fournit une justification de l'intuition) et une interprétation réaliste des lois de la nature (qui place ces dernières dans un monde platonicien accessible par le biais de cette intuition). Les expériences de pensée platoniciennes (*cf.* la classification de Brown dans l'introduction de la Partie I) sont le vecteur pointant vers ces lois, qui se trouvent dans le monde abstrait. Regardons dans la section suivante en quoi consiste ce cadre réaliste, pour analyser par la suite l'approche platonicienne de Brown, puis son traitement de la tour de Pise.

4.3.1 Un cadre réaliste

Brown défend son approche platonicienne des expériences de pensée, et ce depuis 1986, dans un cadre réaliste général constitué d'un réalisme mathématique inspiré de Gödel et de la définition de Michael Tooley des lois de la nature. Son but est de montrer qu'on a accès aux lois de la nature comme on a accès aux entités mathématiques, par une sorte d'intuition, les expériences de pensée platoniciennes étant le vecteur vers le monde platonicien des lois de la nature. Les lois de la nature et les entités mathématiques étant de nature abstraite, Brown soutient que l'intuition ou la perception intellectuelle nous permet de les « voir ». Examinons l'un après l'autre ces deux éléments du cadre réaliste.

Pour le premier, Brown adopte d'abord la thèse du réalisme ontologique des entités mathématiques, défendue par Kurt Gödel :

« Les objets mathématiques existent indépendamment de nous ; nous pouvons les percevoir ou les connaître intuitivement ; nos perceptions ou nos intuitions sont faillibles (semblables à nos perceptions sensorielles des objets physiques, elles-mêmes faillibles) ; nous conjecturons les théories mathématiques ou adoptons des axiomes sur la base d'intuitions (comme les théories physiques sont conjecturées sur la base de la perception sensorielle) ; ces théories vont généralement bien au-delà des intuitions elles-mêmes, mais sont testées par elles (tout comme les théories physiques vont au-delà des observations empiriques, mais sont testées par elles) ; [...] Ce sont les ingrédients typiques du Platonisme. Le seul sur lequel je veux mettre l'accent est *la perception des entités abstraites*, communément appelé intuition, ou vision par les yeux de l'esprit. Gödel considère les intuitions comme homologues de la perception du sens ordinaire. Tout comme nous pouvons voir les objets physiques - les arbres, les chiens, les rochers, la lune - on peut avoir une intuition des entités mathématiques. Et tout comme nous pouvons voir que l'herbe est verte et que la lune est

pleine, on peut savoir intuitivement que certaines propositions mathématiques sont vraies. » (C'est nous qui soulignons)¹⁰⁴

L'intuition des entités abstraites, comme les entités mathématiques, est ainsi décrite par analogie avec notre perception sensorielle : l'intuition nous permet de « voir » les entités de nature abstraite (entités mathématiques) de la même façon que notre perception sensorielle nous permet de voir les objets physiques (arbre, chien,...). Ces deux facultés sont aussi *faillibles*. Ce qui intéresse Brown dans le réalisme mathématique de Gödel, c'est notre faculté de voir, avec les yeux de l'esprit, des entités abstraites.

Suite à cette analyse et défense du platonisme mathématique, Brown défend une semblable faculté intellectuelle, une intuition, envers les lois de la nature. Il a besoin d'un deuxième ingrédient : une interprétation réaliste des lois de la nature qui va également les définir comme entités abstraites.

Pour le second élément du cadre réaliste, Brown adopte la thèse « proposée (indépendamment) par David Armstrong, Fred Dretske, et Michael Tooley » où « [c]hacun soutient que les lois de la nature sont des relations entre universaux ; c'est-à-dire entre *entités qui existent indépendamment des objets physiques, indépendamment de nous, et à l'extérieur du temps et de l'espace*. Au moins c'est ce qui est défendu dans la version de Tooley (celle que je préfère) ; c'est une espèce de platonisme. »¹⁰⁵

Pour Brown, les lois de la nature ne sont pas des régularités au sens de Hume, où une loi de la forme « tous les A sont des B » n'est qu'une généralisation de notre expérience. Selon Hume, une loi de la nature n'exprime que la généralisation de la régularité observée dans notre monde, à savoir qu'à chaque fois qu'on a observé un A, il était aussi un B. Se basant sur cette loi comme généralisation, on est en mesure d'inférer que le prochain A qu'on va rencontrer sera aussi un B.

¹⁰⁴ James Robert Brown, "Why Thought Experiments Transcend Empiricism", dans C. Hitchcock (ed.), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, 2004, Malden, MA: Blackwell, pp. 23–43. "mathematical objects exist independently from us; we can perceive or intuit them; our perceptions or intuitions are fallible (similar to our fallible sense perception of physical objects); we conjecture mathematical theories or adopt axioms on the basis of intuitions (as physical theories are conjectured on the basis of sense perception); these theories typically go well beyond the intuitions themselves, but are tested by them (just as physical theories go beyond empirical observations but are tested by them); [...]. These are the typical ingredients of Platonism. The only one I want to focus on is the perception of abstract entities, commonly called intuition, or seeing with the mind's eye. Gödel took intuitions to be the counterparts of ordinary sense perception. Just as we can see some physical objects – trees, dogs, rocks, the moon – so we can intuit some mathematical entities. And just as we can see that grass is green and the moon is full, so we can intuit that some mathematical propositions are true." p.31. Traduit par l'auteur.

¹⁰⁵ *Ibid.* "proposed (independently) by David Armstrong, Fred Dretske, and Michael Tooley. Each claims that laws of nature are relations among universals; that is, among abstract entities which exist independently of physical objects, independently of us, and outside of space and time. At least this is so in Tooley's version (which I prefer); it's a species of Platonism." p. 33.

L'interprétation réaliste des lois de la nature, soutenue par Brown, rejette l'approche humienne des lois comme généralisations de régularité et soutient que « c'est un lien entre les propriétés. Lorsque nous avons une loi selon laquelle tous les Fs sont Gs, nous avons l'existence d'universaux, la F-ness et la G-ness, et une relation de nécessitation entre eux »¹⁰⁶.

4.3.2 Une approche *platonicienne* des expériences de pensée

Brown adopte ces deux thèses afin d'argumenter en faveur de la perception intellectuelle des lois de la nature par le biais des expériences de pensée. Résumons l'argument de Brown : la nature abstraite des entités mathématiques lui permet de développer l'idée selon laquelle nous avons déjà recours à l'intuition, quand nous parlons de « voir » des entités mathématiques existant indépendamment de nous et à l'extérieur de l'espace du temps. Par analogie, on peut avoir une intuition ou une perception intellectuelle des lois de la nature, existant elles aussi indépendamment de nous et à l'extérieur de l'espace du temps, et ce par le biais de certaines expériences de pensée. Brown, s'appuyant sur ces deux thèses, souhaite ainsi défendre une approche platonicienne des expériences de pensée. Voici comment il fait explicitement le lien entre son approche platonicienne *a priori* des expériences de pensée et les deux éléments du cadre réaliste :

« La raison de cette digression vers le Platonisme mathématique et l'approche réaliste des lois de la nature est d'essayer de développer une idée de comment il se fait qu'une expérience de pensée puisse transcender l'expérience; c'est à dire, comment elle pourrait nous fournir une connaissance *a priori* de la nature. Je vais maintenant essayer d'expliquer avec un argument simple. Selon le Platonisme, on peut avoir des intuitions concernant quelques objets mathématiques, et les objets mathématiques sont des entités abstraites. Alors, on peut (au moins en principe) avoir des intuitions concernant les entités abstraites. Selon l'approche réaliste des lois de la nature, les lois sont aussi des entités abstraites. Alors, on sera aussi en mesure (au moins en principe) d'avoir des intuitions concernant les lois de la nature. Il y a une situation dans laquelle nous semblons avoir un accès privilégié aux faits de la nature, à savoir dans des expériences de pensée. Ainsi, il est possible que des expériences de pensée (au moins dans certains cas) nous permettent d'avoir des intuitions des lois de la nature. Intuitions, rappelez-vous, sont des perceptions non-sensorielles des entités abstraites.

¹⁰⁶ *Ibid.* "it is a link between properties. When we have a law that Fs are Gs, we have the existence of universals, F-ness and G-ness, and a relation of necessitation between them".

Parce qu'elles ne font pas appel aux sens, elles transcendent l'expérience et nous donnent une connaissance *à priori* des lois de la nature¹⁰⁷. »

Selon cette approche, certaines expériences de pensée nous donnent un accès privilégié au monde platonicien des lois de la nature. Elles produisent une connaissance *a priori* de la nature au sens où elles nous font « voir » ses lois, par une perception platonicienne. Brown insiste sur le fait que cette perception intellectuelle reste néanmoins *faillible*, même si la connaissance est produite de façon *a priori*. La conclusion d'une expérience de pensée peut se révéler fautive même si elle est *a priori*. Selon Brown, notre intuition ou perception intellectuelle peut errer de la même façon que notre perception sensorielle peut errer. « La faillibilité *a priori* ne présente pas plus de problème que la faillibilité empirique »¹⁰⁸.

Pour illustrer son approche, Brown soutient qu'au moins deux expériences de pensée sont *platoniciennes*; la tour de Pise de Galilée et l'expérience de pensée EPR. La seconde, selon Brown, est un exemple d'expérience de pensée platonicienne qui souligne son caractère faillible, c'est-à-dire avec une conclusion *a priori* mais qui se révèle être fautive. EPR, selon Brown, visait à détruire l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, en montrant son incomplétude, et à rétablir la complétude par le biais des variables cachées. Il ajoute que cette conclusion doit être regardée comme fautive suite aux travaux de Bell¹⁰⁹. (cf. 7.6 pour une analyse de l'argument et de l'expérience de pensée EPR et de cette interprétation de la boîte à photon contre la complétude de la mécanique quantique). Quant à l'expérience de pensée de Galilée, elle est l'exemple canonique de son approche. On a déjà développé la première partie de cette expérience de pensée (cf. 2.2) ; ici on abordera ce que Brown considère comme sa conclusion platonicienne.

¹⁰⁷ *Ibid.* “The reason for this digression into mathematical Platonism and the realist account of laws of nature is to try to develop some idea of how it is that a thought experiment could transcend experience; that is, how it could yield *a priori* knowledge of nature. I'll now try to explain with a simple argument. According to Platonism, we can intuit some mathematical objects, and mathematical objects are abstract entities. Thus, we can (at least in principle) intuit abstract entities. According to the realist account of laws of nature, laws are also abstract entities. Thus, we might be able (at least in principle) to intuit laws of nature as well. There is one situation in which we seem to have a special access to the facts of nature, namely in thought experiments. Thus, it is possible that thought experiments (at least in some cases) allow us to intuit laws of nature. Intuitions, remember, are nonsensory perceptions of abstract entities. Because they do not involve the senses, they transcend experience and give us *a priori* knowledge of the laws of nature.” (p. 34)

¹⁰⁸ “*A priori* fallibility presents no more problems than empirical fallibility does.” Brown 1991, p. 92.

¹⁰⁹ Dans la première et la deuxième édition de son livre sur les expériences de pensée Brown analyse EPR et conclut “Alas, for all its brilliance, EPR does not work. J.S. Bell generalized the EPR argument, and subsequent experiments based on his results have shown that the EPR conclusion is hopeless.” James Robert Brown, *Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, 2011 (2ème édition) London: Routledge. p. 88.

4.3.3 La tour de Pise : une expérience de pensée platonicienne

Selon l'analyse de Brown, Galilée, par le biais de son expérience de pensée, réfute la théorie de la chute des corps d'Aristote et établit sa théorie de l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps dans le *vide*. Brown la présente ainsi :

« Selon Aristote, les corps lourds tombent plus vite que les légers ($H > L$). On nous demande alors d'imaginer qu'un boulet de canon lourd est fixé à une balle de mousquet légère. Qu'arriverait-il s'ils ont été libérés ensemble? Le raisonnement aristotélicien mène à une conclusion absurde. Tout d'abord, la boule légère va ralentir la lourde [...], donc la vitesse du système combiné serait plus lente que la vitesse de la balle la plus lourde seule ($H > H + L$). D'autre part, le système combiné est plus lourd que la balle la plus lourde seule, il devrait donc tomber plus vite ($H + L > H$). Nous avons maintenant la conséquence absurde que la balle la plus lourde est à la fois plus rapide et plus lente que le système combiné encore plus lourd.

« Ainsi, la théorie aristotélicienne de la chute des corps est détruite. Mais la question demeure, « lequel tombe le plus vite ? » La bonne réponse est maintenant claire comme le jour. Le paradoxe est résolu en les rendant égales ; ils tombent *tous* à la même vitesse ($H = L = H + L$). » (C'est nous qui soulignons)¹¹⁰

Quatre chapitres plus loin, après avoir présenté plusieurs expériences de pensée et ainsi que sa taxinomie (cf. Introduction de la Partie I), Brown revient sur l'exemple de la tour de Pise et affirme que c'est une connaissance platonicienne *a priori* qu'on obtient :

« L'expérience de pensée de Galilée est tout à fait remarquable et nous sommes fondés à l'appeler un cas de connaissance *à priori*. Voici pourquoi:

(1) *Il n'y a pas eu de nouvelles données empiriques*. Je suppose que c'est presque vrai par définition ; qu'il s'agisse d'une expérience *de pensée* exclut de nouvelles données ("input") empiriques [...] Ce que nous sommes en train d'essayer d'expliquer est la *transition* de l'ancienne à la nouvelle théorie et cela ne s'explique pas directement en termes d'apport empirique sauf s'il y a eu de nouvelles données empiriques [...].

« (2) *La nouvelle théorie de Galilée n'est pas déduite logiquement à partir de données anciennes*. Elle n'est pas non plus une sorte de vérité logique . [...] Les prémisses d'un tel argument pourraient inclure toutes les données relatives à la théorie d'Aristote. De cela Galilée dérive une contradiction. (Jusqu'ici, tout va bien; nous avons un argument simple qui satisfait l'approche de Norton [approche discutée dans la section suivante]) *Mais peut-on dériver la théorie de Galilée que tous les corps tombent à la même vitesse de ces mêmes prémisses?* [c'est nous qui soulignons] Eh bien, en un sens, oui, vu que nous pouvons dériver n'importe quoi d'une contradiction ; mais cela ne semble pas bien honnête.

¹¹⁰ *Ibid.* "Aristotle's view that heavier bodies fall faster than light ones ($H > L$). We are then asked to imagine that a heavy cannon ball is attached to a light musket ball. What would happen if they were released together? Reasoning in the Aristotelian manner leads to an absurd conclusion. First, the light ball will slow up the heavy one [...], so the speed of the combined system would be slower than the speed of the heavy ball falling alone ($H > H + L$). On the other hand, the combined system is heavier than the heavy ball alone, so it should fall faster ($H + L > H$). We now have the absurd consequence that the heavy ball is both faster and slower than the even heavier combined system. Thus, the Aristotelian theory of falling bodies is destroyed. But the question remains, 'Which falls fastest?' The right answer is now plain as day. The paradox is resolved by making them equal; they all fall at the same speed ($H = L = H + L$)." pp.1-2. Traduit par l'auteur.

De plus, tout ce que nous pouvons tirer de ces prémisses est immédiatement contestable, car, sur la base de la contradiction, nous considérons maintenant à juste titre que notre croyance en les prémisses est minée. [...]

« (3) *Le passage de la théorie d'Aristote à la théorie de Galilée ne consiste pas simplement à faire le plus simple ajustement global de la vieille théorie.* »¹¹¹

Brown confère à cette expérience de pensée deux fonctions : destructive et constructive. En premier lieu, Galilée réfute la théorie aristotélicienne de la chute des corps. Brown analyse ici l'une des deux suppositions de la théorie aristotélicienne de la chute des corps, celle de la proportionnalité de la vitesse et du poids des mobiles (la seconde concerne la proportionnalité inverse de la vitesse et de la résistance, cf. 2.2.) Suite à cette réfutation, la partie destructive de l'expérience de pensée, Brown attribue à cette expérience de pensée une autre fonction, celle-là constructive : Galilée établit, avec son expérience de pensée, sa théorie de la vitesse de chute des corps : « ils tombent *tous* à la même vitesse ». Il soutient que cette conclusion de l'égalité de la vitesse de chute tient alors pour la chute des corps dans *le vide*, et pour la chute de mobiles de toutes les *matières*.

Brown analyse alors cette expérience de pensée comme une sorte d'expérience de pensée « cruciale » : Elle permet de faire un choix théorique, *à elle seule*. Ce n'est pas seulement qu'elle nous permet de faire un choix entre deux théories, ce qui peut signifier qu'on a réfuté une théorie et confirmé l'autre théorie, *qu'on a obtenue par un autre moyen*, empirique par exemple. Selon Brown, l'expérience de pensée de la tour de Pise *nous révèle, et justifie*, la bonne théorie *à elle seule*.

4.4 John D. Norton : une approche empiriste

La thèse opposée à celle de Brown est celle défendue par Norton. Quand le premier soutient que certaines expériences de pensée nous ouvrent une voie platonicienne vers les lois de la nature, avec une sorte d'intuition, le second soutient qu'elles n'ont aucun pouvoir épistémique au-delà des

¹¹¹ *Ibid.* "Galileo's thought experiment is quite remarkable and we are justified in calling this a case of *a priori* knowledge. Here's why:

(1) *There have been no new empirical data.* I suppose this is almost true by definition; being a *thought* experiment rules out new empirical input [...] What we are trying to explain is the *transition* from the old to the new theory and that is not readily explained in terms of empirical input unless there is new empirical input [...]

(2) *Galileo's new theory is not logically deduced from old data. Nor is it any kind of logical truth.* [...] The premisses of such an argument could include all the data that went into Aristotle's theory. From this Galileo derived a contradiction. (So far, so good; we have a straightforward argument which satisfies Norton's account.) But can we derive Galileo's theory that all bodies fall at the same rate from these same premisses? Well, in one sense, yes, since we can derive anything from a contradiction; but this hardly seems fair. What's more, whatever we can derive from these premisses is immediately questionable since, on the basis of the contradiction, we now consider our belief in the premisses rightly to be undermined [...]

(3) *The transition from Aristotle's to Galileo's theory is not just a case of making the simplest overall adjustment to the old theory*" pp.99-100.

arguments logiques. L'approche de Norton se résume par la phrase : *les expériences de pensée ne sont que des arguments logiques déguisés, de nature déductive ou inductive*. Pour soutenir son approche, Norton réduit¹¹² plusieurs expériences de pensée scientifiques, surtout tirées d'Einstein, à des arguments logiques. Contrairement à Brown qui, par le biais de quelques expériences de pensée, notamment celle de Galilée, vise à critiquer l'empirisme et à défendre le réalisme, Norton ne propose pas son approche pour défendre l'empirisme : « Je ne cherche pas ici à plaider en faveur de l'empirisme. »¹¹³ C'est le chemin inverse qui l'intéresse. En assumant dès le départ l'empirisme¹¹⁴, il défend son approche sur la base de sa compatibilité avec cette épistémologie : « l'empirisme est de loin l'épistémologie prédominante dans la philosophie de la science, de sorte qu'une approche qui peut accommoder les expériences de pensée à l'empirisme d'une manière simple et directe devrait être acceptée par défaut. »¹¹⁵ Dans la section suivante, nous analyserons d'abord l'approche générale de Norton, pour aborder dans la section 4.4.2 sa réduction de la tour de Pise à un argument déductif.

4.4.1 Les expériences de pensée comme des arguments logiques

Norton pose la question épistémologique des expériences de pensée scientifique de la façon suivante : « Les expériences de pensée sont censées nous donner une information sur notre monde physique. D'où peut venir cette information ? »¹¹⁶ Et Il répond que l'empirisme implique que les expériences de pensée ne sont que des arguments logiques déguisés. Norton argumente ainsi :

« Les expériences de pensée n'impliquent aucune nouvelle donnée expérimentale. Donc elles ne peuvent que réorganiser ou généraliser ce que nous savons déjà sur le monde physique et le rendre explicite. Cette connaissance préalable repose finalement sur l'expérience et ne peut figurer dans les expériences de pensée que comme supposition, tacite ou explicite. Par conséquent, les expériences de pensée sont des dispositifs qui réorganisent

¹¹² Dans plusieurs articles 1991, 1993, 1996, 2002, 2004 et 2013.

¹¹³ John D. Norton Why Thought Experiments do not Transcend Empiricism, dans C. Hitchcock (ed.), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, 2004, Malden, MA: Blackwell pp. 44-66 "I do not seek here to argue for empiricism" (p. 50. Traduit par l'auteur).

¹¹⁴ John D. Norton, 1996, Are Thought Experiments Just What You Thought?, *Canadian Journal of Philosophy*, 26, pp. 333-66. "Note that the view that thought experiments are arguments is not equivalent to empiricism. It is entailed by empiricism, but the converse implication does not obtain. [...] the argument view is logically weaker and correspondingly more secure. In principle, one may hold the argument view without any commitments concerning the origin of the premises used in the arguments and their connection with experience." pp. 336-337.

¹¹⁵ *Op. Cit* 2004. "empiricism is overwhelmingly the predominant epistemology in philosophy of science, so that an account that accommodates thought experiments to empiricism in a simple and straightforward manner ought to be accepted as the default" (p. 50).

¹¹⁶ *Op. Cit* 1996. "Thought experiments are supposed to give us information about our physical world. From where can this information come?" (p. 333).

ou généralisent ces hypothèses pour donner le résultat de l'expérience de pensée. Autrement dit, ces dispositifs sont des arguments qui nous transportent de nos hypothèses à une conclusion, le résultat de l'expérience de pensée. Dans la mesure où le dispositif réorganise simplement, c'est un argument déductif ; dans la mesure où il généralise dans le sens le plus large, c'est un argument inductif. Le résultat n'est fiable que dans la mesure où nos hypothèses sont vraies et l'inférence valide. Cela ne veut pas dire que toutes les expériences de pensée sont des instances de parfaite inférence déductive ou inductive. Les expériences de pensée peuvent être erronées, tout comme les arguments. Le point est plutôt que, quand nous évaluons les expériences de pensée en tant qu'outils épistémologiques, nous devrions les évaluer comme des arguments. *Une bonne expérience de pensée est un bon argument, une mauvaise expérience de pensée est un mauvais argument.* » (C'est nous qui soulignons)¹¹⁷

Le but de Norton n'est donc pas d'argumenter contre l'utilisation des expériences de pensée en science mais plutôt d'offrir des critères pour les évaluer en « en tant qu'outils épistémologiques », et ce en les réduisant à des arguments logiques : « Une bonne expérience de pensée *est* un bon argument, une mauvaise expérience de pensée *est* un mauvais argument ». On peut discerner deux thèses dans cette équivalence entre expérience de pensée et arguments, et dans son article de 1996 Norton va adopter les deux :

« (1) Les expériences de pensée sont des arguments

[...]

« (1a) (Contexte de justification) Toutes les expériences de pensée peuvent être reconstruites en arguments basés sur des suppositions tacites ou explicites. Notre croyance dans le résultat-conclusion de l'expérience de pensée est justifiée seulement dans la mesure où l'argument reconstitué justifie sa conclusion.

Et

« (1b) (Contexte de découverte) Le fait d'exécuter une expérience de pensée consiste en l'exécution d'un argument, même si cela n'est pas évident vu que l'argument peut figurer uniquement sous forme abrégée et avec des prémisses supprimées. »¹¹⁸

¹¹⁷ *Ibid.* "Thought experiments involve no new experimental data. Therefore they can only reorganize or generalize what we already know about the physical world and make it explicit. This prior knowledge rests eventually upon experience and can only enter thought experiments as assumptions, tacit or explicit. Therefore, thought experiments are devices that reorganize or generalize these assumptions to yield the outcome of the thought experiment. That is, these devices are arguments that carry us from our assumptions to a conclusion, the outcome of the thought experiment. Insofar as the device merely reorganizes, it is a deductive argument; insofar as it generalizes in the broadest sense, it is an inductive argument. The outcome is reliable only insofar as our assumptions are true and the inference valid. That is not to say that all thought experiments are instances of perfect deductive or inductive inference. Thought experiments can be bungled, just as arguments can. Rather, when we evaluate thought experiments as epistemological devices, the point is that we should evaluate them as arguments. A good thought experiment is a good argument; a bad thought experiment is a bad argument." p.335.

¹¹⁸ Norton 1996, *Op.cit.* p.354 "Thought experiments are arguments. [...]"

(1a) (Context of justification) All thought experiments can be reconstructed as arguments based on tacit or explicit assumptions. Belief in the outcome-conclusion of the thought experiment is justified only insofar as the reconstructed argument can justify the conclusion.

And

(1b) (Context of discovery) The actual conduct of a thought experiment consists of the execution of an argument, although this may not be obvious since the argument may appear only in abbreviated form and with suppressed premises."

(1a) est une thèse épistémologique, elle concerne la façon dont une expérience de pensée justifie sa conclusion : celle-ci est justifiée si la conclusion de l'argument reconstitué l'est. Selon Norton pour réfuter (1a) il faut simplement trouver une *seule* expérience de pensée qui ne puisse pas être reconstruite en tant qu'argument¹¹⁹. Tandis que (1b) est plus forte et concerne nos processus mentaux ; Norton nous dit qu'en exécutant une expérience de pensée dans notre esprit , on est en train d'exécuter un argument.

Dans cette thèse on se limitera à (1a) et l'on désignera ces arguments qui reconstituent les expériences de pensée comme des « EP-arguments ». Selon Norton, ces EP-arguments sont soit déductifs soit inductifs, et doivent satisfaire deux conditions, (i) et (ii) :

« *Les expériences de pensée sont des arguments qui :*

- (i) *postulent des situations ('states of affairs') hypothétiques ou contrefactuelles, et*
- (ii) *invoquent des particuliers non pertinents pour la généralité de la conclusion »*¹²⁰

La condition (i), en précisant que les situations ne sont pas réelles, donne à l'EP-argument son « caractère de pensée » ('thought-like character') Sinon, nous dit Norton, ce ne sont plus des expériences de pensée mais des descriptions d'expériences réelles. Tandis que la condition (ii), en invoquant des particuliers, donne à l'EP-argument son « caractère expérimental », sinon c'est un argument (*cf.* ci-dessous la thèse d'élimination).

Une expérience de pensée est reconstruite donc en un EP-argument, de nature déductive ou inductive, qui satisfait ces deux conditions (i) et (ii). Ces dernières garantissent que les expériences de pensée sont des EP-arguments mais ne garantissent pas que chaque argument qui satisfait ces deux conditions doive être une expérience de pensée. Selon Norton, ce ne sont que des conditions *nécessaires mais non suffisantes*. Cela signifie, selon Norton, qu'on peut ajouter, à n'importe quel argument logique qui n'est pas une expérience de pensée, des prémisses dormantes, sans aucun rôle, de sorte que l'argument modifié satisfasse ces deux conditions. Ces prémisses donneront une apparence d'EP-argument à l'argument, mais ce dernier n'est clairement pas une expérience de pensée. Selon Norton, « pour récupérer des conditions suffisantes pour une expérience de pensée à

¹¹⁹ "Thus claim la is subject to a very stringent test. It can be refuted if anyone can find a single thought experiment which cannot be reconstructed as claimed." *Ibid.* p. 355.

¹²⁰ Norton 1991, *Op.cit.* p. 129 Traduit par l'auteur "Thought experiments are arguments which:
(i) posit hypothetical or counterfactual states of affairs, and
(ii) invoke particulars irrelevant to the generality of the conclusion."

partir de cette caractérisation, la *nature des particuliers* dans (ii) devrait être précisée davantage. Ils doivent être d'un type suffisant pour garantir le caractère expérimental approprié à l'argument. » (C'est nous qui soulignons)¹²¹. Nous entreprendrons dans la partie III une telle analyse sans pour autant adopter l'approche de Norton. Nous examinerons alors les différentes notions de possibilité pertinentes pour les particuliers et les processus présents dans le scénario d'une expérience de pensée.

Norton cherche alors à montrer que les critères pour évaluer les expériences de pensée sont identiques à ceux qu'on applique déjà aux arguments logiques déductifs ou inductifs. En réduisant les expériences de pensée à une forme plus connue en philosophie des sciences, on est en mesure de dire si telle ou telle conclusion d'une expérience de pensée est justifiée. Elle est justifiée si la conclusion de l'EP-argument est justifiée. La justification de la conclusion d'un EP-argument déductif suit les règles de la logique déductive : si l'EP-argument est valide alors la conclusion de l'EP-argument, et donc de l'expérience de pensée, suit. Si les prémisses sont vraies alors la conclusion est vraie aussi. Mais qu'en est-il de l'argument inductif ? Norton semble adopter une approche de l'induction assez générale qui admet l'abduction comme une forme d'induction. En discutant l'expérience de pensée du sceau de Newton, Norton affirme que « dans la mesure où il y a une génération précise de l'hypothèse de l'espace absolu dans l'expérience de pensée, elle se produit à travers une forme d'inférence inductive bien connue, l'inférence à la meilleure explication. »¹²² Ce n'est pas le but de cette thèse que de réfuter l'interprétation de Norton concernant la réduction des expériences de pensée à des EP-arguments inductifs. Cela nécessiterait une approche bien définie de ce qu'on entend par logique inductive ; est-elle une logique purement formelle qui préserve la vraisemblance ou la probabilité, ou bien est-ce une généralisation de quelques cas vers une proposition universelle qui englobent tous ces cas ? Comme Norton est assez libéral dans sa caractérisation de l'induction, nous ne doutons pas que sa conception puisse s'adapter à toutes les critiques.

Le but de notre analyse de Norton porte plus précisément sur la condition (ii) ci-dessus, concernant la non pertinence des particuliers dans l'EP-argument. Norton propose une stratégie d'élimination de ces particuliers de la conclusion de l'EP-argument. Elle se traduit dans sa

¹²¹ *Ibid.* "to recover sufficient conditions for a thought experiment from the characterization, the nature of the particulars in (ii) would have to be specified more closely. They must be of a type sufficient to guarantee the appropriate experimental character to the argument." *Ibid.* p.130.

¹²² Norton 1996, "Insofar as there is a clear generation of the hypothesis of absolute space in the thought experiment, then it occurs through a well known inductive inference form, the inference to the best explanation" p.349. Traduit par l'auteur.

classification des EP-arguments déductifs et inductifs, brièvement mentionnée dans l'introduction de la partie I :

« Classification des expériences de pensée. La conclusion d'une pensée expérience doit être libre des particuliers impliqués dans la condition (ii). Les expériences de pensée peuvent être classées selon les moyens par lesquels ces particuliers sont supprimés.

« Type 1: La conclusion sans particuliers suit de façon déductive des prémisses. Les expériences de pensée de ce type sont généralement des arguments de *réduction à l'absurde*. Les particuliers pourraient être impliqués dans un contre-exemple à une assertion universelle quantifiée et suite à sa contradiction la conclusion suit [...]

Type 2: La conclusion est libérée des particuliers suite à une étape inductive. Cette étape pourrait impliquer l'affirmation selon laquelle le cas impliquant les détails particuliers est «typique» ou que ceux-ci sont « non essentiels, » de sorte que le résultat dérivé tient dans d'autres cas aussi. »¹²³

Les expériences de pensée de type 1 que Norton considère en 1991 sont les expériences de pensée qui utilisent les lois de la thermodynamique et un raisonnement de réduction à l'absurde. Ces lois affirment l'impossibilité d'une machine à mouvement perpétuel ; la première interdit une machine à mouvement perpétuel de première espèce, qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme, tandis que la deuxième loi, comme on l'a vu au chapitre 3, interdit les machines à mouvement perpétuel de seconde espèce : une machine capable de transformer l'énergie thermique d'une seule source en travail mécanique, sans apport de travail. Pour prouver un théorème quelconque avec une expérience de pensée de type 1, il faut commencer par supposer sa négation, puis imaginer un dispositif expérimental avec autant de particuliers qu'on souhaite et montrer que la négation de notre théorème, avec le dispositif imaginaire, hypothétique ou contrefactuel (condition (i)), permet de construire une machine à mouvement perpétuel d'un genre interdit par une des lois de la thermodynamique. On obtient une absurdité et l'on peut ainsi conclure que le théorème est vrai. L'exemple que Norton utilise pour montrer comment ce type d'expérience de pensée est bien un EP-argument est dû à Einstein (la machine de Carnot est un autre exemple qu'il mentionne sans plus d'analyse). Dans cette expérience de pensée Einstein vise à établir le théorème X : Il y a une

¹²³ *Ibid.* "(3) *Classification of thought experiments*. The conclusion of a thought experiment must be free of the particulars involved in condition (ii). Thought experiments can be classified according to the means through which these particulars are removed.

Type 1: The particular-free conclusion follows deductively from the premisses. Thought experiments of this type are typically *reductio* arguments. The particulars might be involved in a counter-example to a universally quantified assertion through which contradiction the conclusion follows [...]

Type 2: The conclusion is freed of the particulars by an inductive step. This step might involve the assertion that the case involving the particulars is "typical" or that the particulars are "inessential," so that the result derived holds in other cases as well." Norton 1991, *Op.cit.*, p. 131.

fluctuation aléatoire dans le rayonnement des corps noirs. Einstein parvient à prouver ce théorème au moyen d'une expérience de pensée. Selon Norton, Einstein suppose la négation de X et conçoit un dispositif expérimental dont la conclusion mène à une machine à mouvement perpétuel de seconde espèce. Alors Einstein est en mesure de conclure X car sa négation mène à une absurdité¹²⁴. L'expérience de pensée du démon de Maxwell n'est visiblement pas similaire. En suivant l'analyse du chapitre 3, cette expérience de pensée ne peut pas se réduire à la preuve d'un théorème quelconque suite à une contradiction avec la deuxième loi de la thermodynamique, son but étant d'analyser la nature de cette dernière. Nous reviendrons dans la partie III sur la conclusion et la structure de l'expérience de pensée du démon de Maxwell, en particulier sur la notion de possibilité impliquée par un tel démon (*cf.* chapitre 6).

Les particuliers ne figurent pas dans la conclusion générale portant sur un théorème : « quand la contradiction est établie, ils [les particuliers] tombent de vue et ne figurent plus dans la conclusion X. Ainsi, ces expériences de pensée sont de type 1, la conclusion étant libérée des particuliers par l'argumentation déductive. »¹²⁵

À la condition (ii) s'ajoute la thèse d'élimination de Norton :

« Thèse d'élimination. Les expériences de pensée sont des arguments qui contiennent des *particuliers non pertinents* pour la généralité de la conclusion. Ainsi, toute conclusion d'une

¹²⁴ Norton réduit cette expérience de pensée à l'EP-argument suivant, 1996 *Op.cit.* pp. 133-134.

“To be shown, X: There are random fluctuations in black body radiation pressure.

(1) Premises: (a) second law of thermodynamics; (b) kinetic theory of gases; (c) the phenomenon of radiative damping, in which an isotropic radiation field applies a damping force to slow the motion of any totally mirrored object moving in it. (This effect results from a greater amount of radiation being reflected by the leading face of the object than the trailing face.)!Proof by *reductio*.

(2) Assume -X.

(3) Consider the above cavity with mirror, ideal gas and black body radiation.

(4) From (1c) and the fact the black body radiation is isotropic, it follows that there will be a radiative damping force on any motion of the mirror, which will slow that motion and transfer the kinetic energy of the mirror to the radiation.

(5) From the equipartition theorem of (1b), it follows that the mirror will have a mean kinetic energy of $kT/2$ due to its thermal equilibrium with the gas.

(k is Boltzmann's constant and T the temperature.) Any reduction in this equipartition energy of the mirror will lead to a transfer of heat energy from the gas to the mirror to restore the equilibrium.f

(6) From (4) and (5) it follows that there will be an uncontrolled transfer of heat energy from the gas to the kinetic energy of the mirror and then to the radiation. This is a spontaneous transfer of heat from a colder region (the gas) to a hotter region (the radiation), which violates the second law of thermodynamics.

(7) Conclude: the assumption -X is false. X is true.”

¹²⁵ For once the contradiction is established, they drop from sight and do not appear in the conclusion X. Thus these thought experiments are of type 1, the conclusion being freed of the particulars by deductive argumentation. » Norton, 1991, *Op.cit.*, p. 132.

bonne expérience de pensée peut également être démontrable par un argument qui *ne contient pas ces particuliers* et n'est donc pas une expérience de pensée. »¹²⁶

La condition (ii) et la thèse d'élimination nous laissent penser que les particuliers choisis dans une expérience de pensée ne sont pas essentiels à la conclusion. Non seulement à sa généralité, mais aussi à l'inférence à cette conclusion. Comme on peut avoir un argument qui nous mène des prémisses, sans particuliers, à une conclusion générale, selon la thèse d'élimination : « ces éléments [les particuliers] sont toujours éliminables sans compromettre notre capacité d'arriver à la conclusion, bien que l'élimination peut rendre l'argument qui établit la conclusion beaucoup plus compliquée »¹²⁷. Ces particuliers ne peuvent pas être essentiels pour arriver à cette conclusion.

On verra dans notre analyse de la tour de Pise dans le chapitre 5 que la matière des mobiles en chute libre joue un rôle décisif dans la réfutation de la théorie d'Aristote ; imaginer la chute de mobiles de même matière permet à Galilée de négliger l'effet de la résistance. Cette restriction se trouve aussi dans la conclusion de Galilée concernant l'égalité de chute des mobiles (« SALV. [...] Nous en concluons donc que les mobiles grands et petits, *et possédant un même poids spécifique*, se meuvent avec une même vitesse. » cf. chapitre 2). On verra aussi dans la partie III que la nature *vague, sous décrite*, du démon de Maxwell joue aussi un rôle essentiel dans l'expérience de pensée. Passons à présent à l'EP-argument de la tour de Pise de Norton avant de présenter l'argument sans particuliers de Gendler.

4.4.2 L'EP-argument de la tour de Pise

Norton réduit, dans son article de 1996, l'expérience de pensée de la tour de Pise à un argument logique de type 1. Son but est de critiquer l'analyse de cet exemple par Brown et son approche platonicienne en général. Norton rend explicite le rôle d'une prémisse cachée mais centrale, prémisse que Galilée doit supposer afin de pouvoir justifier sa loi avec son expérience de pensée. Il propose l'EP-argument déductif suivant :

1. Supposition pour la preuve par *réduction à l'absurde* : la vitesse de la chute des corps dans un milieu donné est proportionnelle à leurs poids.

¹²⁶ Norton 1991 *Op.cit.* "(2) *The elimination thesis*. Thought experiments are arguments which contain particulars irrelevant to the generality of the conclusion. Thus any conclusion reached by a good thought experiment will also be demonstrable by an argument which does not contain these particulars and therefore is not a thought experiment." C'est nous qui soulignons p.131.

¹²⁷ "these elements [the particulars] are always eliminable without compromising our ability to arrive at the conclusion, although the elimination may make the argument for the conclusion considerably more complicated" Norton 1996, *Op.cit.*, p. 336.

2. De 1: si une grosse pierre tombe avec 8 degrés de vitesse, une plus petite pierre avec la moitié de son poids va tomber avec 4 degrés de vitesse.
3. Supposition : si une pierre tombant plus lentement est attachée à une pierre tombant plus rapidement, la plus lente retardera la plus rapide et la plus rapide accélérera la plus lente.
4. De 3: si les deux pierres de 2 sont attachées, leur composé va tomber plus lentement que 8 degrés de vitesse.
5. Supposition : le composé de deux corps a plus de poids que le plus grand.
6. De 1 et 5: le composé va tomber plus vite que 8 degrés.
7. Contradiction entre les conclusions 4 et 6.
8. Par conséquent, nous devons rejeter l'hypothèse 1.
9. Par conséquent, toutes les pierres tombent avec la même vitesse.¹²⁸

L'argument de 1 à 7 nous donne par réduction à l'absurde 8, qui est la négation de 1, c'est-à-dire : la vitesse de la chute des corps dans un milieu donné n'est pas proportionnelle à leurs poids. Brown est en accord avec Norton jusqu'ici, mais refuse que cet argument, contrairement à l'expérience de pensée, puisse forcer la conclusion 9. Brown pense, à juste titre, que l'argument ne peut pas écarter d'autres facteurs qui puissent influencer la vitesse de chute, comme la couleur (facteur que Brown donne par ironie pour souligner que la logique seule ne force pas la conclusion 9) ou la composition chimique. On verra dans le chapitre suivant que l'expérience de pensée aussi, qu'elle soit réduite à un argument logique ou non, ne permet pas non plus de forcer la conclusion 9, à savoir de nous donner la théorie de Galilée sur l'égalité de vitesse de chute de *tous* les corps. En fait, elle ne nous

¹²⁸ *Ibid.* "1. Assumption for *reductio* proof: the speed of fall of bodies in a given medium is proportionate to their weights.

2. From 1: if a large stone falls with 8 degrees of speed, a smaller stone half its weight will fall with 4 degrees of speed.

3. Assumption: if a slower falling stone is connected to a faster falling stone, the slower will retard the faster and the faster speed the slower.

4. From 3: if the two stones of 2 are connected, their composite will fall slower than 8 degrees of speed.

5. Assumption: the composite of two weights has greater weight than the larger.

6. From 1 and 5: the composite will fall faster than 8 degrees.

7. Conclusions 4 and 6 contradict.

8. Therefore, we must reject assumption 1.

9. Therefore, all stones fall alike." pp.341-342.

permet pas d'écarter d'autres facteurs qui affectent la vitesse de chute, en particulier la composition chimique, ou la matière du mobile, facteur mentionné brièvement par Brown afin de l'écarter.

Norton et Brown (2010) s'accordent alors sur le fait que le passage de 8 à 9 n'est pas valide. Selon Norton, il faut ajouter la supposition suivante :

8a. Supposition : La vitesse de chute des corps dépend *uniquement* de leurs poids

La conclusion 9, comprise comme relatant la théorie de Galilée sur l'égalité de vitesse de chute de *tous* les corps dans le *vide*, peut alors être obtenue. Norton nous indique comment avec l'argument déductif suivant, qui nous mène de 8 à 9 :

8a. Supposition : La vitesse de chute des corps dépend *uniquement* de leurs poids.

8b. Supposition : La vitesse de chute des corps est une certaine fonction *arbitraire* monotone croissante de leurs poids.

8c. De 3 et 5. Si la fonction est partout strictement croissante, alors nous pouvons trouver un corps composé dont la vitesse de chute est intermédiaire entre la vitesse de chute de ses composants plus légers.

8d. Le conséquent de 8c contredit 8b.

9. De 8d. La fonction est constante. Toute les pierres tombent avec la même vitesse¹²⁹.

Est-on en mesure de faire cette supposition 8a ? Selon Norton, non (*cf.* 5.4), car le contexte de l'expérience de pensée est la possibilité du mouvement dans le vide, et dans le plein la vitesse dépend d'autres facteurs, et surtout de leur forme. Galilée souligne bien ce dernier point avec son exemple d'une feuille d'or qui tombe moins vite, dans l'air, qu'un ligot d'or du même poids (*cf.* 2.2). Norton reprend cet exemple pour soutenir que la conclusion 9 ne s'obtient pas sans 8a. Néanmoins, on peut faire cette supposition si on néglige la surface et la forme des mobiles et qu'on se limite à des mobiles de même matière. En d'autres termes, si l'on choisit des particuliers avec le

¹²⁹ *Ibid* "8a. Assumption: The speed of fall of bodies depends *only* on their weights.

8b. Assumption: The speed of fall of bodies is some *arbitrary* monotonic increasing function of their weights.

8c. From 3, 5. If the function is anywhere strictly increasing, then we can find a composite body whose speed of fall is intermediate between the speed of fall of its lighter components.

8d. The consequent of 8c contradicts 8b.

9. From 8d. The function is constant. All stones fall alike." p.343.

plus grand soin, comme le fait d'ailleurs Galilée. On verra dans le chapitre 5 l'importance de ces particuliers chez Galilée et on constatera qu'en fait cette supposition 8a est explicite dans l'expérience de pensée. Elle est même faite au début de l'expérience de pensée ou de l'EP-argument afin d'arriver à la conclusion 8 de Norton et non pas après 8 pour arriver à la conclusion 9. Pour en dire, plus il faut d'abord analyser la stratégie argumentative générale de Galilée dans les *Discours* afin de comprendre comment Galilée s'y prend pour négliger ces facteurs « accidentels ». C'est cette stratégie, et non *uniquement* l'expérience de pensée, qui le conduit à sa théorie sur l'égalité de chute de tous les corps dans le vide (cf. chapitre 5).

Revenons à cette supposition 8a. Pour Norton elle est centrale dans l'EP-argument et peut être faite dans des cas précis :

«En somme, quand nous plaçons la dernière étape de l'expérience de pensée dans son contexte au sein du discours de Galilée, où l'on n'a pas l'hypothèse 8a, elle ne donne pas et ne peut pas donner la théorie de Galilée, ce qui fait que Salviati doit faire des efforts considérables pour couvrir le déficit. Dans l'approche argument, la transition de 8 vers 9 est, au pire, une inférence fallacieuse menant à une fausseté [si on n'a pas 8a], ou au mieux valide uniquement dans la mesure où elle est invoquée dans *des cas particuliers* où vaut la supposition 8a, *comme la chute d'objets compacts et très lourds dans des milieux très peu denses*. Cette dernière étape ressemble plus à une échappatoire maladroite ou à un faux pas qu'à un saut dans le monde platonicien des lois. » (C'est nous qui soulignons)¹³⁰

Norton semble ici accorder un certain poids aux particuliers présents dans l'expérience de pensée en concluant que l'inférence de 8 à 9, avec 8a, est valide uniquement sous certaines conditions comme : « la chute d'objets compacts et très lourds dans des milieux très rares ». Regardons à présent comment cette thèse d'élimination est analysée dans la littérature.

4.4.3 L'argument sans particulier de la tour de Pise

Un des buts de la thèse doctorale de Gendler de 1996 (puis de son article de 1998 consacré entièrement à l'expérience de pensée de la tour de Pise) est de réfuter l'approche de Norton sans adopter le platonisme de Brown. Elle analyse l'expérience de pensée de Galilée, l'EP-argument proposé par Norton, la conclusion platonicienne de Brown et propose un argument général sans particuliers réduisant cette expérience de pensée, dans un but critique. Bien que Gendler souligne

¹³⁰ “In sum, when we place the final step of the thought experiment in its proper context within Galileo's discourse where assumption 8a does not obtain, it does not and cannot give Galileo's theory, so Salviati must devote considerable effort to cover the shortfall. In the argument view, the transition from 8 to 9 is, at worst, a fallacious inference to a falsehood; or, at best, valid only insofar as it is invoked *in special cases* in which assumption 8a holds, *such as the fall of very heavy, compact objects in very rare media*. This final step now looks more like a clumsy fudge or a stumble than a leap into the Platonic world of laws.” Traduit par l'auteur, *Ibid.*, p.345.

que « c'est une pratique quelque peu malheureuse de considérer cette expérience de pensée hors de ses contextes historique et textuel »¹³¹, elle analyse la version anhistorique. Elle précise néanmoins que dans sa discussion sur cette expérience de pensée, elle se limitera à des corps de même matière. Comme Gendler ne s'intéresse qu'à la fonction de réfutation de cette expérience de pensée, son analyse anhistorique n'est pas exposée aux objections qu'on pourra soulever contre Brown et Norton.

Pour défendre son approche et rejeter celle de Norton, Gendler propose une reconstruction de l'expérience de pensée de Galilée en un argument à trois prémisses. L'argument qu'elle propose montre comment la thèse d'élimination des particuliers de Norton est comprise dans la littérature :

« (1) la vitesse naturelle est médiane.

C'est-à-dire, la vitesse naturelle est une propriété telle que si un corps A a une vitesse naturelle s_1 , et qu'un corps B a une vitesse naturelle S_2 , la vitesse naturelle du corps combiné A-B tombera entre s_1 et S_2 .

(2) Le poids [absolu] est additif.

Autrement dit, le poids est une propriété telle que si le corps A a un poids W_1 , et le corps B a le poids W_2 , le poids du corps combiné A-B est égal à la somme de W_1 et W_2 .

À partir de ces deux prémisses (plus l'hypothèse que tous les poids et les vitesses naturelles ne sont pas tous nuls ou infinis), il résulte que:

(3) La vitesse naturelle n'est pas directement proportionnelle au poids.

Comme la première est une propriété médiative, tandis que la seconde est une propriété additive, et une propriété médiane ne peut pas être directement proportionnelle à une propriété qui est additive.

De plus, la seule façon de soutenir (1), (2) et (3) simultanément est de supposer que toutes les vitesses naturelles sont les mêmes.

Ainsi, le poids pourrait être additif et la vitesse naturelle médiane (dans un sens vide),

¹³¹ "somewhat unfortunate practice of considering this thought experiment outside of both its historical and textual contexts" Traduit par l'auteur, p. 402, Gendler, 1998, Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiment, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 49: 397-424.

sans qu'aucune contradiction soit par là impliquée. Cela montre donc que la vitesse naturelle est indépendante du poids. »¹³²

Cet argument en trois prémisses est équivalent à celui de Norton sans les prémisses qui font référence à des particuliers, c'est-à-dire les prémisses 2, 4 et 6 ci-dessus. Les prémisses 3 et 5 de Norton sont équivalentes aux prémisses (1) et (2) de Gendler. Néanmoins, la conclusion que Gendler attribue à cette expérience de pensée, et non à l'argument dans sa version ou l'EP-argument de Norton, est *l'indépendance de la vitesse de chute relativement au poids absolu du mobile*¹³³. Elle nie que l'argument à trois prémisses peut nous mener à cette conclusion, ou à (3) ; Gendler propose « quatre issues » ('ways out') pour l'aristotélien, au cas où il serait confronté à cet argument plutôt qu'à l'expérience de pensée, pour rejeter (1) ou (2) et donc soutenir la négation de (3), la théorie d'Aristote de la vitesse de chute. Gendler cherche à montrer que le format de l'expérience de pensée bloque ces quatre issues (cf. Gendler 1996 et 1998).

Notons à ce stade une subtilité dans l'approche de Gendler, elle concerne la dernière phrase de la citation ci-dessus, « toutes les vitesses naturelles sont les mêmes. [...] Cela montre donc que la vitesse naturelle est indépendante du poids ». Gendler semble ne pas faire de différence entre la conclusion de l'indépendance de la vitesse de chute par rapport au poids absolu du mobile et celle concernant l'égalité de la vitesse de chute pour tous les mobiles, de même matière. On verra dans le chapitre suivant que ces deux conclusions sont différentes dans le contexte de l'argument général sur l'existence du vide des *Discours*. Même si on se limite aux mobiles de même matière : comme on ne peut pas supposer le vide, alors dans le plein, l'air, il y a une petite différence de vitesse de

¹³² “ (1) Natural speed is mediative.

That is, natural speed is a property such that if a body A has natural speed s_1 , and a body B has natural speed S_2 , the natural speed of the combined body A-B will fall between s_1 and S_2 .

(2) Weight is additive.

That is, weight is a property such that if body A has weight W_1 , and body B has weight W_2 , the weight of the combined body A-B will be equal to the sum of W_1 and W_2 .

From these two premises (plus the assumption that not all weights and natural speeds are either zero or infinite), it follows that:

(3) Natural speed is not directly proportional to weight.

For the first is a mediative property, whereas the second is an additive property, and a mediative property cannot be directly proportional to one that is additive.

Furthermore, the only way to maintain (1), (2), and (3) simultaneously is to assume that all natural speeds are the same. Then weight might be additive and natural speed (in a vacuous sense) mediative, with no contradiction thereby implied. Thus natural speed is shown to be independent of weight.” Traduit par l'auteur, Gendler 1996, pp. 57-58 et 1998 p. 404.

¹³³ Suite à son analyse de cette expérience de pensée, Tamar Gendler ne voit pas de différence entre la conclusion de l'indépendance du poids et celle concernant l'égalité de la vitesse « Le moyen de sortir de ce paradoxe est de supposer que la vitesse naturelle avec laquelle un corps tombe est indépendante de son poids : 'les mobiles grands et petits ... se meuvent avec une même vitesse' » Tamar Szabo Gendler, Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiment, *The British Journal for the Philosophy of Science*, Volume 49, Issue 3, 1998. Traduit par l'auteur “The way out of this paradox is to assume that the natural speed with which a body falls is independent of its weight: 'both great and small bodies ... are moved with like speeds'”, p. 403.

chute entre deux mobiles de même matière qui se différencient uniquement par leurs poids, et Galilée souligne ce fait explicitement (cf. 2.2.3 « Or, derrière ces deux doigts vous voudriez cacher les quatre-vingt-dix-neuf coudées d'Aristote »). Concernant les mobiles de différentes matières, la conclusion sur l'égalité de vitesse de chute ne suit ni de l'argument ni de l'expérience de pensée, dans le plein ou dans le vide (cf. 5.2.3).

4.5 Conclusion

Nous avons analysé dans ce chapitre les deux approches épistémologiques principales du débat actuel sur les expériences de pensée, celle de Brown et de Norton. Nous avons examiné de près leurs analyses de la tour de Pise, en tant que véhicule vers les lois de la nature et en tant qu'argument déductif, respectivement. L'analyse anhistorique de ce cas d'étude trouve son origine dans l'approche de Brown où il est traité comme une expérience de pensée platonicienne, capable de nous *révéler et justifier* la loi de la vitesse de chute, et ce de façon *a priori*.

Mais Norton reprend aussi cette analyse présente dans la version de Brown, même si ce n'est que dans le but de la réfuter : il propose un EP-argument déductif capable de nous mener à la loi de Galilée. Norton conclut suite à cet EP-argument de la tour de Pise : « Où pourrait résider le bond platonicien ? Tout d'abord, il n'est pas question qu'un bond platonicien soit la seule justification de la théorie de Galilée. L'argument ci-dessus, dérivé directement de l'expérience de pensée, est une justification parfaitement valable. »¹³⁴. Norton, contrairement à Brown, soutient que cette lecture de l'expérience de pensée n'est pas précise historiquement. Néanmoins il limite ses remarques à la supposition 8a : la vitesse de chute dépend uniquement du poids du mobile. Il pense, à juste titre, que Galilée n'est pas en mesure de supposer le vide pour se permettre de faire cette supposition. Il conclut que sans 8a Galilée ne peut pas arriver à sa conclusion 9 sur l'égalité de la vitesse de chute, sauf pour « les cas de chutes de mobiles très lourds et compacts dans un médium très rare ». Cela est tout à fait correct mais, n'est pas précis historiquement. 8a selon Norton est directement lié à la supposition du vide. Mais 8a est en fait supposé par Galilée au tout début de son expérience de pensée, sans pour autant supposer le vide. Et cela dans le but de réfuter la théorie d'Aristote, donc 8, et non pas pour révéler, ou justifier, sa loi sur l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps dans le *vide*, donc 9.

¹³⁴ “Where might the Platonic leap reside? First, contrary to Brown's claim, there is *no* question of a Platonic leap being the sole justification of Galileo's theory. The above argument, derived straight from the thought experiment, is a perfectly good justification” Traduit par l'auteur, Norton 1996, p. 343.

La différence entre Brown et Norton ne porte pas sur la conclusion de l'expérience de pensée de la tour de Pise, mais sur la façon dont cette expérience de pensée peut justifier cette conclusion. Pour Norton, la connaissance nouvelle qu'une expérience de pensée peut *fournir et justifier* est analogue à la conclusion qu'un argument est capable de *fournir et justifier*. Il reste vague sur les fonctions des expériences de pensée, en particulier celle de Galilée. Elles remplissent la même fonction que l'argument, déductif ou inductif, remplit.

Brown, en revanche, est explicite sur les fonctions des expériences de pensée en proposant une taxonomie. En particulier sur la fonction platonicienne de la tour de Pise, qui est centrale dans son analyse : elle nous fait « voir » une loi de la nature. Brown offre une méthode de justification au moins problématique et ontologiquement contraignante : la perception platonicienne des entités abstraites en général, et des lois de la nature en particulier.

Les deux approches traitent d'une reconstruction anhistorique de l'expérience de pensée qui s'avère être imprécise. En fait, la plupart des philosophes prenant parti dans le débat épistémologique sur les expériences de pensée se basent sur une reconstruction si éloignée de l'expérience de pensée originale et de son but que Paolo Palmieri la compare à une « caricature » (2005). Dans le chapitre suivant on examinera son utilisation par Galilée depuis la première introduction de son expérience de pensée en 1590 jusqu'à sa présentation désormais célèbre dans les *Discours*.

On verra que Galilée n'utilise pas son expérience de pensée conformément à l'analyse de Brown, et ce depuis 1590 dans le *De Motu*. La tour de Pise fera partie de deux stratégies argumentatives qui contiennent plusieurs autres étapes. En 1590, Galilée défendra une théorie qui établit la proportionnalité de la vitesse de chute et du poids spécifiques des mobiles. Puis, quatre décennies plus tard, dans les *Discours*, il défendra sa théorie sur l'égalité de la vitesse de chute de tous les corps dans le vide. Cette expérience de pensée est alors compatible avec deux théories de la vitesse de chute. C'est la stratégie argumentative complète qui aura pour fonction de révéler et justifier l'une ou l'autre théorie et non l'expérience de pensée à elle seule, comme le soutient Brown.

Cette analyse historique nous permettra de critiquer la condition (ii) et la thèse d'élimination de Norton en précisant le rôle des particuliers dans le scénario de la tour de Pise (puis dans d'autres exemples, au chapitre 6). Quant à l'approche de Brown, elle se trouve largement affaiblie : cette analyse réfute son exemple canonique d'expérience de pensée platonicienne. Elle n'a pas eu pour Galilée ce pouvoir platonicien de nous faire « voir » une loi de la nature, que Brown lui confère. Elle ne peut même pas l'avoir pour nous, qui sommes en position de supposer le vide : dans le vide

cette expérience de pensée n'exclut pas que la vitesse puisse être proportionnelle au poids spécifique du mobile.

« Parmi ces contributions, celles qui analysent l'expérience de pensée de Galilée sur la chute des corps ignorent systématiquement toute la richesse que révèle l'étude de son développement historique. Parfois, on a l'impression d'être confronté à une reconstruction caricaturale dépourvue de toute signification historique. »¹³⁵

Paolo Palmieri, 2005a

Chapitre 5

La tour de Pise : à la recherche de la cause de la différence de vitesse de chute libre

5.1 Introduction

La citation ci-dessus de Paolo Palmieri est tirée de son article de 2005 où il analyse historiquement l'expérience de pensée de la tour de Pise, depuis sa première apparition chez Galilée en 1590. À l'issue de cette analyse, il conclut que : « les conclusions du débat d'aujourd'hui sur la plus belle expérience de pensée [la tour de Pise] dans l'histoire de la science devraient certainement être rejetés, et le tout soigneusement analysé »¹³⁶. C'est ce que nous proposons de faire dans ce chapitre.

Palmieri n'est certainement pas le seul à noter que l'expérience de pensée de la tour de Pise passe pour l'une des plus belles dans l'histoire des sciences. Selon Popper, par exemple, « [l]'une des expériences imaginaires les plus importantes dans l'histoire de la philosophie naturelle, et l'un des arguments les plus simples et les plus ingénieux de l'histoire de la pensée rationnelle sur notre univers, est contenue dans la critique par Galilée de la théorie aristotélicienne du mouvement ». Et il ajoute que sa fonction n'est que réfutatoire : « Je vois dans l'expérience imaginaire de Galilée un

¹³⁵ « Among these contributions, those which touch on Galileo's falling bodies thought experiment systematically ignore its rich historical development. Sometimes one has the impression of being presented a cartoon reconstruction devoid of any historical meaning. » Traduit par l'auteur, p. 224, note de bas de page (1), Paolo Palmieri, 2005, 'Spuntar lo scoglio più duro': did Galileo ever think the most beautiful thought experiment in the history of science? » *Studies in History and Philosophy of Science*. 36: 223–240.

¹³⁶ *Ibid.* « The all too clean baby of today's debate on the most beautiful thought experiment in the history of science should definitely be thrown out, and the bathwater carefully analyzed. » p.238.

modèle parfait de la meilleure utilisation des expériences imaginaires. C'est leur *utilisation critique*. » (C'est nous qui soulignons) ¹³⁷

Popper a tout a fait raison de dire que c'est l'une des expériences de pensée les plus ingénieuses, mais ce n'est certainement pas une des plus simples. On verra dans ce chapitre les subtilités de cette expérience de pensée. Dans la littérature sur les expériences de pensée, rares sont ceux qui se sont attardés sur son analyse historique. Palmieri, Maarten Van Dyck ainsi qu'Alexandre Koyré avant eux, en sont de rares exemples. Aucun n'a néanmoins tiré de conclusions concernant le débat épistémologique sur les expériences de pensée (bien sûr, Koyré a écrit avant le débat actuel. Notons à ce stade qu'il n'a pas attribué de pouvoir platonicien *a priori*, à la manière de Brown, à l'expérience de pensée en tant que telle, mais seulement à l'argument complet de Galilée, cf. 5.5).

Dans ce chapitre, nous entreprenons une telle analyse historique partielle, puis nous en tirons des conséquences concernant les deux approches développées dans le chapitre précédent, de Norton et de Brown. Analyse partielle, car une analyse historique complète de cette expérience de pensée et surtout de son rôle dans le développement de la pensée de Galilée nécessiterait une thèse en histoire et philosophie des sciences sur Galilée ¹³⁸. On se limitera aux deux (ou trois en comptant les *Apostilles*) utilisations de cette expérience de pensée par Galilée. On examinera partiellement l'évolution de son corpus théorique durant ces deux utilisations, surtout concernant les rôles de la résistance du milieu et du poids spécifique dans la vitesse de chute.

L'histoire de cette expérience de pensée s'avère beaucoup plus riche que le débat anhistorique du chapitre 4. Même si Norton mentionne cet aspect historique, il limite ses remarques à l'impossibilité de supposer le vide dans l'expérience de pensée, en précisant que cette expérience de pensée se situait dans l'argument général sur l'existence du vide des *Discours* (cf. 2.2.1, 4.4 et 5.4). Galilée a pour la première fois utilisé cette expérience de pensée en 1590 dans le *De Motu*. A partir de cette première utilisation et de la réutilisation de la même expérience de pensée quatre décennies plus tard on peut mieux comprendre sa fonction pour Galilée : à savoir la réfutation du premier principe de la théorie d'Aristote qui établissait une proportionnalité entre la vitesse de chute des corps et leur poids absolu.

¹³⁷ "One of the most important imaginary experiments in the history of natural philosophy, and one of the simplest and most ingenious arguments in the history of rational thought about our universe, is contained in Galileo's criticism of Aristotle's theory of motion [...] I see in Galileo's imaginary experiment a perfect model for the best use of imaginary experiments. It is the *critical use*." Popper, Karl, 1959, *Op.cit.* p. 464-465.

¹³⁸ Cf. la thèse doctorale de Maarten Van Dyck 2005-2006 pour une analyse de la fonction de cette expérience de pensée dans le développement théorique de Galilée depuis 1590.

Cette expérience de pensée fait partie de deux stratégies argumentatives dans lesquelles Galilée défend deux théories différentes en 1590 et 1630. Dans ces deux textes, Galilée cherche à montrer que la vitesse de chute des corps n'est pas proportionnelle à leur poids absolu. Il réfute ainsi le premier principe de la théorie d'Aristote de la vitesse de chute des corps, sans pour autant conclure que la vitesse de chute doit être égale pour *tous* les mobiles. On verra que le jeune Galilée de 1590, contrairement à celui des *Discours* de 1638, conclut que la vitesse de chute d'un mobile est proportionnelle à son *poids spécifique*¹³⁹.

En outre, notre analyse historique souligne aussi une fonction indirecte de l'expérience de pensée dans le développement théorique chez Galilée, l'*exploration théorique*. Indirecte, car ce n'est pas l'expérience de pensée *per se* qui est utilisée pour cette exploration, mais les arguments qui suivent sa conclusion. Galilée, tout d'abord, réfute le premier principe par le biais de l'expérience de pensée et donc réfute le rôle assigné au poids absolu par Aristote comme cause de la divergence des vitesses de chute. Suite à cette conclusion, Galilée explore les causes qui produisent la lenteur ou la rapidité de la vitesse de chute de différents mobiles dans différents média (et même dans le vide, dans le *De Motu*). Comme on le verra, il emploie des arguments divers et assez complexes afin de défendre différentes causes selon le cas - média ou vide - et l'époque -1590 ou années 1630 - et ainsi il va proposer deux théories différentes de la vitesse de chute libre. Mais ces théories ne sont pas des conséquences directes de l'expérience de pensée de la tour de Pise *per se*, mais d'un tout argumentatif qui commence par cette dernière. Les théories de Galilée ne sont pas des conséquences directes de l'expérience de pensée, dans la mesure où cette dernière n'a pas révélé, et ne peut pas révéler, et *à fortiori* justifier, à elle seule, l'une ou l'autre théorie. L'expérience de pensée peut nous fournir uniquement la réfutation du premier principe de la théorie d'Aristote qui définit le poids absolu des mobiles comme la cause de la divergence des vitesses de chute des mobiles.

Dans ce chapitre, nous analyserons l'histoire de l'expérience de pensée de la tour de Pise afin de mieux comprendre sa fonction et sa place dans l'argument général qui mènera Galilée à chacune de ses théories :

¹³⁹ Galilée en 1590 n'utilise pas explicitement le concept de poids spécifique et le dérive dans le *De motu* suite à une analyse hydrostatique du poids absolu. La plus grande partie de la littérature secondaire sur Galilée considère qu'il parle de poids spécifique quand il parle de soustraire le poids du milieu du poids du corps. On peut aussi comprendre dans son utilisation de "gravité" le concept de poids spécifique. Dans cette thèse nous ferons abstraction de ce point pour simplifier le raisonnement de Galilée et la différence entre les deux théories de vitesse de chutes. Pour une analyse historique de ce concept cf. Van Dyck (2005-2006).

Dans la section 5.2, nous examinerons la première introduction de cette expérience de pensée dans un manuscrit non publié de Galilée de 1590, le *De Motu*. Il introduit son expérience de pensée pour réfuter le premier principe de la théorie d'Aristote concernant la proportionnalité de la vitesse de chute et du poids absolu. Il conclura, au moyen d'un argument archimédien qui suit directement cette conclusion, que la vitesse de chute d'un mobile quelconque doit être proportionnelle à *son poids spécifique*, amoindri du poids spécifique du milieu. C'est ce que Palmieri appelle « théorie restreinte », car elle établit l'égalité de la vitesse de chute des mobiles *de même matière, dans le vide* (ou au moins si on néglige l'effet de la résistance du milieu sur les mobiles de même matière mais de différentes dimensions).

Dans la section 5.3, nous analyserons la réintroduction par Galilée de cette expérience de pensée dans les *Discours* ¹⁴⁰. Dans ces deux occurrences, la tour de Pise a eu la même fonction réfutatoire pour Galilée. Mais contrairement au *De Motu*, il va maintenant argumenter en faveur de sa théorie « générale » sur l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps dans le *vide*.

Dans les sections 5.4 et 5.5, nous tirerons deux conclusions sur le débat épistémologique présenté dans le chapitre 4. La première concerne la notion de « particuliers » chez Norton, qui figure dans sa condition (ii) et dans sa thèse d'élimination (*cf.* 4.4). La seconde sera une critique de l'analyse de Brown selon laquelle l'expérience de pensée de la tour de Pise a une fonction platonicienne et nous permet donc d'établir la théorie générale de la vitesse de chute de Galilée. La non-concordance avec l'histoire, et aussi le fait que cette expérience de pensée ne peut pas aboutir à cette conclusion, affaiblissent considérablement l'approche de Brown, qui se base principalement sur ce cas d'étude.

5.2 Le *De Motu*

Le *De Motu Antiquiora*, couramment daté de 1590, est un manuscrit non publié de Galilée où l'expérience de pensée de la tour de Pise fait sa première apparition. Ce retour historique de plus de 40 ans montre la vraie fonction de l'expérience de pensée : Galilée visait à réfuter le premier principe de la théorie d'Aristote qui établit une proportionnalité entre la vitesse de chute d'un mobile et son poids absolu. Et par la suite, il se livre à une analyse de la cause de ces divergences de vitesses. Examinons auparavant comment le jeune Galilée analyse la théorie d'Aristote de la vitesse de chute pour la réfuter.

¹⁴⁰ Galilée réutilise son expérience de pensée dans les *Apostilles à Rocco*, daté de 1634-35 selon Palmieri dans le même but que celui des *Discours*. *Cf.* Palmieri 2005a.

Galilée commence par clarifier ce qu'on doit entendre par « lourd » et « léger ». Il introduit implicitement le concept de poids spécifique pour dire qu'un mobile plus lourd, ou plus léger, qu'un autre est celui qui, pour les mêmes dimensions, pèse plus que l'autre¹⁴¹. Cela va lui permettre de préciser le premier principe de la théorie de vitesse de chute d'Aristote : pour les mobiles de même matière, selon Aristote, les mobiles plus grands tombent avec une vitesse plus grande, et cela proportionnellement à leurs dimensions :

« [Aristote] dit : Soit un mobile lourd b, qu'on laisse tomber le long de la ligne ce [Figure 5.1], laquelle est divisée au point d ; si ensuite le mobile b est divisé en fonction de la proportion dans laquelle la ligne ce est divisé au point d, il est manifeste que, pendant le temps où l'ensemble tombe le long de la totalité de la ligne ce, dans le même temps, cette partie est déplacée le long de la ligne cd. De cela, il est manifestement établi qu'Aristote veut que les mobiles *du même genre* observent entre eux dans leur vitesse de déplacement le rapport de leurs dimensions: et il le dit que très ouvertement [...], en affirmant qu'une grande pièce d'or tombe plus rapidement qu'une petite. » (C'est nous qui soulignons)¹⁴²

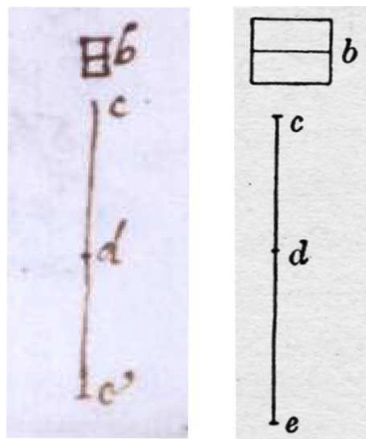


Figure 5.1 : le rapport des vitesses aux poids absolus (ou volumes pour les corps de même matière) selon Aristote (Palmieri 2005a, à gauche l'originale de Galilée, à droite le reproduction de Palmieri)

¹⁴¹ “for it often happens that things that are lighter are called heavier, and conversely. Thus, at times we say of a large piece of wood that it is heavier than a small piece of lead, even though, purely and simply, lead is heavier than wood [...] those things will have to be said to be equally heavy to one another which, when they are equal in size (1), will also be equal in heaviness thus, if we take two pieces of lead, which are equal in size, and they are also congruent in heaviness, they will have to be said to really weigh the same. Thus, it is clear that wood and lead must not be said to be equally heavy: for a piece of wood, which weighs the same thing as a piece of lead, will considerably exceed the latter in size.” Galilée, *De Motu Antiquiora*, 1590, p.1 de la version électronique du manuscrit, http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/scientific_revolution/galileo/englishtranslation.

¹⁴² “[Aristotle] says: Let there be a heavy mobile b, and let it be carried along line ce, which is divided at point d; if then mobile b is divided according to the proportion in which line ce is divided at point d, it is manifest that, during the time in which the whole of it is carried along the totality of line ce, in the same time this part is moved along line cd. From this it is overtly established that Aristotle wants mobiles of the same genus to observe between themselves in the speed of motion the ratio of the sizes that these mobiles have: and he says that very openly [...], by affirming that a large piece of gold is carried more swiftly than a small one.” *Ibid.* p. 16.

Galilée s'intéresse à la vitesse de chute de *tous* les mobiles et vise dans le *De Motu* à trouver les rapports qu'ont les vitesses de chute des mobiles à leurs poids absolu, à leurs poids spécifique et à la résistance du milieu. Il attribue à Aristote la formule suivante $V \sim P/R$: la vitesse de chute est proportionnelle au rapport (géométrique, donc une division) du poids absolu du mobile à la résistance du milieu. Pour réfuter ce rapport et en établir un autre, Galilée commence par préciser comment la « rapidité » ou la « lenteur » du mouvement de chute libre peut se produire :

« L'inégalité dans la lenteur et dans la rapidité du mouvement se produit de deux façons : Ou bien le même mobile est déplacé dans différents milieux ; ou le milieu est le même, mais les mobiles sont différents.

Puis il résume le but de son argumentation générale :

Nous allons démontrer bientôt que dans les deux cas de mouvement, la lenteur et la rapidité dépendent de la même cause, à savoir, *la lourdeur plus grande ou plus petite des médias et des mobiles*.

Galilée souhaite ainsi démontrer dans le *De Motu*, comme on va le voir, que le rapport de vitesse n'est pas géométrique, comme le prétendait Aristote, mais archimédien (arithmétique, donc représenté par une soustraction). La vitesse n'est pas P/R mais, comme le jeune Galilée vise à le montrer, proportionnelle à la différence entre le poids spécifique du mobile et celui du milieu : $V \sim P_c - P_m$ avec V la vitesse et P_c et P_m les poids spécifiques du corps et du milieu¹⁴³, sans pour autant définir explicitement le concept de poids spécifique mais le sens est là. Ainsi, dans le vide $P_m = 0$, et la vitesse sera proportionnelle au poids spécifique du mobile.

Mais auparavant, Galilée réfute la théorie d'Aristote :

[M]ais d'abord nous allons montrer que *la cause d'un tel effet* qui a été transmise par Aristote est insuffisante. » (C'est nous qui soulignons)¹⁴⁴.

Pour réfuter Aristote, Galilée sépare sa théorie en deux principes de proportionnalité (comme dans *les Discours* de 1638 cf. 2.2). Le premier établit la proportionnalité de la vitesse et du poids absolu ou du volume, ce qui revient au même pour les mobiles de même matière, car dans ce cas, un mobile deux fois plus volumineux est deux fois plus lourd, ce que Galilée démontre dans le *De*

¹⁴³ Cf. Koyré et Van Dyck pour une attribution d'une formule similaire à Galilée.

¹⁴⁴ "inequalities in the slowness and swiftness of motion occur in two ways; for either the same mobile is moved in different media; or the medium is the same, but the mobiles are different. We will demonstrate shortly that in both cases of motion the slowness and swiftness depend on the same cause, namely, the greater or lesser heaviness of the media and of the mobiles; but first we will show that *the cause of such an effect* which has been conveyed by Aristotle is insufficient." *Ibid* p. 14.

Motu. Le second principe établit la proportionnalité inverse de la vitesse et de la résistance du milieu. De ces deux principes, on tire $V \sim P/R$ pour Aristote.

Galilée commence par réfuter le second principe d'Aristote :

« Ainsi Aristote dans le livre IV de la Physique, texte # 71, a écrit, que le même mobile se déplace plus rapidement dans un milieu plus subtil que dans un plus épais, et, par conséquent, que *la cause* de la lenteur du mouvement est l'épaisseur du milieu et celle de la rapidité, sa subtilité; et il a confirmé cela en ne faisant appel à aucune autre raison que l'expérience, à savoir, par le fait que nous voyons que le mobile se déplace plus rapidement dans l'air que dans l'eau. Mais il sera facile de démontrer que *cette cause n'est pas suffisante*. Car si la vitesse du mouvement provient de la subtilité du milieu, le même mobile se déplacera toujours plus rapidement à travers les milieux plus subtils: ce qui est certainement faux; car nombreux sont les mobiles qui se déplacent par un mouvement naturel plus rapidement dans les milieux plus épais que dans les plus subtils, comme, par exemple, dans l'eau que dans l'air. » (C'est nous qui soulignons)¹⁴⁵

Sans entrer dans les détails de la discussion de la validité de la réfutation de ce second principe, car ce n'est pas l'objet de notre thèse, notons seulement que Galilée recherche ici les causes de la divergence des vitesses de chute du même mobile dans des milieux différents et vise à réfuter la cause fournie par Aristote : la subtilité ou l'épaisseur de ces milieux. Il souhaite démontrer que cette cause n'est pas suffisante. Galilée donne l'exemple d'une vessie gonflée qui chute lentement dans l'air mais qui monte dans l'eau avec une plus grande vitesse. Si la vitesse est inversement proportionnelle à la résistance du milieu, comme l'air est plus léger que l'eau, Galilée soutient que la vessie doit chuter dans l'air avec une plus grande vitesse que quand elle remonte dans l'eau. Mais ce n'est pas le cas et donc le second principe d'Aristote est faux. Galilée va aussi montrer qu'en suivant ce second principe, tous les corps qui chutent dans l'air doivent aussi le faire dans d'autres milieux, l'eau par exemple, ce qui n'est pas le cas, car cette vessie, ou une poutre en bois, chute dans l'air mais flotte sur l'eau.

Galilée va maintenant s'attaquer au premier principe, et l'on retrouve ici l'origine de la limitation de son expérience de pensée aux *mobiles de même matière* :

« Chapitre 8 [...] Dans lequel il est démontré que les différents mobiles qui se déplacent dans le même milieu observent un autre rapport que celui qui leur est attribué par Aristote.

¹⁴⁵ Thus Aristotle in Book IV of the *Physics*, text #71, has written, that the same mobile is moved more swiftly in a more subtle medium than in a thicker one, and, therefore, that *the cause* of the slowness of motion is the thickness of the medium, and that of the speed, its subtlety; and he has confirmed this by appeal to no other reason than experience, namely, because we see that a mobile is moved faster in air than in water. But it will be easy to demonstrate that *this cause is not sufficient*. For if the speed of motion comes from the subtlety of the medium, the same mobile will always be moved more swiftly through more subtle media: which is certainly false; for many are the mobiles which are moved with a natural motion faster in thicker media than in more subtle ones, as, for example, in water than in air.» *Ibid* pp. 14-15.

Afin donc que les choses qui doivent être étudiées en profondeur puissent être traitées plus facilement, il faut, en premier lieu, considérer que *la différence entre deux mobiles peut se produire de deux façons* : ou bien ils sont *de la même espèce* [nature], par exemple, tous deux en plomb, ou en fer ; et ils sont de tailles différentes ; ou bien ils sont d'espèces différentes, par exemple, l'un en fer, l'autre en bois; ils diffèrent alors l'un de l'autre, ou par la taille et par la lourdeur, ou par la lourdeur et non par la taille, ou par la taille et non par la lourdeur. *En ce qui concerne les mobiles qui sont de la même espèce*, Aristote a dit que le plus grand se déplace plus vite [...]

Combien ridicule est cette opinion, *est chose plus claire que la lumière du jour* : en effet, qui va croire jamais que si, par exemple, [...] à partir d'une haute tour, on jetait au même moment deux pierres, l'une de taille double de l'autre, alors, lorsque la plus petite est à mi-hauteur de la tour, la plus grande aurait déjà atteint le sol? » (C'est nous qui soulignons) ¹⁴⁶.

La clarté de l'absurdité du premier principe de la théorie d'Aristote est avant tout empirique pour Galilée : en lâchant deux pierres de même matière du sommet d'une tour on peut très bien observer que leurs vitesses ne suivent pas une proportionnalité linéaire à leurs poids absolus. Cette non concordance avec l'observation sera aussi avancée par Sagredo lors du premier jour des *Discours*, juste avant l'expérience de pensée (cf. 2.2). Ce fait empirique n'est pas suffisant pour Galilée, car la fonction peut se révéler ne pas être linéaire et la vitesse de chute peut dépendre du poids absolu du mobile (avec une autre fonction qui les relie). En cherchant les causes des effets, Galilée demande de faire plus l'utilisation de la raison que de l'expérience :

« Mais, pour que nous puissions toujours faire usage *d'avantage de raisons que d'exemples* (car nous cherchons les causes des effets, qui ne sont pas signalées par l'expérience), nous allons présenter notre façon de penser, dont la confirmation entraînera la ruine de l'opinion d'Aristote. » (C'est nous qui soulignons)¹⁴⁷

Pour analyser l'expérience de pensée de la tour de Pise dans le contexte de l'argument général qui va aboutir à la théorie restreinte, regardons de près comment Galilée s'y prend. Dans 5.2.1 on analysera son analogie entre la vitesse de chute libre et la flottabilité des corps sur l'eau, dans 5.2.2 l'expérience de pensée, pour enfin examiner comment Galilée argumente en faveur de sa théorie restreinte dans 5.2.3.

¹⁴⁶ "Chapter 8 [...] In which it is demonstrated that different mobiles moving in the same medium observe another ratio than the one attributed to them by Aristotle.

In order, then, that the things that must be thoroughly studied may be dealt with more easily, one must, in the first place, consider that *difference between two mobiles can happen in two ways*: for either they are of the same species, as, for example, both lead, or both iron; and they differ in size: or they are of different species, e.g. one iron, the other wood; they then differ from one another either in size and heaviness, or in heaviness and not in size, or in size and not in heaviness. *Concerning those mobiles that are of the same species* Aristotle has said, that the larger is moved faster [...]. How ridiculous this opinion is, *is clearer than daylight*: for who will ever believe that if, for example, [...] from a high tower, two stones, one being double the size of the other, were thrown at the same moment, that, when the smaller was at mid-tower, the larger would already have reached the ground?" *Ibid.*, pp. 15-16.

¹⁴⁷ "But, in order that we may always make *more use of reasons than of examples* (for we are seeking the causes of effects, which are not reported by experience), we will bring forth our way of thinking, whose confirmation will result in the downfall of Aristotle's opinion." *Ibid.* p. 16.

5.2.1 L'argument par analogie en trois étapes

Galilée explore pour commencer une analogie entre la vitesse de chute de mobiles de même matière dans un milieu donné, comme l'air, et le flottage d'une poutre et d'un bâton en bois sur l'eau :

« Nous disons donc que les mobiles de la même espèce (disons que sont de la même espèce les choses qui sont constituées de la même matière, comme le plomb ou le bois, etc.), bien qu'ils puissent varier en taille, se déplacent cependant avec la même rapidité, et qu'une plus grande pierre ne descend pas plus vite qu'une plus petite. Ceux qui sont surpris par cette conclusion seront aussi surpris qu'une très grande poutre puisse flotter sur l'eau, tout aussi bien qu'un petit morceau de bois: *car le raisonnement est le même.* » (C'est nous qui soulignons.)¹⁴⁸

Galilée procède en trois étapes ¹⁴⁹ avant de proposer son expérience de pensée :

La première consiste à penser au comportement d'une poutre en bois et d'un bâton du même bois flottant sur la surface de l'eau. Galilée demande d'imaginer que le poids spécifique de l'eau diminue jusqu'au point qu'il devienne plus léger que celui du bois. Puis il demande « Qui dira que la poutre descendra en premier ou plus rapidement que le petit morceau de bois ? »¹⁵⁰. Et répond :

« Car même si une grande poutre peut être plus lourde qu'un petit morceau de bois, la poutre doit être mise en relation avec la grande quantité d'eau qui doit être soulevée par elle, et le petit morceau de bois avec la petite quantité d'eau [qui doit être soulevé]: et comme une quantité d'eau aussi grande en taille que la poutre elle-même doit être soulevée par la poutre, et de même pour le petit morceau de bois, ces deux quantités d'eau, à savoir celles qui sont soulevées par les morceaux de bois, auront entre elles le même rapport en lourdeur qu'en taille (car les parties des choses homogènes sont l'une à l'autre en lourdeur comme elles sont en taille, ce qui devrait être démontré [et qu'il va démontrer plus tard]), c'est-à-dire, le rapport que la taille de la poutre et celle du petit morceau de bois ont l'une à l'autre ; de ce fait, le poids de la poutre aura le même rapport au poids de l'eau qui doit être soulevée par elle que le poids du petit morceau de bois au poids de l'eau qui doit être soulevée par celui-ci ; et la réticence de la grande quantité d'eau [à être soulevée] sera

¹⁴⁸ "We say, then, that mobiles of the same species (let those things be said to be of the same species that are constituted of the same material, such as lead or wood, etc.), though they may differ in size, are however moved with the same swiftness, and a larger stone does not go down more swiftly than a smaller one. Those who are surprised by this conclusion will also be surprised that a very large beam can float on water, just as well as a small piece of wood: *for the reasoning is the same.*" *Ibid.* pp. 16- 17.

¹⁴⁹ cf. Palmieri 2005a, p. 226-227 pour une analyse similaire.

¹⁵⁰ "who would ever say that the beam would go down first or more swiftly than the small piece of wood?" *De Motu.* p. 17.

surmontée par la grande poutre avec la même facilité que la résistance d'un peu d'eau sera surmontée par le petit morceau de bois. »¹⁵¹

Dans la deuxième étape Galilée inverse la stratégie de la première. Au lieu d'imaginer que le poids spécifique du milieu diminue, il imagine que le poids spécifique du corps augmente. Il demande d'imaginer un volume de cire qu'on remplit petit à petit avec du sable jusqu'à ce que le poids spécifique de la mixture devienne plus grand que celui de l'eau. Galilée demande : « qui croirait jamais que, si nous avons pris une particule de cette cire, disons un centième de celle-ci, elle ne coulerait pas, ou qu'elle coulerait cent fois plus lentement que la totalité de la cire ? »¹⁵²

Ces analogies nous montrent l'importance que Galilée accorde au poids spécifique et non pas au poids absolu comme cause de vitesse de chute. Cela se reflète aussi dans la troisième étape de son analogie archimédienne, où il fait le lien entre la flottabilité sur l'eau et la balance :

« Et il sera possible d'expérimenter la même chose dans la balance: car si on place de très gros poids, égaux de chaque côté, puis qu'on ajoute sur l'un d'eux quelque chose de lourd, mais seulement modérément, alors, le plus lourd descendra, mais pas plus vite que si les poids avaient été faibles. Et le même raisonnement tient dans l'eau : car la poutre correspond à l'un des poids sur la balance, tandis que l'autre poids est représenté par une quantité d'eau aussi grande en taille que la taille de la poutre : si cette quantité d'eau pèse la même chose que la poutre, la poutre ne descendra pas; si la poutre est rendue légèrement plus lourde d'une manière telle qu'elle descende, elle ne descendra pas plus rapidement qu'un petit morceau du même bois, qui pesait la même chose qu'une [aussi] petite partie de l'eau, et qu'on a ensuite rendu un peu plus lourd. »¹⁵³

¹⁵¹ "For although a large beam may be heavier than a small piece of wood, the beam must be put into relation with the great quantity of water that must be raised by it, and the small piece of wood with the small quantity of water [that must be raised by it]: and since an amount of water as great in size as the beam itself must be raised by the beam, and similarly for the small piece of wood, these two amounts of water, namely those that are raised by the pieces of wood, will have the same ratio in heaviness to one another as their sizes have (for the parts of homogeneous things are to one another in heaviness as they are in size, something which should be demonstrated [ce qu'il va démontrer plus tard]), that is, the ratio that the sizes of the beam and the small piece of wood have to one another: hence the heaviness of the beam will have the same ratio to the heaviness of the water that must be raised by it as the heaviness of the small piece has to the heaviness of the water that must be raised by it: and the reluctance of the large quantity of water [to be raised] will be surpassed by the large beam with the same facility as the resistance of a little water will be overcome by the small piece of wood" *Ibid.*

¹⁵² "who would ever believe, if we took a particle of such wax, say one hundredth of it, either that it would not go down or that it would go down a hundred times more slowly than the totality of the wax?" *Ibid.*

¹⁵³ "And it will be possible to experience the same thing in the balance: for if very large, equal weights are placed on each side, and then to one of them something heavy, but only modestly so, is added, the heavier will then go down, but not any more swiftly than if the weights had been small. And the same reasoning holds in water: for the beam corresponds to one of the weights of the balance, while the other weight is represented by an amount of water as great in size as the size of the beam: if this amount of water weighs the same as the beam, then the beam will not go down; if the beam is made slightly heavier in such a way that it goes down, it will not go down more swiftly than a small piece of the same wood, which weighed the same as an [equally] small part of the water, and then was made slightly heavier." *Ibid.*

Cette troisième étape peut être interprétée comme une analogie entre le rôle du poids absolu sur la balance et le rôle du poids spécifique dans la flottabilité des corps sur l'eau. Dans le premier cas, l'équilibre de la balance est rompu si on ajoute un poids sur l'un des bras de la balance en équilibre. Quelle que soit la matière de ces deux poids ou du poids ajouté, ce qui importe, c'est la différence entre le poids qui déjà sur la balance et le poids ajouté. Cette différence est en terme de poids absolu. Le corps « chute », pour ainsi dire, sur un bras de la balance quand on lui ajoute un poids supplémentaire. La vitesse de chute, pour ainsi dire, ne dépend pas du poids absolu du corps final (corps initial + corps ajouté) mais de la différence entre le poids absolu du corps initial et celui du corps ajouté. Quand on raisonne dans un milieu comme l'eau, cette différence doit être comprise en terme de poids spécifique. C'est quand on change le poids spécifique du corps par rapport au milieu, *ou vice versa*, que l'équilibre, qui existait entre le mobile et l'eau, est rompu et le corps qui flottait descend alors dans l'eau. Il descend de la même façon, quel que soit son volume ou poids absolu, une poutre ou un bâton de bois. Ce qui importe c'est la différence entre le poids spécifique du corps et celui du milieu. La vitesse de cette chute dépend ainsi de la différence entre le poids spécifique du corps et celui du milieu. C'est la conclusion qui sera défendue par Galilée à la fin de son analyse sur la vitesse de chute. On voit ici le début de la théorie restreinte de Galilée dans le *De Motu* : la vitesse de chute des mobiles est proportionnelle à la différence entre le poids spécifique du mobile et le poids spécifique du milieu.

Ces trois étapes précèdent directement l'expérience de pensée, et en suivant Palmieri elles « Semblent avoir été davantage une exploration de l'analogie étonnante, selon laquelle la raison pour laquelle des mobiles de même espèce, mais différents en volume, chutent à la même vitesse, est la même raison pour laquelle un morceau de bois et une grosse poutre flottent. »¹⁵⁴ Passons à présent à l'expérience de pensée de la tour de Pise dans le *De Motu*.

5.2.2 La tour de Pise dans le *De Motu*

Galilée s'attaque à présent au premier principe de la théorie d'Aristote avec son expérience de pensée, qu'il appelle d'ailleurs « argument ». Son scénario est presque identique à celle des *Discours* (cf. 2.2) mais la supposition suivante est justifiée différemment :

« Mais il est agréable de confirmer ceci par un autre *argument*. Et d'abord, admettons ce qui suit: à savoir, s'il y a deux mobiles, dont l'un se meut plus rapidement que l'autre, la combinaison des deux

¹⁵⁴ “seem to have been more of an exploration of the astonishing analogy, according to which the reason why mobiles of the same kind yet different in volume fall with the same speed is the same as why a chip of wood and a large beam float.” Palmieri 2005a, *Op.cit.* p. 228.

se meut plus lentement que la partie qui se mouvait plus rapidement que l'autre, mais plus rapidement que la partie restante, qui, seule, se déplaçait plus lentement que l'autre. » (C'est nous qui soulignons)¹⁵⁵

C'est la supposition de la « médiativité » de la vitesse dans l'argument de Gendler à trois prémisses : la vitesse est médiane - « [c]'est à dire, la vitesse naturelle est une propriété de telle sorte que si un corps A a une vitesse naturelle s_1 , et un corps B a une vitesse naturelle S_2 , la vitesse naturelle du composé combiné A-B tombera entre s_1 et S_2 . » -, le poids absolu n'est pas médian, et donc la vitesse ne peut pas être proportionnelle au poids absolu. Rappelons-nous que Galilée dans les *Discours* la justifie avec une sorte d'axiome théorique qui décrit la façon d'augmenter ou de diminuer la vitesse de chute d'un mobile : « [la vitesse de chute] ne peut être augmentée ni diminuée sinon par violence ou par quelque obstacle » (cf. 2.2.2). Dans le *De Motu*, cette supposition est justifié au moyen de deux exemples¹⁵⁶ : le premier traite de deux mobiles en mouvement ascendant dans l'eau tandis que le second traite de deux mobiles de matières différentes en chute libre dans l'air :

« [S]i [...] deux mobiles chutent vers le bas, dont l'un est entraîné plus lentement que l'autre, comme, par exemple, si l'un est du bois, l'autre une vessie, et qu'ils descendent dans l'air, le bois plus rapidement que la vessie, nous admettons ceci: s'ils sont combinés, le composé va tomber plus lentement que le bois seul, mais plus rapidement que la vessie seule. Car il est manifeste que la rapidité du bois sera retardée par la lenteur de la vessie, tandis que la lenteur de la vessie sera accélérée par la vitesse du bois; et de même il en résultera un certain mouvement intermédiaire entre la lenteur de la vessie et la rapidité du bois. » (C'est nous qui soulignons.)¹⁵⁷

Cette justification montre bien la pensée de Galilée dans le *De Motu* : la médiativité de la vitesse d'un composé fait de deux corps de poids spécifiques différents reflète déjà la conclusion du *De Motu* concernant la différence de vitesse de chute des mobiles de différentes matières, dans le plein

¹⁵⁵ "But it is pleasing to confirm this by another *argument*. And first, let the following be presupposed: namely, if there are two mobiles, one of which is moved faster than the other, the combination of the two is moved more slowly than that part which was moved faster than the other, but more swiftly than the remaining part, which, alone, was carried more slowly than the other." Traduite par l'auteur, Galileo 1590 *Op.cit.* pp. 17-18.

¹⁵⁶ "As, for example, if we understand two mobiles, such as a piece of wax and an inflated bladder, both of which are carried upward from deep water, but the wax more slowly than the bladder, we ask that it be conceded, that if they are combined, the combination will go up more slowly than the bladder alone, but more swiftly than the wax alone. Indeed this is very clear: for who doubts that the slowness of the wax will be diminished by the speed of the bladder, and, on the other hand, that the speed of the bladder will be retarded by the slowness of the wax, and that a certain motion intermediate between the slowness of the wax and the speed of the bladder will result?" *Ibid* p. 18.

¹⁵⁷ "[I]f [...] two mobiles go down, one of which is carried more slowly than the other, as, for example, if one is wood, the other a bladder, which go down in air, the wood more swiftly than the bladder, we presuppose this: if they are combined, the combination will go down more slowly than the wood alone, but more swiftly than the bladder alone. For it is manifest that the swiftness of the wood will be retarded by the slowness of the bladder, while the slowness of the bladder will be accelerated by the speed of the wood; and similarly a certain motion intermediate between the slowness of the bladder and the swiftness of the wood will result." *Ibid.* p.17.

et dans le vide. Cette justification montre aussi l'importance de la limitation de l'expérience de pensée à des particuliers de mobiles de même matière et dont ni la forme ni aucun autre facteur n'intervient dans la détermination de la vitesse de chute, ce qui n'est pas le cas dans l'exemple ci-dessus. Les deux mobiles de poids spécifiques différents forment un corps certes plus lourd que le mobile le plus lourd, mais avec un poids spécifique médian. La forme aussi intervient dans la médiativité de la vitesse du composé considéré dans cet exemple.

Notons que cette justification de la supposition de médiativité de la vitesse de chute peut paraître déplacée dans le contexte de l'expérience de pensée, vu que Galilée considère, comme dans la version dans les *Discours*, deux corps de même matière. Cet exemple ne peut donc pas donner la justification nécessaire à cette supposition. Néanmoins, cette dernière ne se trouve pas affaiblie. Galilée, par le biais de cet exemple, semble lui donner une justification empirique, ou semi-empirique, issue de l'expérience quotidienne ¹⁵⁸.

Muni de cette supposition, Galilée va s'attaquer au premier principe de la théorie d'Aristote par le biais de son expérience de pensée :

« Cela étant présupposé, j'argumente de la façon suivante : en prouvant que les mobiles de la même espèce, de tailles inégales, sont entraînés avec la même rapidité.

Soit deux mobiles de la même espèce, a le plus grand, et b le plus petit; et admettons, si c'est possible, comme nos adversaires le soutiennent, que a se déplace plus rapidement que b. Il y a donc deux mobiles dont l'un se déplace plus vite que l'autre; par conséquent, selon ce qui a été présupposé, la combinaison des deux [le composé] se déplacera plus lentement que la partie, qui seule, se déplaçait plus rapidement que l'autre. Si donc a et b sont combinés, le composé se déplacera plus lentement que a seul: mais la combinaison de a et b est plus grande que a seul: *Donc, contrairement à l'opinion de nos adversaires, le plus grand mobile se déplacera plus lentement que le plus petit; ce qui serait certainement inapproprié.* [Palmieri traduit cette dernière phrase "which is awkward [quod quidem est inconveniens].» (C'est nous qui soulignons)¹⁵⁹.

L'expérience de pensée est présentée de sorte que Galilée arrive à une absurdité en partant de la proportionnalité de la vitesse de chute et du poids absolu : « would certainly be unsuitable » (c'est-à-dire « inapproprié » ou selon la traduction de Palmieri « which is awkward [quod quidem est

¹⁵⁸ Cf. Van Dyck 2005-2006, pp. 205-207 pour une analyse similaire de la justification de cette supposition de médiativité.

¹⁵⁹ "This having been presupposed, I argue as follows: by proving that mobiles of the same species, of unequal sizes, are carried with the same swiftness.

Let there be two mobiles of the same species, the larger a, and the smaller b; and, if it can be done, as our adversaries hold, let a be moved more swiftly than b. There are then two mobiles one of which is moved more swiftly than the other; hence, according to what has been presupposed, the combination of the two will be moved more slowly than the part, which alone, was moved more swiftly than the other. If then a and b are combined, the combination will be moved more slowly than a alone: but the combination of a and b is larger than a alone: hence, contrary to our adversaries' view, the larger mobile will be moved more slowly than the smaller; which would certainly be unsuitable." Galilée 1590 *Op.cit.* p. 18.

inconveniens]. »). Cette expérience de pensée sera suivie d'un scénario un peu différent de chute de corps de même matière et même taille. C'est une référence à Jean Baptiste Benedetti¹⁶⁰, qui a conçu une expérience de pensée similaire avec la chute de deux briques identiques. Ce dernier arrive à la même conclusion que le jeune Galilée concernant la proportionnalité de la vitesse de chute des corps à leurs poids spécifiques (cf. Koyré 1960).

« *Quelle meilleur signe exiger de la fausseté de l'opinion d'Aristote ? Mais, je le demande, qui ne reconnaîtrait pas sur-le-champ la vérité de cela, sans rien faire de plus que l'examiner d'une manière naturelle ? Car, si nous supposons que les mobiles a et b sont égaux et qu'ils sont très proches l'un de l'autre, alors, comme tout le monde l'accorde, ils se déplaceront avec la même rapidité: et si nous imaginons [if we understand that] que pendant qu'ils se déplacent, on les relie, pourquoi, je vous le demande, iraient-ils doubler la rapidité de leur mouvement, comme Aristote l'a soutenu, ou l'augmenter ? Par conséquent, acceptez qu'il est suffisamment confirmé qu'il existe aucune cause, per se, pour que des mobiles de la même espèce doivent se déplacer à des vitesses inégales, mais qu'il y a certainement une cause pour laquelle ils doivent se déplacer à la même vitesse. Mais s'il y avait une cause accidentelle, comme, par exemple, la forme du mobile, elle ne doit pas être classée parmi les causes per se. » (C'est nous qui soulignons.)¹⁶¹*

Notons avant d'analyser la conclusion de l'expérience de pensée de Galilée que Van Dyck (2005-2006) souligne que cette dernière question « vont-ils doubler la rapidité de leur mouvement, comme Aristote a tenu, ou l'augmenter ? » restera rhétorique et n'aura pas de réponse avant les années 1630. Il ajoutera « Si une balance mesure vraiment la tendance d'un corps à se mouvoir vers le bas, comme Galilée le laisse entendre à plusieurs reprises dans le *De motu*, alors la seule réponse naturelle à la question serait : pourquoi pas ? »¹⁶² (cf. 5.6)

Galilée réfute alors le premier principe de la théorie d'Aristote avec l'argument de la tour de Pise. Il tire aussi la même conclusion de la chute de deux corps identiques selon tous leurs aspects, même la

¹⁶⁰ Les travaux de Benedetti méritent d'être regardé de plus près, mais notre but dans cette analyse étant de montrer le passage de Galilée de la théorie restreinte de 1590 à la théorie générale de 1638, on limitera notre analyse de cette théorie restreinte aux travaux de Galilée. Koyré analyse Benedetti et il le cite :

« Je dis donc que s'il y avait deux corps de la même forme et de la même espèce (gravité spécifique), [ces corps] qu'ils soient égaux ou inégaux se mouvraient, dans le même milieu, par un espace égal dans un temps égal. Cette proposition est très évidente, car, s'ils se mouvaient dans un temps inégal, ils devraient être d'espèces différentes, ou se mouvoir à travers des milieux différents » Koyré 1960, *Op.cit.* p. 203. C'est bien la théorie restreinte du jeune Galilée.

¹⁶¹ "What clearer indication do we require of the falsehood of Aristotle's opinion? But, I ask, who will not recognize the truth of this on the spot, when he examines it in a pure and simple and natural way? For if we presuppose that the mobiles a and b are equal and that they are very near each other, then, by the consensus of all, they will be moved with equal swiftness: and if we understand that while they are being moved, they are joined, why, I ask, will they double the swiftness of their motion, as Aristotle held, or increase it? Accordingly, let it be sufficiently confirmed that there exists no cause, per se, why mobiles of the same species should be moved with unequal speeds, but there certainly is one why they should be moved with equal speed. But if there were some accidental cause, such as, for example, the shape of the mobile, it must not be classified amongst the causes per se." Galilée 1590 *Op.cit.* p. 18.

¹⁶² "If a balance does indeed measure a body's tendency for downward motion, as repeatedly implied by Galileo in *De motu*, then the only natural response to the question would be: why not?" Van Dyck, *Op.cit.* p. 208.

dimension¹⁶³ : « *qu'il existe aucune cause, per se, pour que les mobiles de la même espèce doivent être déplacés à des vitesses inégales* ». Il conclut qu'il n'y a aucune cause pour que les mobiles de même matière chutent avec des vitesses différentes. Galilée se situe aussi dans le scénario de chute dans le plein à ce stade, dans le *De Motu*. Pour Galilée, c'est uniquement en écartant les causes accidentelles qu'on peut conclure que la vitesse de chute de mobiles *de même matière* doit être identique. Galilée est en mesure d'écarter ces causes accidentelles, dans le plein, au moyen de son expérience de pensée, en choisissant soigneusement ses particuliers, selon le vocabulaire de Norton. Dans le but de ne plus avoir de différences entre les deux mobiles, hormis leur dimensions : si on imagine la chute de deux mobiles de même matière, le même poids spécifique aura le même effet sur la vitesse de chute des deux mobiles. Ces mobiles sont d'une forme qui ne doit pas causer de divergence de la vitesse de chute dans le plein : deux boules ou pierres et non pas une feuille et un lingot d'or (exemple qu'il va utiliser dans *les Discours*).

Enfin, une dernière cause accidentelle ne peut pas être idéalisée à proprement parler et en fait est responsable de la divergence de vitesse de chute dans le plein, même pour les mobiles de même matière : c'est l'effet disproportionné de la résistance du milieu sur les différentes surfaces de ces mobiles identiques sous tous les aspects, sauf en dimensions. Galilée n'aborde pas cet aspect dans le *De Motu* mais dans les *Discours*, dans le but d'expliquer son effet, sans pour autant remettre en cause son expérience de pensée (cf. 5.4.1).

Le jeune Galilée suppose à ce stade que pour les mobiles de même matière, et en idéalisant les autres facteurs, dont la résistance du milieu, on a égalité des vitesses de chute. Cela n'est valable que pour *ces mobiles de même matière*. Mais qu'en est-il de la vitesse de chute des mobiles de *toutes* les matières, dans le *plein* et dans le *vide* ? Galilée va maintenant extrapoler, en se basant sur cette égalité des vitesses de chute des mobiles de même matière, sa théorie restreinte de la vitesse de chute de *tous* les mobiles.

5.2.3 Extrapolation de la théorie restreinte de la vitesse de chute dans le *De Motu*

Suite à sa réfutation du premier principe d'Aristote, Galilée suppose que la vitesse de chute de mobiles de même matière est identique, si on néglige les causes accidentelles. Se fondant sur cette supposition, Galilée fournit les règles générales pour calculer la vitesse de chute de *tous* les mobiles, *dans le plein*, puis *dans le vide*. Pour ce faire, il n'examine que le cas de chute de mobiles

¹⁶³ Cf. Koyré 1960, *Op.cit.* p. 204 pour une hypothétique réponse de la part de Simplicio concernant le scénario de chute de deux corps identiques : La résistance du milieu aux deux mobiles double tandis que la dimension double, alors selon Aristote le composé chute à la même vitesse que chacun de ses composants.

de mêmes dimensions mais de poids spécifiques différents. Galilée déduit ensuite de ce cas les vitesses de chute de mobiles de poids spécifiques et de dimensions quelconques. Voici comment il s’y prend :

« Mais, pour en arriver aux choses qui restent, il s’ensuit maintenant que nous devrions voir quel rapport les mobiles de différentes espèces, déplacés dans le même milieu, observent dans leurs mouvements. De tels mobiles peuvent différer les uns des autres de trois manières : ou ils diffèrent en taille et non en lourdeur, ou ils diffèrent en lourdeur et non en taille, ou ils diffèrent en taille et en lourdeur; *il est nécessaire d’enquêter seulement sur ceux qui diffèrent en lourdeur et non en taille. Car les rapports de ceux qui diffèrent des deux autres façons peuvent être réduits à celui-ci* : ainsi, si les mobiles diffèrent en taille et non en lourdeur, si du plus grand on prend une partie qui est égale au plus petit, alors les mobiles seront différents en lourdeur et non en taille; et cette partie, enlevée au plus grand mobile, observera le même rapport avec l’autre mobile que le rapport que l’ensemble du mobile intact observera aussi (car il a été démontré [d’après l’expérience de pensée] *que les mobiles du même genre, quand bien même ils peuvent différer en taille, se déplacent à la même vitesse*): et de même, si les mobiles diffèrent en taille et en lourdeur, après avoir enlevé, du plus grand, une partie qui est égale au plus petit mobile, nous aurons encore deux mobiles qui diffèrent en lourdeur et non en taille; et cette partie observera en son mouvement le même rapport avec l’autre mobile, que l’ensemble de l’autre mobile intact (*car, encore une fois, c’est avec la même vitesse que se déplacent la partie et le tout de mobiles de même espèce* [également d’après la conclusion de l’expérience de pensée]). On voit ainsi clairement comment, si le rapport entre les mouvements de ces mobiles qui ne diffèrent qu’en lourdeur et non en taille est donné, les rapports de ceux qui diffèrent de toute autre manière sont également donnés. » (C’est nous qui soulignons.)¹⁶⁴

Galilée se permet alors de réduire son analyse de la vitesse de chute de tous les mobiles dans un seul milieu à une analyse de la vitesse de chute de mobiles dont la seule différence est le poids spécifique : « *sur ceux qui diffèrent en lourdeur et non en taille* ». Galilée se fonde ici sur l’égalité de la vitesse de chute des mobiles de même matière, c’est-à-dire sur la conclusion de son expérience de pensée. Répétons-le, cette conclusion ne peut être obtenue qu’en idéalisant les facteurs accidentels, surtout la résistance du milieu. Galilée va aussi s’intéresser à la vitesse de chute du même mobile dans différents milieux.

¹⁶⁴ “But, in order to come to the things that remain, it follows now that we should see what ratio mobiles of different species, moved in the same medium, observe in their motions. Such mobiles can differ from one another in three ways; for either they differ in size and not in heaviness, or they differ in heaviness and not in size, or they differ in size and in heaviness; *it is necessary to inquire only about those that differ in heaviness and not in size. For the ratios of those that differ in the other two ways can be reduced to this one*: thus if the mobiles differ in size and not in heaviness, if from the larger a part is taken that is equal to the smaller, then the mobiles will differ in heaviness and not in size; and this part, taken away from the larger mobile, will observe the same ratio with the other mobile, as the ratio that the whole of the intact one will also observe (*for it has been demonstrated* [d’après l’expérience de pensée] *that mobiles of the same genus, however much they may differ in size, are moved with the same speed*): and similarly, if the mobiles differ in size and in heaviness, having taken hold, from the larger, of a part that is equal to the smaller mobile, we will again have two mobiles which differ in heaviness and not in size; and this part will observe the same ratio with the other mobile in its motion, as the whole of the other intact mobile (for, again, it is with the same swiftness that the part and the whole of mobiles of the same species are moved [aussi d’après la conclusion de l’expérience de pensée]. *Thus is it evident how, if the ratio of the motions of those mobiles that differ only in heaviness and not in size is given, the ratios of those that differ in any other way are also given.*” Galilée 1590 *Op.cit.* p. 19.

« Et donc, afin que nous puissions trouver ce rapport et montrer, contre la manière de penser d'Aristote, qu'en aucune manière les mobiles n'observent le rapport de leurs lourdeurs, même si ils sont de différentes espèces, nous allons démontrer des choses dont dépend la réponse, non seulement à cette enquête, mais aussi à l'enquête sur le rapport des mouvements du même mobile dans différents milieux; et nous allons examiner ces deux questions en même temps. » (C'est nous qui soulignons.)¹⁶⁵

Comme dans les *Discours*, Galilée sépare les deux principes de la théorie d'Aristote de la vitesse de chute des corps. Ayant réfuté la première proportionnalité avec son expérience de pensée, puis la seconde avec l'exemple de la vessie gonflée, Galilée se tourne vers la vitesse de chute de tous les mobiles dans tous les milieux. Il propose à présent une théorie restreinte de la vitesse de chute des mobiles, inspirée par le principe archimédien de flottabilité : la résistance du milieu « enlève » du poids aux corps et ainsi la vitesse de chute est proportionnelle au poids restant, en termes de poids spécifique :

« Il nous reste donc à montrer que, même dans le mouvement des mobiles vers le bas, les vitesses [swiftnesses] ne sont pas les unes aux autres comme les lourdeurs des mobiles et, en même temps, de montrer quel rapport les vitesses du même mobile observent dans différents milieux; toutes ces choses se tireront facilement de la démonstration suivante. Je dis donc qu'une grandeur solide [solid magnitude] plus lourde que l'eau est entraînée vers le bas avec autant de force que celle par laquelle une quantité d'eau, *ayant une taille égale à la taille de cette même grandeur*, est plus légère que cette grandeur. » (C'est nous qui soulignons.)¹⁶⁶

En d'autres termes la vitesse de chute d'un mobile dans l'eau est proportionnelle à la différence entre le poids spécifique du mobile et le poids spécifique de l'eau. Galilée propose plusieurs démonstrations de cette affirmation et conclut :

« Maintenant, si on a saisi cette démonstration, on peut facilement discerner la réponse à ces questions [sur les ratios de vitesse de chute du même mobile dans différents milieux]. Car il est clair que le même mobile qui descend dans différents milieux observe, dans la rapidité de ses mouvements, le même rapport de l'un à l'autre que ceux de l'excès de sa propre lourdeur à la lourdeur du milieu : ainsi, si la lourdeur du mobile est 8, mais que la lourdeur d'une quantité d'un des milieux, égale à celle du mobile, est 6, la rapidité de ce corps sera 2; si la lourdeur d'une quantité de l'autre milieu, égale à la taille du mobile, est 4, alors la vitesse du mobile, dans ce

¹⁶⁵ “And so, in order that we may find this ratio and, against Aristotle's way of thinking, show that in no way do mobiles observe the ratio of their heavinesses, *even if they are of different species*, we will demonstrate things on which depends the answer not only to this investigation, but also to the investigation of the ratio of the motions of the same mobile in different media; and we will examine both questions simultaneously.” *Ibid.*

¹⁶⁶ “It thus remains for us to show that also in the motion of mobiles downward the swiftnesses are not to one another as the heavinesses of the mobiles and, at the same time, to show what ratio the swiftnesses of the same mobile observe in different media; *all these things will easily be drawn from the following demonstration*. I say, then, that a solid magnitude heavier than water is carried downward with as much force as that by which a quantity of water, *having a size equal to the size of the same magnitude*, is lighter than this magnitude.” *Ibid.* p. 23.

milieu, sera 4. Il est donc évident que ces vitesses seront les unes aux autres comme 2 et 4; et non pas comme les épaisseurs ou les lourdeurs des milieux, comme le voulait Aristote, lesquelles sont les unes aux autres comme 6 et 4.

De même, la réponse à l'autre question est évidente : à savoir, quel rapport les vitesses des mobiles égaux en taille, mais inégaux en lourdeur, observent l'une à l'autre dans le même milieu. *Car les vitesses de ces mobiles seront l'une à l'autre comme les excès par lesquels les lourdeurs des mobiles dépassent la lourdeur du milieu* : ainsi, par exemple, si deux mobiles sont égaux en taille, mais inégaux en lourdeur, la lourdeur de l'un étant 8, et celle de l'autre 6, mais que la lourdeur d'une quantité du milieu, de taille égale à la taille de l'un des deux mobiles est 4, alors la vitesse du premier mobile sera 4 et celle du dernier sera 2. Par conséquent, ces vitesses observeront le rapport de 4 à 2; et non celui qui est entre les lourdeurs, à savoir 8 à 6. » (C'est nous qui soulignons.)¹⁶⁷

Galilée, en partant de l'égalité des vitesses de chute de corps de même matière, propose que la vitesse de chute de tous les corps doit être proportionnelle à $p(\text{corps}) - p(\text{milieu})$ (avec p poids spécifique). Mais cette règle *n'est pas confirmée par l'expérience*, ajoute-t-il, sans pour autant s'attarder sur cette non-concordance dans le *De Motu*, ni surtout rejeter sa théorie restreinte :

« Voilà donc les règles générales des rapports des mouvements des mobiles, qu'ils soient de la même espèce ou non, qu'ils soient dans le même milieu ou dans différents milieux, qu'ils se déplacent vers le haut ou vers le bas. *Mais il faut noter qu'une très grande difficulté se présente ici: on constatera en faisant l'expérience que ces rapports ne sont pas respectés.* Car si l'on prend deux mobiles différents, qui ont des propriétés telles que l'un est entraîné deux fois plus rapidement que l'autre, puis qu'on les lâche du haut d'une tour, le premier ne touchera certainement pas le sol plus vite, deux fois plus rapidement : qui plus est, si l'on fait l'observation, celui qui est le plus léger au début du mouvement précédera le plus lourd et sera plus rapide. *Ici n'est pas l'endroit pour enquêter davantage sur la façon dont ces différences et, pour ainsi dire, ces merveilles existent (car elles sont accidentelles)* : il faut d'abord, en effet, examiner certaines choses qui n'ont pas encore été

¹⁶⁷ “Now, if this demonstration has been grasped, the answer to these questions [sur les ratio de vitesse de chute du même mobile dans différents média] can easily be discerned. For it is clear that that the same mobile going down in different media, observes in the swiftness of its motions, the ratio to one another of the excesses of its own heaviness over the heavinesses of the media: thus if the heaviness of the mobile is 8, but the heaviness of a size of one medium, equal to that of the mobile, is 6, then the swiftness of this body will be 2; if the heaviness of an amount of the other medium, equal to the size of the mobile, is 4, then the swiftness of the mobile, in this medium, will be 4. It is therefore evident that these swiftnesses will be to one another as 2 and 4; and not as the thicknesses or the heavinesses of the media, which is what Aristotle wanted, which are to one another as 6 and 4

Similarly the answer to the other question is evident : namely, what ratio the speeds of mobiles equal in size, but unequal in heaviness, observe with one another in the same medium. *For the speeds of such mobiles will be to one another as the excesses by which the heavinesses of the mobiles exceed the heaviness of the medium*: thus, for example, if two mobiles are equal in size, but unequal in heaviness, the heaviness of one being 8, and of the other 6, but the heaviness of an amount of the medium, equal in size to the size of one of the two mobiles, is 4, then the swiftness of the former mobile will be 4, and that of the latter will be 2. Hence these speeds will observe the ratio of 4 to 2; and not that which is between the heavinesses, namely 8 to 6.” *Ibid.* p. 24.

inspectées. Car il est nécessaire, tout d'abord, de voir pourquoi le mouvement naturel est plus lent au début.¹⁶⁸ » (C'est nous qui soulignons)¹⁶⁹

Galilée arrive enfin à sa conclusion concernant la chute des corps de différentes matières *dans le vide* :

« *C'est pourquoi, dans le vide, le mobile se mouvra de la même façon que dans le plein. Or, dans le plein, le mobile se meut selon la proportion de l'excès de sa gravité sur la gravité du milieu dans lequel il se meut, et, pareillement, dans le vide, selon l'excès de sa gravité sur la gravité du vide ; et comme celle-ci est néant, l'excès de la gravité du mobile sur la gravité du vide sera [égal à] sa gravité totale ; aussi se mouvra-t-il plus rapidement [que dans le plein], en proportion de sa gravité totale. En effet, dans aucun plein ne pourra-t-il se mouvoir aussi rapidement, vu que l'excès de la gravité du mobile sur la gravité du milieu sera plus petit que la gravité totale du mobile ; aussi sa vitesse sera-t-elle également plus petite...* » (C'est nous qui soulignons)¹⁷⁰

La vitesse dans le vide est proportionnelle au poids spécifique du corps, car dans le vide, il n'y a pas de résistance du milieu et donc $p(\text{milieu}) = 0$. La vitesse de chute diffère pour les corps de différentes matières, dans le vide : les mobiles plus lourds, en terme de poids spécifique, tombent plus vite que les mobiles plus légers.

5.2.4 Conclusion

Dans le *De Motu*, Galilée part ainsi de l'hypothèse de la proportionnalité entre vitesse et poids spécifique : la différence entre les poids spécifiques des mobiles cause une divergence de la vitesse

¹⁶⁸ cf., Palmieri 2005b, Galileo's construction of idealized fall in the void, *History of Science.*, 43/4: 343–89. p. 355 pour une analyse du rôle de la loi d'accélération en temps carré, Galilée trouve la réponse dans *De motu accelerato*.

¹⁶⁹ “These, then, are the general rules of the ratios of the motions of mobiles, whether of the same species or not, whether in the same medium or in different media, whether moved upward or downward. *But it must be noted that a very great difficulty arises here: it will be found that these ratios are not observed by one who has made a test.* For if one takes two different mobiles, which have such properties that one is carried twice as swiftly as the other, and then releases them from the top of a tower, it will certainly not hit the ground faster, twice as swiftly: what is more, if one makes the observation, the one which is lighter at the beginning of the motion will precede the heavier and will be faster. *This is not the place to inquire into how these differences and, so to speak, prodigies come about (for they are accidental):* for it is necessary first to examine certain things which have not yet been inspected. For it is necessary, first, to see why natural motion is slower at the beginning.” Galilée 1590 *Op.cit.* p. 24.

¹⁷⁰ “Thus, in a void also a mobile will be moved in the same way as in a plenum. For in a plenum a mobile is moved swiftly according to the excess of its own heaviness over the heaviness of the medium through which it is moved; and thus in a void it will be moved according to the excess of its heaviness over the heaviness of the void: since this is null, the excess of the heaviness of the mobile over the heaviness of the void will be the total heaviness of this same mobile; thus it will be moved swiftly according to its own total heaviness. But in no plenum will it be able to be moved as swiftly, since the excess of the heaviness of the mobile over the heaviness of the medium is less than the total heaviness of the mobile: thus the swiftness will also be less, than if it were moved according to its own total heaviness.” p. 32, traduit par Koyré 1960 *Op.cit.* p. 228.

de chute de ces mobiles dans un même milieu. Le jeune Galilée va soutenir aussi que, *dans le vide la vitesse est proportionnelle au poids spécifique*.

Remettons nous alors dans le contexte du chapitre 4 sur la possible réduction de cette expérience de pensée à un EP-argument (l'approche de Norton) et surtout sur la conclusion de Brown que cette expérience de pensée nous révèle et justifie une loi de la nature. Regardons alors comment il devient l'argument proposé par Gendler (*cf.* 4.4.3) dans le *De Motu* :

- (1') La vitesse est médiane
- (2') le poids spécifique est médian
- (3') La vitesse est proportionnelle au poids spécifique

Si on adopte l'approche et la terminologie de Brown, la loi de la nature qui est révélé dans les *De Motu* est alors : (3') La vitesse est proportionnelle au poids spécifique. Aussi selon Norton, c'est un argument qui aboutit à (3') et on n'a aucune contradiction alors dans ces trois prémisses, contrairement à l'argument présenté par Gendler (*cf.* 4.4.3). Néanmoins, cet argument, comme l'expérience de pensée en question, ne distingue en rien une conclusion comme (3') et une conclusion inverse énonçant l'indépendance de la vitesse par rapport au poids spécifique, ou par rapport à tout autre variable, la théorie générale de Galilée qui sera proposé dans les années 1630. C'est à dire (3) dans l'argument original de Gendler. Ce qui montre encore une fois la fonction uniquement réfutatoire de cette expérience de pensée (*cf.* 5.4 et 5.5 pour une analyse plus détaillée de ce qu'on peut tirer de cette expérience de pensée concernant les deux approches de Brown et Norton.)

Dans le cas de l'expérience de pensée, comme le scénario met en scène deux mobiles de la même matière et donc du même poids spécifique, rien ne peut être conclu concernant l'effet du poids spécifique sur la vitesse de chute. En fait, comme on le verra dans la section suivante, Galilée aura besoin d'au moins encore deux étapes dans son argument général *des Discours* afin de conclure que la vitesse de chute de *tous* les corps dans le *vide* est identique. Conclusion que Brown attribue à l'expérience de pensée.

Passons donc à présent aux *Discours* où Galilée, par le biais de Salviati, défend sa théorie générale de la vitesse de chute avec une série d'arguments qui commence par l'expérience de pensée de la tour de Pise. On présentera la stratégie complète de Galilée afin de mieux comprendre la place de cette expérience de pensée dans son argumentation générale, et donc sa fonction. On verra qu'il va aussi identifier les causes des divergences des vitesses de chute de mobiles dans le

plein, *qu'ils soient de même matière ou pas*. Le Galilée des *Discours*, contrairement au jeune Galilée du *De Motu*, va maintenant identifier le rôle de toutes les causes accidentelles : la résistance du milieu, la forme et la surface des mobiles en chute libre dans un milieu donné.

5.3 Les *Discours*

Nous avons déjà examiné l'expérience de pensée dans sa version des *Discours* dans la section 2.2. Nous avons exposé les deux conclusions de Galilée, la première réfutatoire contre le premier principe de la théorie d'Aristote, tandis que la seconde établit l'égalité des vitesses de chute des mobiles *de même matière*. Nous avons souligné que Galilée se précipite un peu en concluant cette égalité suite à l'expérience de pensée, car dans le plein on ne l'obtient pas, même en limitant le scénario à la chute de mobiles de même matière. De plus, Galilée n'est pas en mesure de supposer l'existence du vide à ce stade de la discussion. En fait, cette égalité ne peut être obtenue que si Galilée est en mesure de négliger l'effet de la résistance du milieu, en particulier son effet sur les différentes surfaces des mobiles. On verra dans 5.4.1 comment Galilée explique le retardement disproportionné causé par la résistance du milieu sur les différentes surfaces des mobiles de dimensions différentes. Elle a pour effet la divergence des vitesses de chute des mobiles *de même matière* dans un milieu, si dilué soit-il, comme l'air. On a vu aussi dans l'exemple de la feuille et du lingot d'or que la forme cause une divergence des vitesses de chute des mobiles de même matière dans le plein. Cela montre que les particuliers mis en jeu dans l'expérience de pensée, un milieu dilué comme l'air et des mobiles de même matière, sont soigneusement choisis par Galilée pour lui permettre de négliger l'effet de ces facteurs sans pour autant supposer l'existence du vide.

La stratégie argumentative complète, qui commence par l'expérience de pensée, mais n'est nullement limitée à cette dernière, traitera de ces facteurs explicitement. C'est ce tout argumentatif, qui contient une partie empirique avec des expériences sur les pendules, qui justifie la théorie générale qui établit l'égalité des vitesses de chute de *tous* les mobiles dans le *vide*. Galilée propose aussi une règle générale pour calculer les vitesses de chute de tous les mobiles dans le plein. Le fait que cette expérience de pensée se trouve dans ce tout argumentatif permet à Galilée de revenir sur les idéalizations faites dans le scénario de la tour de Pise, qui lui ont permis de ne considérer que l'effet du poids absolu sur la vitesse de chute pour réfuter le rôle assigné par Aristote au poids absolu.

Dans cette section, nous allons regarder de près comment Galilée argumente, tout au long d'une trentaine de pages venant juste après l'expérience de pensée, en faveur de sa théorie générale de la

vitesse de chute libre. On a vu dans la section 2.2 et dans le chapitre 4 que c'est cette conclusion qui est communément attribuée à l'expérience de pensée. On verra dans cette section que ce n'est que suite à plusieurs arguments, dont un argument de passage à la limite, et à des données d'expériences réelles sur les pendules, que Galilée arrive enfin à défendre et à justifier sa théorie. Le but de cette section est dans ce cadre de montrer comment Galilée arrive à justifier sa théorie générale.

5.3.1 Extrapolation de la théorie générale de la vitesse de chute dans *les Discours*

Juste après son expérience de pensée de la tour de Pise, Galilée commence par présenter plusieurs arguments contre le second principe d'Aristote, celui qui concerne la proportionnalité inverse des vitesses et des résistances des milieux. Regardons comment il procède, sans pour autant entrer dans les détails de ces arguments, dans le but de situer le cadre de la discussion générale concernant l'existence du vide. Concernant le second principe de la théorie d'Aristote, examinons le premier argument que Galilée offre contre l'effet de la résistance du milieu selon Aristote :

SIMP. En réalité Aristote ne se sert pas de ce [premier] principe [pour argumenter en faveur de l'impossibilité du vide], mais de l'autre, qui, je crois, ne soulève pas ces difficultés.

SALV. Cet autre n'est pas moins faux que le premier; et je m'étonne que vous n'en découvriez pas l'erreur par vous-même, en comprenant que si dans des milieux de densités et de résistances différentes, tels que l'eau et l'air par exemple, le même mobile se mouvait vraiment dans l'air avec une vitesse qui aurait avec sa vitesse dans l'eau même proportion que la densité de l'eau avec celle de l'air, alors il s'ensuivrait que tout mobile descendant dans l'air devrait aussi descendre dans l'eau; ce qui est faux puisque de très nombreux corps descendent dans l'air qui non seulement ne descendent pas dans l'eau, mais se dirigent vers le haut.

Une discussion entre Salviati et Simplicio suit pour convaincre ce dernier de la fausseté du second principe et Galilée utilise les mêmes arguments que dans le *De Motu* contre ce second principe. Ayant montré la fausseté des deux principes de la théorie d'Aristote - et donc réfuté son argument contre la possibilité du vide qui se basait sur ces deux principes - Galilée argumente à présent en faveur de sa théorie générale établissant l'égalité des vitesses de chute de *tous* les corps dans le *vide*.

On a déjà vu comment au moyen de son expérience de pensée, Galilée rejette le poids absolu comme cause de la différence des vitesses de chute de différents mobiles. En négligeant les autres facteurs qui peuvent influencer la vitesse de chute, Galilée affirme, en se précipitant un peu, que la

vitesse de chute de mobiles de même matière doit être identique : Rappelons que dans 2.2.3 nous avons souligné la conclusion suivante de Galilée, énoncée par Salviati : « SALV. [...] Nous en concluons donc que les mobiles grands et petits, et possédant même poids spécifique [de même matière], se meuvent avec une même vitesse. » C'est la conclusion qui sera reprise partiellement (en ignorant la mention « de même matière ») dans la plupart de la littérature et notamment par Brown, afin de soutenir que l'expérience de pensée de Galilée nous révèle et justifie à elle seule la loi générale de l'égalité de la chute de *tous* les mobiles dans le *vide*.

Cela dit, Galilée va en fait utiliser cette égalité supposée dans le vide pour les mobiles de même matière, dans le but d'extrapoler sa théorie générale : .

SAGR. [...]. Puisque vous avez démontré avec beaucoup de netteté combien il est faux que des corps inégalement pesants se meuvent dans le même milieu avec des vitesses proportionnelles à leurs propres poids, mais qu'au contraire ces vitesses sont égales, s'agissant de graves de *même matière* ou, en vérité, de même poids spécifique, mais non (comme je le crois) de poids spécifiques différents (car vous ne voulez pas dire, je pense, qu'une boule de liège tombe aussi vite qu'une boule de plomb) ; et puisque vous avez en outre prouvé très clairement combien il est erroné que le même mobile dans des milieux de résistances différentes ait des vitesses inversement proportionnelles à ces résistances, j'aimerais infiniment savoir *quelles proportions sont observées dans l'un et l'autre cas*.

SALV. *Ce sont de belles questions auxquelles j'ai souvent réfléchi*; je vous dirai donc mon raisonnement, et ce que j'en ai *finale*ment conclu. Après m'être assuré qu'il est faux que le même mobile dans des milieux de résistances différentes ait des vitesses inversement proportionnelles à ces résistances; et que pas davantage des mobiles de gravités différentes n'ont dans le même milieu des vitesses proportionnelles à leurs gravités respectives (ce que j'entends aussi pour des corps ayant des poids spécifiques différents), je commençai à combiner ces deux facteurs et à rechercher ce qui arrivait à des mobiles de gravités différentes placés dans des milieux de résistances différentes; je m'aperçus alors que les écarts de vitesse étaient beaucoup plus grands dans les milieux plus résistants que dans les milieux plus aisés à pénétrer, et cela au point que deux mobiles peuvent descendre dans l'air avec des vitesses très peu différentes, alors que dans l'eau l'un se mouvra dix fois plus vite que l'autre; ainsi tel corps qui tombe rapidement dans l'air, non seulement ne descendra pas dans l'eau, mais restera parfaitement immobile, ou remontera même à la surface; car on peut trouver, dans certaines espèces de bois, des nœuds ou des racines qui demeureront au repos dans l'eau, et tomberont dans l'air avec rapidité. [p. 113]

[...]

SALV. [...] Nous avons donc vu que l'écart des vitesses entre mobiles de poids spéci-

fiques différents augmente avec la densité des milieux; davantage : dans le vif argent l'or non seulement tombe vers le fond plus rapidement que le plomb, mais il est le seul à descendre, tous les autres corps, métaux et pierres, montant vers la surface pour y flotter, alors que dans l'air des boules d'or, de plomb, de cuivre, de porphyre, ou de toute autre substance, auront des vitesses si voisines qu'une boule d'or, après une chute de cent coudées, ne précédera pas de quatre doigts une boule de cuivre; c'est alors, *considérant ces faits, qu'il me vint à l'esprit que si l'on supprimait totalement la résistance du milieu, tous les corps descendraient avec la même vitesse* [p. 117]

Galilée nous dit qu'il a finalement conclu suite à *une longue réflexion* que « *si l'on supprimait totalement la résistance du milieu, tous les corps descendraient avec la même vitesse.* » C'est l'argument de passage à la limite, en suivant la terminologie de Koyré, que l'on a mentionné dans 2.2. Galilée se fonde clairement sur des observations empiriques du comportement de différents mobiles dans différents milieux. Ils sont en effet semi-empiriques car les valeurs données ne reflètent pas des mesures d'expériences réelles mais des valeurs hypothétiques. Ces valeurs reflètent néanmoins la différence de comportement des mobiles de poids spécifiques différents dans des milieux différents.

Mais cet argument de passage à la limite est compatible avec la théorie restreinte : rien ne nous dit qu'à la limite, et donc dans le vide, cette différence sera nulle et non pas seulement *petite* (cf. Figure 5.2).

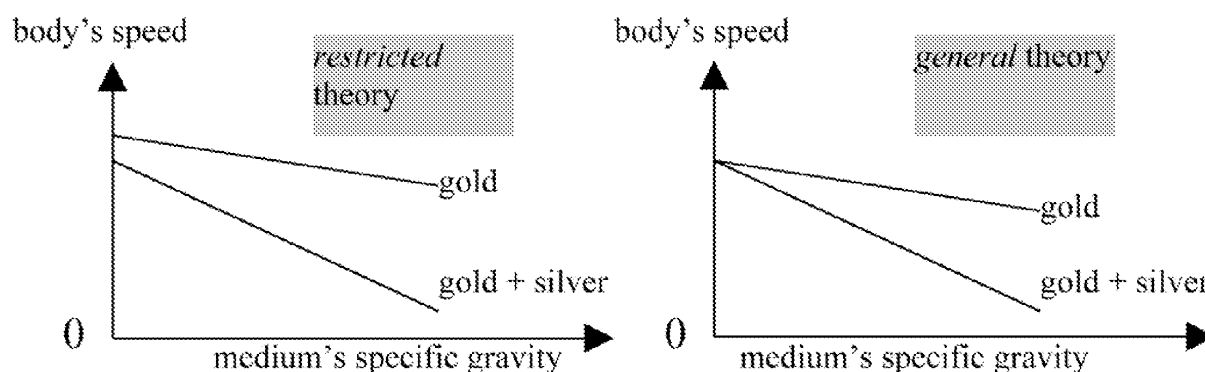


Figure 5.2 Les deux théories de vitesse de chute de Galilée (Palmieri 2005a)

Comme le montre la Figure 5.2, les deux théories de Galilée prédisent une divergence de vitesse de chute des mobiles de différentes matière dans le plein. Cette divergence augmente aussi avec la résistance du milieu. Mais dans le vide, les deux théories donnent deux prédictions différentes :

Dans la figure de gauche, avec la théorie restreinte, on voit bien que si la résistance du milieu tend vers le vide, on aura toujours une différence de la vitesse de chute des mobiles de différentes matières. Tandis que dans la figure de droite, avec la théorie générale, la vitesse sera identique.

Cet argument de passage à la limite est donc tout aussi compatible avec la théorie restreinte et ne peut à lui seul nous révéler ou justifier la théorie générale. En fait, rien ne nous dit, suite à cet argument de passage à la limite, que dans le vide les mobiles de matières différentes chutent avec la même vitesse : L'écart entre les vitesses de deux mobiles de matières différentes peut converger avec la rareté du milieu sans pour autant devenir zéro à la limite, dans le vide. On peut dire alors qu'on a une indétermination du choix théorique suite à cet argument de passage à la limite. Cette indétermination sera résolue par Galilée avec une étape supplémentaire dans son schéma argumentatif, qui lui permettra de justifier sa théorie générale et de faire un choix théorique.

En fait, Galilée souligne la difficulté de cette extrapolation dans les *Apostilles*, quelques années auparavant. Selon Palmieri, « Galilée nous dit Spuntar lo scoglio piu`duro (surmonter l'obstacle le plus difficile). Ce qui, selon ses propres termes, l'a convaincu en fin de compte que tous les corps dans le vide chutent à la même vitesse (toujours croissante, cependant, comme le carré du temps) ne sont que des conjectures [...]

Ma conjecture s'est fondée sur un certain effet, qu'on peut observer, concernant la vitesse de mobiles de gravité différente dans les milieux fluides. Les vitesses deviennent de plus en plus différentes selon que les milieux deviennent de plus lourds en plus lourds. Seul l'or, la matière la plus lourde que nous connaissions, descend dans le mercure, dans lequel tous les autres métaux flottent. Il est clair qu'on peut faire un mixte d'or et d'argent tel qu'il descendra au sein du mercure très lentement. Ainsi l'or coulerait d'un 'braccio' au sein du mercure en, disons, un battement de pouls, tandis que le corps mixte ne demanderait pas moins de 50 ou 100 battements. Si nous laissons les corps tomber au fond de quatre 'braccia' d'eau, l'or pur ne précédera pas le corps mixte d'un dixième du temps nécessaire pour ce dernier. Mais dans l'air, d'une hauteur de 100 'braccia', aucune différence dans le temps de chute ne serait discernable. »¹⁷¹

C'est exactement le même argument de passage à la limite que dans les *Discours*. À présent, et comme dans les *Apostilles* (cf. Palmieri 2005a pp. 234-236), Galilée expose les arguments, et va

¹⁷¹ "overcoming the hardest obstacle). What, in his words, ultimately convinced him that all bodies in a vacuum fall with the same speed (always increasing as the square of time, however) are no more than conjectures[...] My conjecture was founded on a certain effect that can be observed concerning speeds of mobiles of different gravity in fluid media. Speeds become more and more different according as the media become heavier and heavier. Only gold, the heaviest matter known to us, descends within quicksilver, in which all other metals float. It is clear that a mixed body of gold and silver can be made so that it will descend within mercury very slowly. Thus gold would sink one braccio within mercury in, say, one pulse beat, whereas the mixed body would take no less than 50 or 100 beats. If we let the bodies fall to the bottom of four braccia of water, pure gold will not precede the mixed body one tenth of the time required of the latter. But in air, from a height of 100 braccia, no difference in time of fall would be discernible" Traduit par l'auteur, Galilée cité dans Palmieri 2005a, *Op.cit.* pp. 232- 233

même avoir recours à des expériences réelles sur les pendules, pour pouvoir enfin passer de cette conjecture, obtenue à partir de l'argument de passage à la limite, à une justification de sa théorie générale. Et donc va lui permettre de faire un choix théorique entre sa théorie restreinte et sa théorie générale. Galilée va donc pouvoir enfin « franchir » cet obstacle, quarante ans après la première introduction de l'expérience de pensée, avec une stratégie argumentative assez complexe et certainement pas avec l'expérience de pensée à elle seule. Voyons comment il va procéder.

5.3.1.1 Poids spécifique et résistance du milieu

Galilée explique d'abord les effets du poids spécifique et de la résistance du milieu sur la vitesse de chute des mobiles dans le plein. Il affirme que l'argument de passage à la limite n'est pas suffisant pour justifier sa théorie générale :

SIMP . Voilà une bien grande affirmation, seigneur Salviati. Je ne croirai jamais, pour ma part, que même dans le vide, si le mouvement y était possible, un flocon de laine tomberait aussi vite qu'un morceau de plomb.

SALV. Doucement, seigneur Simplicio; votre difficulté n'est pas à ce point inattendue, ni mon imprudence telle, qu'il faille croire qu'elle m'ait échappée et que je ne lui aie donc pas trouvé de réponse [c'est une réponse qui a lui a pris quatre décennies]. *Aussi écoutez le raisonnement qui me justifiera et vous éclairera.* Nous nous proposons de rechercher ce qui arriverait à des mobiles de poids très différents dans un milieu dont la résistance serait nulle, c'est-à-dire tel que l'inégalité constatée entre les vitesses des mobiles devrait être rapportée tout entière à l'inégalité des poids [à comprendre spécifiques] ; seul un espace absolument vide d'air et de tout autre corps, si ténu et si aisé à pénétrer soit-il, pourrait nous rendre perceptible ce que nous voulons découvrir : *comme un tel espace ne nous est pas donné*, nous observerons ce qui se produit dans les milieux plus subtils et moins résistants par comparaison avec les milieux moins subtils et plus résistants; et si nous trouvons qu'effectivement des mobiles de poids spécifiques variables ont des vitesses de moins en moins différentes selon que les milieux sont de plus en plus aisés à pénétrer, qu'en fin de compte dans le milieu le plus ténu bien que non vide, et pour des poids biens inégaux, l'écart des vitesses est très petit et presque insensible, alors nous pourrions admettre, me semble-t-il, *avec une très grande probabilité, que dans le vide les vitesses seraient toutes égales.*

Galilée affirme ici que l'argument de passage à la limite ne permet pas de conclure que la vitesse doit être identique si on supprimait le milieu, mais qu'on peut conclure *avec une très grande probabilité* cette égalité de vitesse dans le vide. Pour s'assurer que cette égalité peut être obtenue,

Galilée compare la chute de mobiles de haute altitude par rapport à la chute de ces mobiles d'une petite altitude. Salviati continue ainsi son raisonnement :

Considérons en ce sens ce qui se passe dans l'air, et pour avoir un corps à la surface bien définie et de matière très légère, prenons une vessie gonflée ; [...] son poids se réduit à celui peu important de l'enveloppe, - à peine la millième partie de ce que pèserait une masse de plomb de même dimension que la vessie gonflée. Or si on les laissait tomber toutes deux, seigneur Simplicio, d'une hauteur de quatre ou six coudées, de combien, à votre avis, le plomb précéderait-il la vessie dans sa chute? Soyez certain qu'il ne la précéderait pas d'une distance triple ni même double, même si vous rendiez le mouvement mille fois plus rapide.

SIMP. Il se pourrait qu'il en aille comme vous le dites, au début du mouvement, c'est-à-dire pendant les premières quatre ou six coudées : mais au bout d'un long moment, je crois que le plomb aurait gagné sur la vessie non seulement six des douze parties de la distance, mais bien huit ou dix.

SALV. Je le crois aussi et je ne doute pas que sur des distances très grandes, le plomb pourrait franchir cent milles avant que la vessie en ait franchi un seul; *cette constatation que vous opposez à ma proposition, seigneur Simplicio, va la confirmer intégralement*. Mon intention, je le répète, est de montrer que les variations de vitesse qu'on observe entre mobiles de poids spécifiques différents *n'ont pas pour cause ces poids spécifiques*¹⁷² [et donc réfute sa théorie restreinte], mais dépendent de facteurs extérieurs, *et notamment de la résistance du milieu*, en sorte que celle-ci supprimée tous tomberaient avec les mêmes degrés de vitesse; *et je le déduis avant tout de ce fait* que vous même acceptez, et qui est tout à fait vrai, que les vitesses de mobiles très différents par le poids différent elles-mêmes d'autant plus que les espaces traversés par ces mobiles sont de plus en plus grands, ce qu'on ne saurait mettre au compte des différences de gravité. *Car celles-ci demeurant constamment identiques, la proportion entre les espaces traversés devrait être toujours la même, alors que nous la voyons croître sans cesse avec la continuation du mouvement; pour une chute d'une coudée*, en effet, un mobile très lourd ne précédera pas un mobile très léger de la dixième partie de cette distance, mais sur douze coudées il le précédera du tiers, et sur cent coudées des 90/100, etc.
(C'est nous qui soulignons p. [118])

C'est l'un des passages les plus importants de la stratégie argumentative de Galilée ; il lui permet de « confirmer intégralement » sa théorie générale. Comme le poids spécifique des mobiles reste le

¹⁷² Koyré dans son analyse de Galilée souligne que ce dernier n'utilise pas le terme « poids spécifique » mais que le sens est là : « Galilée ne dit pas : poids spécifiques, ainsi que M. M. Crew et Salvio, dans leur traduction des *Discorsi* (Dialogues Concerning Two New Sciences by Galileo Galilei, translated from the Italian and Latin into English by M. Crew and A. de Salvio, Evanston and Chicago, 1939), le lui font dire, mais le sens est clair. Koyré 1960, *Op.cit.* p. 221, note de bas de page (1).

même, si la vitesse est causée par ce poids spécifique, alors la différence entre les vitesses des deux mobiles, dans une chute de petite altitude et une chute de grande altitude, doit rester constante.

Le fait que cette différence de vitesse varie avec l'altitude de chute indique que la différence de la vitesse est due au milieu et non pas au poids spécifique du mobile de sorte que si l'on supprime le milieu, tous les mobiles chutent avec la même vitesse. Ce sont ces observations qui permettent à Galilée de défendre sa théorie générale ; dans le vide on n'a pas de différence de vitesse proportionnelle au poids spécifique comme dans le *De Motu*. La différence qu'on observe dans le plein n'est pas causée par la différence du poids spécifique, vu que cette différence varie avec l'altitude de la chute. Elle est due à des « facteurs extérieurs, et notamment [à] la résistance du milieu ».

Mais comme le milieu ne change pas non plus, pourquoi serait-il responsable de cette divergence des vitesses ? Galilée explique pourquoi l'effet de la résistance varie avec la distance de chute. Il fait soulever à Simplicio l'objection suivante, qui donne à Salviati l'opportunité d'expliquer pourquoi l'effet de la résistance varie avec la distance et d'expliquer le rôle du milieu et du poids spécifique dans la détermination de la vitesse de chute dans le plein :

SIMP. Fort bien; mais d'après le même raisonnement, si la différence de poids pour des mobiles de poids spécifiques variables, ne peut provoquer de changement dans le rapport des vitesses, puisque ces poids restent les mêmes, le milieu, qui de son côté est supposé demeurer constant, ne pourra pas davantage altérer la proportion des vitesses.

Une cause constante produira un effet constant ! Le rapport des vitesses doit rester constant tout au long de la chute, même de haute altitude, vu que le milieu ne change pas de nature et donc sa résistance doit rester constante. Remarquons que c'est aussi le raisonnement du jeune Galilée dans le *De Motu*. Mais la résistance du milieu chez le Galilée des *Discours* est variable :

SALV. Votre objection est pénétrante, et je dois la résoudre. Je dis donc qu'un corps pesant possède par nature un principe intrinsèque pour se mouvoir vers le centre commun des graves, c'est-à-dire de notre globe terrestre, d'un mouvement continuellement et toujours également accéléré, c'est-à-dire qu'en des temps égaux viennent s'ajouter des moments et degrés égaux de vitesse (*momenti e gradi di velocità*). Du moins doit-on comprendre qu'il en va bien ainsi chaque fois qu'auront été écartés tous les obstacles accidentels et extérieurs; or il en est un que nous ne pouvons pénétrer et rejeter de côté : si fluide, si ténu et si tranquille que soit le milieu, *il s'oppose en effet au mouvement qui le traverse avec une résistance dont la grandeur dépend directement de la rapidité avec laquelle il*

doit s'ouvrir pour céder le passage au mobile; et comme celui-ci par nature va en accélérant continuellement, ainsi que je l'ai dit, il rencontre de la part du milieu une résistance sans cesse croissante, d'où résulte un ralentissement et une diminution dans l'acquisition de nouveaux degrés de vitesse, si bien qu'en fin de compte la vitesse d'une part, la résistance du milieu de l'autre, atteignent à une grandeur où, s'équilibrant l'une l'autre, toute accélération est empêchée, et le mobile réduit à un mouvement régulier et uniforme qu'il conserve constamment par la suite [il atteint sa vitesse terminale]. Il y a donc accroissement dans la résistance du milieu, non parce que son essence changerait, mais parce qu'il y a variation dans la vitesse avec laquelle il doit s'ouvrir et s'écarter pour laisser le passage à un mobile dont le mouvement est continuellement accéléré.
 (C'est nous qui soulignons, p. [118])

La résistance du même milieu croît avec l'accroissement de la vitesse « *Il y a donc accroissement dans la résistance du milieu* » ; ce milieu, ou plutôt ses parties doivent céder le passage pour laisser passer le mobile en chute libre. Vu que le mobile est constamment accéléré, le milieu doit céder de plus en plus vite et donc la résistance devient de plus en plus importante dans une chute de longue distance, jusqu'à ce qu'elle annule l'accélération du mobile et ce dernier tombera avec une vitesse constante. On dit alors que le mobile a atteint sa vitesse terminale. Ainsi, *une cause constante peut produire un effet variable*¹⁷³ ; c'est la résistance du milieu qui cause une divergence entre les vitesses des mobiles de matières différentes.

Après cette explication de l'accroissement de la résistance du milieu, Galilée explique pourquoi dans le plein on a une différence de vitesse pour les corps de différentes matières. Comme dans le *De Motu*, Galilée explique que le milieu diminue le poids spécifique du mobile. Plus le poids spécifique du mobile, comparé à celui du milieu, est grand, plus il peut aisément pousser cette résistance du milieu ; plus il est petit et plus le milieu offre une résistance. Le poids spécifique est alors l'*instrument* utilisé par le mobile pour se frayer un passage dans un milieu résistant, *chose inconnue dans le vide*. Ainsi, quand est supprimée la résistance du milieu, l'avantage obtenu par le mobile léger est beaucoup plus grand que celui obtenu par le corps lourd, et leur vitesse devient égale et continuellement accélérée :

« Remarquant alors que si l'air offre une très grande résistance au léger moment (al poco momento) de la vessie, il ne s'oppose que très faiblement au poids du plomb, je tiens pour certain que *l'avantage résultant de sa suppression totale serait si important pour la vessie, mais si petit pour le plomb, que leurs vitesses deviendraient égales.*

¹⁷³ Ce point est aussi soulevé par Koyré 1960, p. 215.

Si nous prenons donc comme principe que tous les corps tomberaient également vite dans un milieu où ne se manifesterait aucune résistance à la vitesse du mouvement, *que la cause en soit ou non le vide, nous serons en mesure de déterminer correctement les proportions des vitesses de mobiles semblables ou dissemblables soit dans le même milieu, soit dans différents milieux pleins, et pour cela résistants*; il nous faudra dans ce but porter attention à la quantité dont la gravité du milieu diminue la gravité du mobile *qui est comme l'instrument avec lequel celui-ci ouvre sa route en repoussant de côté les parties du milieu (chose inconnue dans le vide où, pour cette raison, les différences de poids demeurent sans effet)*; [Dans ces deux phrases on trouve l'analogie et la différence avec le traitement de la chute libre dans le *De Motu*] et comme il est manifeste que la gravité d'un corps est diminuée dans un milieu donné d'une quantité égale au poids d'un même volume de ce milieu, nous obtiendrons le résultat cherché *en réduisant dans la même proportion les vitesses des mobiles* qui dans un milieu non résistant (ainsi qu'on l'a supposé) seraient égales. [...]

« *Et je crois qu'en nous fondant sur cette règle, l'expérience s'accordera bien mieux avec nos calculs qu'avec ceux d'Aristote.* » [119-121]

On ajoutera que l'expérience s'accordera mieux qu'avec ceux de sa théorie restreinte. Comme on a vu, dans le *De Motu*, Galilée explicite la non-concordance de l'expérience avec sa théorie restreinte, sans pour autant la rejeter. Dans les *Discours*, les rôles du poids spécifique du mobile et du milieu sont différents du rôle qu'ils ont dans le *De Motu*. On se rappellera que son extrapolation dans le *De Motu* se fonde sur l'analyse suivante du rôle de la résistance : elle enlève du poids au mobile. Donc dans le vide, vu qu'il n'y a pas de résistance, aucun poids n'est enlevé et la vitesse est proportionnelle au poids spécifique du mobile. Dans les *Discours*, le rôle du poids spécifique dans le plein est différent ; certes le poids du mobile est amoindri par le milieu, mais c'est aussi l'*instrument* qu'a le mobile pour pousser la résistance du milieu, « *chose inconnue dans le vide où, pour cette raison, les différences de poids demeurent sans effet* ».

Dans sa théorie restreinte, Galilée avait conclu que la vitesse de chute des corps de matières différentes est proportionnelle au poids spécifique des mobiles dans le vide. Il utilisait la règle implicite $V \sim P_c - P_m$. Dans les *Discours*, l'interaction entre la résistance du milieu et le poids spécifique du mobile est la clé pour comprendre la vitesse de chute dans le plein. En partant de la supposition de l'égalité de la vitesse de chute de tous les corps dans le vide, Galilée peut calculer la vitesse de chute des corps dans le plein dans toutes les situations. Il utilise une règle implicite qui relie la vitesse de chute d'un mobile dans un milieu à sa vitesse dans le vide, à son poids spécifique et à la résistance du milieu : $v = v_0 [p(\text{corps}) - p(\text{milieu})]/p(\text{corps})$ ¹⁷⁴ (p est le poids spécifique, v_0

¹⁷⁴ cf. Van Dyck et Koyré pour une analyse similaire.

vitesse dans le vide et v vitesse dans le plein). On a alors une vitesse identique $v = v_0$ pour tous les corps dans le vide. Dans un milieu donné, plus le poids spécifique des mobiles diffère, plus leur vitesse diffère de leur vitesse dans le vide. Ainsi dans le même milieu, si le mobile 1 a un poids spécifique de 10 et le mobile 2 a un poids spécifique de 100 ; leurs vitesses dans un milieu de poids spécifique 5 sera :

$$v_1 = v_0 (10 - 5)/10 = 0,5 v_0$$

$$v_2 = v_0 (100 - 5)/100 = 0,95 v_0$$

Dans l'air où $p(\text{milieu})$ est minime :

$$v_1 = v_0 (10 - 1)/10 = 0,9 v_0$$

$$v_2 = v_0 (100 - 1)/100 = 0,99 v_0$$

Ainsi, si v_2 est la vitesse d'un oeuf en marbre et v_1 est la vitesse d'un oeuf de poule, exemple que Galilée va aborder pour réfuter le second principe (*cf.* 5.4.1), ces deux mobiles, 1 et 2, vont chuter avec une vitesse presque identique dans l'air ($p(\text{milieu}) = 1$ par exemple on aura $v_1 = 0,9 v_0$ et $v_2 = 0,99 v_0$) mais avec une vitesse presque doublée dans l'eau ($p(\text{milieu}) = 5$ par exemple on aura $v_1 = 0,5 v_0$ et $v_2 = 0,95 v_0$).

Enfin, la différence de vitesse pour le même mobile 2 de poids spécifique 100 dans deux différents milieux de poids spécifique 5 et 50, sera aussi presque doublée :

$$v_2 = v_0 (100 - 5)/100 = 0.95 v_0$$

$$v_2 = v_0 (100 - 50)/100 = 0.5 v_0$$

5.3.1.2 Expériences réelles avec des pendules

Pour montrer que le poids spécifique ne joue aucun rôle dans la détermination de la vitesse de chute dans le vide, Galilée revient sur les expériences dont il parlait auparavant de chute de mobiles d'une petite et d'une haute altitude et qui lui ont permis d'argumenter que la résistance du milieu croît avec la distance. Mais les observations fondées sur ces expériences de chute de mobiles d'une petite altitude s'avèrent difficilement réalisables. Pour rendre observable la différence des vitesses sur une petite distance dans le plein, Galilée fait des expériences sur des plans inclinés, et pour se débarrasser de l'effet du frottement, il fait des expériences avec des pendules :

SALV. L'expérience qui consiste à prendre deux mobiles de poids aussi différents que possible et à les lâcher d'une hauteur donnée pour observer si leurs vitesses sont égales, *offre quelques difficultés*; car si la hauteur est importante, le milieu que le corps, en tombant, doit ouvrir et repousser latéralement par son impeto, gênera beaucoup plus le faible moment (momento) du mobile le plus léger que la force considérable (violenza) du plus lourd, et sur

une longue distance le corps léger demeurera ainsi en arrière; *si en revanche la hauteur est brève, on doutera qu'il y ait quelque différence, ou, si elle existe, elle sera imperceptible.* J'ai donc pensé qu'on pourrait répéter plusieurs fois une courte descente et du même coup accumuler un nombre assez grand de ces brefs intervalles de temps qui s'intercalent entre l'arrivée du corps lourd et du corps léger, pour que pris ensemble ils constituent un temps *non seulement observable, mais aisément observable.* [...]

[J]'ai pris deux boules, l'une de plomb et l'autre de liège, celle-là au moins cent fois plus lourde que celle-ci, puis j'ai attaché chacune à' elles à deux fils très fins, longs tous deux de quatre ou cinq coudées; les écartant alors de la position perpendiculaire, je les lâchais en même temps, et celles-ci, suivant les circonférences des cercles ayant les fils égaux pour rayons, dépassaient la perpendiculaire pour remonter de l'autre côté, par la même voie; une bonne centaine d'allées et venues, accomplies par les boules elles-mêmes, m'ont clairement montré qu'entre la période du corps pesant, et celle du corps léger, la coïncidence est telle que sur mille vibrations comme sur cent, le premier n'acquiert sur le second aucune avance, fût-ce la plus minime, mais que tous deux ont un rythme de mouvement rigoureusement identique. On observe également la réaction du milieu qui, en gênant le mouvement, ralentit bien davantage les vibrations du liège que celles du plomb, sans toutefois modifier leur fréquence; même si les arcs décrits par le liège n'ont plus que cinq ou six degrés, contre cinquante ou soixante pour le plomb, ils sont en effet traversés en des temps égaux.

SALV. [...] *Mais si les mêmes mobiles passent en des temps égaux des arcs égaux, on pourra dire alors certainement que leurs vitesses sont égales.*
[128-130]

Les expériences avec les pendules sont pour Galilée, et contrairement aux expériences de chute sur de courtes distances, « *non seulement observables, mais aisément observables* ». Galilée substitue ainsi aux observations irréalisables à son époque des observations qui montrent que deux boules de matières différentes restent isochrones et que le ralentissement de la boule plus légère est plus grand (leur amplitude diminue disproportionnellement). L'isochronisme montre que la vitesse des deux boules est identique, *car ces deux boules traversent des arcs identiques en des temps identiques.* La différence de matière n'est pas responsable d'une quelconque différence de vitesse sur des arcs identiques, mais elle a un autre effet, celui du retardement. La différence dans le retardement due à la résistance du milieu et au poids spécifique du corps montre l'effet de la résistance sur les mobiles de matières différentes ; il oppose plus de résistance au mobile léger qu'au lourd. C'est en faisant ces expériences sur les pendules que Galilée montre que le poids spécifique ne cause pas de différence de vitesse dans le vide et justifie enfin sa théorie générale.

5.3.2 Conclusion

Cette analyse historique nous montre que la théorie générale de la vitesse de chute de Galilée est établie à partir d'une série d'arguments et d'expériences réelles pour arriver à justifier sa conjecture, qu'on obtient suite à l'argument de passage à la limite. Mais cette conjecture reste une conjecture car l'argument de passage à la limite peut très bien nous amener à la théorie restreinte et non pas à la théorie générale. Galilée a besoin d'analyser les chutes sur de courtes distances, ou, par analogie, les données d'expériences réelles avec des pendules, pour montrer que la vitesse de chute ne dépend pas non plus du poids spécifique.

La fonction de l'expérience de pensée dans cette stratégie argumentative s'avère *uniquement réfutatoire*. Quelles leçons tirer de cette analyse historique concernant le débat entre Norton et Brown du chapitre 4 et de leurs analyses anhistoriques de la tour de Pise ? On défendra dans 5.4 que l'analyse de Norton de la notion de particulier et surtout de leur rôle dans l'EP-argument et leur élimination réduit considérablement leur rôle dans l'expérience de pensée. On soutiendra dans 5.5 que l'approche de Brown se trouve considérablement affaiblie ; son exemple canonique est en fait mal interprété lorsqu'on lui accorde une fonction platonicienne. L'expérience de pensée de la tour de Pise n'a pas révélé, et ne peut pas révéler à elle seule, la théorie générale de l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps dans le *vide*.

5.4 Le rôle des particuliers dans la tour de Pise

L'approche de Norton (*cf.* 4.4) réduit les expériences de pensée en argument logique de nature déductive ou inductive, c'est qu'on a appelé les EP-arguments. Une expérience de pensée est alors reconstruite en un EP-argument, de nature déductive ou inductive, qui satisfait les deux conditions suivantes :

« *Les expériences de pensée sont des arguments qui :*

- (i) *postulent des situations ('states of affairs') hypothétiques ou contrefactuelles, et*
- (ii) *invoquent des particuliers non pertinents à la généralité de la conclusion ».*

Dans cette section, nous examinerons de près la condition (ii), notamment en présence de la thèse d'élimination de Norton, qui affirme que ces particuliers sont potentiellement éliminables d'un argument qui remplacera l'expérience de pensée ou l'EP-argument, comme l'argument proposé par Gendler par exemple.

Le sens du terme « particulier » dans l'approche de Norton se comprend uniquement vis-à-vis de son approche : une expérience de pensée particulière se réduit à un argument déductif dont

les particuliers ne figurent plus dans sa conclusion générale. C'est-à-dire un EP-argument de « Type 1: La conclusion sans particuliers suit d'une façon déductive des prémisses. Les expériences de pensée de ce type sont généralement des arguments de *réduction à l'absurde*. Les particuliers pourraient être impliqués dans un contre-exemple à une assertion universelle quantifiée et suite à sa contradiction la conclusion suit [...] »

Pour analyser le rôle de ces particuliers dans cette expérience de pensée, plaçons-nous dans la perspective de Norton et regardons le rôle des particuliers dans l'EP-argument de réduction de Norton. On pourra alors l'écrire :

- I. Supposition pour la preuve par *réduction à l'absurde* [le premier principe de la théorie d'Aristote] : la vitesse de la chute des corps [de toutes les matières et donc en particulier ceux de matière identique] dans un milieu donné est proportionnelle à leurs poids [absolu].
- II. De I: si une grosse pierre tombe avec 8 degrés de vitesse, une plus petite pierre [de la même matière] avec la moitié de son poids va tomber avec 4 degrés de vitesse.
- III. Hypothèse: si une pierre tombant plus lentement est connectée à une pierre tombant plus rapidement, la plus lente retardera la plus rapide et la plus rapide accélérera la plus lente.
- IV. De III: si les deux pierres de II sont attachées, leur composé va tomber plus lentement que 8 degrés de vitesse.
- V. Hypothèse: le composé de deux corps [de la même matière] a plus de poids [absolu] que le plus grand.
- VI. De I et V: le composé va tomber plus vite que 8 degrés.
- VII. Contradiction entre les conclusions IV et VI.
- VIII. Par conséquent, nous devons rejeter l'hypothèse I. [le premier principe de la théorie d'Aristote : la vitesse de la chute des corps, de toutes les matières, dans un milieu donné n'est pas proportionnelle à leurs poids absolu].
- IX. Par conséquent, toutes les pierres [*de même matière*] tombent [presque] avec la même vitesse [dans le plein, l'air]

La conclusion VIII ainsi que la conclusion IX s'infèrent seulement des particuliers de même matière et, ajoutera-t-on, de forme telle qu'on peut négliger son influence sur la vitesse de chute. En fait, la forme affecte la vitesse de chute et la conclusion IX ne suit pas dans la nature, c'est-à-dire dans un milieu plein. Comme on l'a vu, Galilée mentionne explicitement l'effet de la forme du mobile : dans l'air, une feuille d'or tombe plus lentement qu'un lingot d'or. C'est le sens de la supposition 8a

de Norton : la vitesse de chute des corps dépend *uniquement* de leur poids. Mais qu'en est-il de l'effet de la résistance du milieu sur les surfaces de ces deux mobiles ?

5.4.1 L'effet de la résistance du milieu sur les différentes surfaces des mobiles

Galilée, à la fin de son argumentation, va répondre à cette dernière question et analyser le rôle d'une nouvelle variable qui est passée sous silence dans l'expérience de pensée. Il aborde enfin l'effet de la résistance du milieu sur les différentes surfaces des mobiles de même matière, en chute libre dans le plein. Galilée montre pourquoi dans le plein, un mobile plus lourd dépasse de peu un mobile léger. D'où la mention de [presque] dans IX ci-dessus. Cette mention est bien sûr directement liée à la mention [dans le plein, l'air] ; si on idéalise la résistance du milieu, et si donc on supprime cette mention, alors on doit supprimer le [presque]. Rappelons que Salviati répond à Simplicio « *Or, derrière ces deux doigts vous voudriez cacher les quatre-vingt-dix-neuf coudées d'Aristote* » (cf. 2.2.3). Ce faisant, il justifie l'idéalisation de ce facteur dans son expérience de pensée :

SALV. L'action par laquelle le milieu retarde davantage les mobiles dont le poids spécifique est plus petit a déjà été expliquée, et nous avons montré qu'elle consiste dans une diminution de poids; pour expliquer cependant que le même milieu puisse altérer aussi fortement les vitesses de mobiles identiques par la matière et la forme, *et différents seulement par la taille, il faut un raisonnement plus subtil* que pour comprendre seulement comment une surface plus considérable ou un mouvement contraire du milieu ralentissent la vitesse d'un corps. Quant à moi *je ne vois au présent effet d'autre raison* que ces aspérités et ces creux que l'on trouve ordinairement, et de façon presque nécessaire, à la surface des corps solides, et qui, au cours du mouvement, frappent l'air ou le milieu quel qu'il soit: ce dont nous avons la preuve avec le bruissement que font entendre même les corps les plus arrondis s'ils se déplacent rapidement dans l'air [...]. On ne peut donc pas douter qu'en heurtant le milieu, au cours de la chute, ces aspérités diminueront la vitesse des solides, et cela *d'autant plus que la surface sera plus importante, ce qui est le cas des solides plus petits comparés aux plus grands.* (C'est nous qui soulignons, p. [132])

Ayant rejeté le poids absolu comme cause de la divergence des vitesses de chute des mobiles de même matière au moyen de son expérience de pensée, Galilée se livre à ce raisonnement « plus subtil » pour expliquer pourquoi dans la nature, et donc dans le plein, on remarque une divergence de la vitesse de chute entre deux corps de même matière qui se différencient uniquement par leur taille, et donc leur poids absolu : un boulet de canon et une balle de mousquet par exemple. Galilée conclut que c'est le rapport du poids absolu à la surface qui est responsable de la divergence qu'offre la résistance du milieu aux mobiles identiques selon tous leurs aspects sauf la dimension.

Et ce à cause des aspérités et creux sur ces surfaces. Galilée semble suggérer « Quant à moi *je ne vois au présent effet d'autre raison* que ces aspérités et ces creux que l'on trouve ordinairement ». Mais il ajoute « et de façon presque nécessaire », et donc on est plutôt enclin à voir Galilée comme idéalisant l'effet de la résistance du milieu et non pas l'effet de ces aspérités et creux, car il ne semble pas vraiment sûr que ce soit l'unique raison, et aussi parce qu'il pense que la présence de ces aspérités et creux est « nécessaire », inévitable.

Galilée termine son argumentation en expliquant à ses interlocuteurs pourquoi la surface du mobile plus petit est plus importante que celle du mobile plus grand :

SIMP. Arrêtez-vous s'il vous plaît, car je commence à me perdre. Si je comprends parfaitement, et si j'admets, que le frottement du milieu sur la surface du mobile ralentit le mouvement, et qu'il le ralentit davantage, *ceteris paribus*, là où la surface est plus grande, je ne comprends pas en revanche pour quelle raison vous appelez plus grande la surface des corps plus petits ; [...]

SALV. Je vais résoudre en même temps toutes vos difficultés. Vous admettez naturellement sans discussion, seigneur Simplicio, que si l'on prend deux corps égaux, identiques par la matière et par la forme (et pourvus ainsi de vitesses incontestablement égales), et que l'on diminue le poids de l'un dans la même proportion que sa surface (sans altérer la similitude de leur forme), aucune réduction de vitesse ne s'ensuivra.

SIMP. Il me semble que les choses devraient bien se passer ainsi, du moins selon votre doctrine qui enlève au poids toute influence sur l'accélération ou le ralentissement du mouvement.

SALV. Même cela je vous l'accorde, et j'accepte votre opinion, d'où il résulte, me semble-t-il, que si le poids venait à diminuer plus que la surface, il en découlerait pour le mobile un certain ralentissement; et cela d'autant plus que la diminution du poids serait proportionnellement plus importante que celle de la surface.

SIMP. À cela je n'ai aucune objection.

SALV. Sachez maintenant, seigneur Simplicio, *qu'il est impossible de diminuer dans le même rapport la surface et le poids d'un solide*, tout en lui conservant une forme semblable. S'il est vrai en effet qu'un solide en se réduisant diminue son poids proportionnellement à son volume, chaque fois que le volume diminuera plus vite que la surface (ce qui se produit si l'on conserve la même forme), le poids aussi diminuera plus vite que la surface. Mais la géométrie nous apprend que dans le cas de solides semblables le rapport des volumes est plus grand que le rapport des surfaces [...]. Vous

comprenez donc que la résistance engendrée par le contact entre la surface du mobile et le milieu croît beaucoup plus vite pour les corps plus petits que pour les corps plus grands [...] . Vous voyez bien, seigneur Simplicio, que je n'avais pas tort quand je vous disais, tout à l'heure, que la surface d'un solide plus petit est comparativement plus importante que celle d'un solide plus grand. »
(C'est nous qui soulignons pp. [133-134])

Cette analyse porte sur l'effet de la résistance du milieu sur les différentes surfaces des mobiles qui ne se différencient que par leurs poids absolus. Galilée montre ici pourquoi, dans le plein, les deux mobiles qu'il a considérés dans son expérience de pensée ne tombent pas avec la même vitesse. Comment doit-on alors comprendre l'expérience de pensée de la tour de Pise à l'issue de cette analyse de l'argument général de Galilée ?

5.4.2 L'idéalisation du milieu

Galilée, dans son expérience de pensée, part de l'hypothèse selon laquelle la chute des mobiles ne dépend que de leur poids absolu, et montre qu'on arrive alors à une absurdité. Il conclut qu'on est en mesure de réfuter le premier principe de la théorie d'Aristote, qui attribue au poids absolu une proportionnalité linéaire avec la vitesse de chute. Le but de Galilée dans cette expérience de pensée est de réfuter ce principe en montrant que la différence de poids ne cause pas de différence de vitesse de chute si on néglige les autres facteurs, *en particulier le rôle de la résistance du milieu*. Pour rendre ce rôle négligeable, Galilée imagine la chute de mobiles de même matière et avec une forme identique. Il passe d'abord sous silence l'effet de la résistance du milieu sur la surface des mobiles pour l'aborder à la fin de son argumentation. La résistance du milieu ralentit plus les mobiles moins volumineux que les mobiles plus volumineux, donc plus les mobiles légers que les mobiles lourds (en terme de poids absolu). Si l'on ajoute dans le scénario de l'expérience de pensée l'effet de la résistance du milieu sur les différentes surfaces des mobiles, alors on pourra dire que le mobile le plus léger chute plus lentement que le mobile le plus lourd. Mais il faut aussi ajouter qu'un composé de mobiles formera un mobile, certes plus lourd, mais avec une surface et une forme telles qu'on aura besoin d'un calcul précis pour en conclure sa vitesse. En incluant l'effet de la résistance du milieu, *Galilée n'est plus en mesure de conclure quoi que ce soit de son expérience de pensée*.

Comme le note Koyré, Galilée aura besoin d'autres arguments pour montrer que l'effet de la résistance ne sauve pas la théorie d'Aristote :

[S]i l'on considérait les deux corps de Benedetti [et de Galilée quand il parle de deux briques ou mobiles identique même en dimension] comme un seul corps, celui-ci n'aurait effectivement aucune raison d'aller plus vite que chacun d'eux pris isolément ; ni dans le vide, où la vitesse de toute façon serait infinie, ni dans le plein, puisque là ils auraient affaire à une résistance doublée. Or, la vitesse étant proportionnelle à la force et inversement proportionnelle à la résistance [selon Aristote], elle serait la même dans les deux cas.

[...]

Simplicio aurait pu dire tout cela ; ou quelque chose d'analogue. Il est un peu dommage qu'il ne l'ait pas fait : la position aristotélicienne en eût été clarifiée ; sans que, pour cela, elle fût devenue plus forte. Car, à son tour, Salviati, en invoquant l'exemple de l'oeuf de poule et de l'oeuf de marbre, exemple dont il se sert dans un contexte un peu différent [dans sa réfutation du second principe de la théorie d'Aristote], aurait pu lui rétorquer que *la prise en considération de la résistance ne sauve pas l'assertion de la proportionnalité de la vitesse et du poids*, vu que là même où cette résistance, étant pareille pour les corps en question — l'oeuf de poule et l'oeuf de marbre — n'entre pas en ligne de compte, la vitesse de la chute des dits corps ne suit nullement la proportion de leurs poids. En fait, au lieu de se mouvoir beaucoup plus lentement que l'oeuf de marbre, l'oeuf de poule se meut presque aussi vite que celui-ci, et arrive à terre presque en même temps que lui. (C'est nous qui soulignons.)¹⁷⁵

Concluons alors que Galilée néglige l'effet de la résistance du milieu pour l'aborder par la suite, sans pour autant supposer l'existence du vide. Plaçons-nous encore une fois dans la perspective de Norton et de la prémisse 8a : la vitesse de chute des corps dépend *uniquement* de leurs poids. Cette prémisse 8a est considéré comme nécessaire par Norton pour le passage de 8 à 9 et non pas pour arriver à 8 (*cf.*, 4.4.2), c'est-à-dire à la réfutation du premier principe de la théorie d'Aristote. Norton soulève ce point pour critiquer Brown et montrer que l'unique façon de conclure 9, c'est de faire la supposition 8a, qui revient pour Norton à assumer le vide : « La lecture de l'expérience de pensée qui emploie l'hypothèse 8a est tacitement la lecture standard et celle de Brown [...], je pense, dans ses commentaires de l'expérience de pensée. Cette lecture est, cependant, une mauvaise interprétation historique de ce qui est réellement en cause dans la partie pertinente des *Deux nouvelles sciences* de Galilée. Car Salviati n'est pas en mesure de faire l'hypothèse 8a. Le contexte est la chute des corps dans les milieux et l'opinion d'Aristote est clairement indiquée par Simplicio comme s'appliquant exactement à ce cas. [...]. Ne sommes-nous pas réellement en train de parler de la chute des corps dans le vide, et n'est-ce pas ce dont la théorie de Galilée traite réellement? Peut-être, mais à ce point du dialogue, Salviati n'est pas en mesure d'idéaliser ('assume away') le milieu. Ce qui est au centre de la discussion, le point même qui a soulevé la question de la chute des corps,

¹⁷⁵ Koyré 1960, *Op.cit.* pp. 204-205.

c'est la possibilité de l'existence d'un vide. Assumer la possibilité d'un vide à ce point serait une *petitio principii* ('to beg the main question under discussion'). » (C'est nous qui soulignons.)¹⁷⁶

Il est tout à fait exact qu'initialement, Galilée n'est pas en mesure de supposer le vide. Néanmoins, il souhaite procéder précisément à cette idéalisation du milieu, sinon la surface différente des deux mobiles dans l'expérience de pensée rendra le mobile plus léger plus lent que le mobile le plus lourd. Il souhaite négliger le rôle de la résistance du milieu, car son but est de réfuter le premier principe de la théorie d'Aristote selon lequel la différence de poids cause la différence de vitesse de chute, et cela selon une proportionnalité linéaire. Comme nous l'avons vu, cette expérience de pensée s'insère dans une stratégie argumentative qui vise à établir la théorie générale de Galilée, suite à sa réfutation des deux principes de la théorie d'Aristote.

Galilée considère alors des particuliers qui lui permettent cette idéalisation sans pour autant supposer l'existence du vide : des mobiles de même matière avec une forme, mais pas une dimension, identique, deux pierres. Il néglige l'effet de la résistance du milieu et il est fondé à le faire car il considère la chute de mobiles, comme le fait d'ailleurs Aristote, « où la pure action de la gravité est seule perceptible, laissant de côté, comme peu importants, d'autres facteurs » (C'est nous qui soulignons, p. 55 [109], cf. 2.2.3). Cette chute dans un milieu dilué, comme l'air, réduit au minimum l'effet de la résistance du milieu sur les surfaces des deux mobiles mis en jeu dans le scénario de l'expérience de pensée. Ainsi le milieu est-il soigneusement choisi par Galilée de sorte qu'il puisse négliger son effet. Galilée est ainsi fondé à négliger cet effet de la résistance du milieu sur la surface des mobiles, comme il va le montrer à la fin de sa stratégie argumentative.

Cet effet disproportionné de la résistance sur les différentes surfaces des mobiles de même matière montre que Galilée fait la supposition 8a *au début* de l'EP-argument ou de l'expérience de pensée et non après la conclusion 8 de Norton. Pour arriver à 8 dans le plein, on a besoin de faire la supposition 8a. La supposition 8a ou VIIIa (ce sont les mêmes) doit se comprendre alors comme Ia, immédiatement après I :

¹⁷⁶ "The reading of the thought experiment that employs assumption 8a tacitly is the standard reading and the one Brown intends, I think, in his glosses of the thought experiment. This reading is, however, a *serious misreading historically* of what is actually at issue in the relevant part of Galileo's *Two New Sciences*. For Salviati is in no position to make assumption 8a. The context is the fall of bodies in media and Aristotle's view is clearly stated by Simplicio as applying to exactly this case.[...] . Are we not really talking about bodies falling in a vacuum and is this not what Galileo's theory is really all about? Perhaps, but at this point in the dialogue, Salviati is in no position to assume away the medium. The broader focus of discussion, the very point that raised the question of falling bodies, is the possibility of the existence of a vacuum. To assume the possibility of a vacuum at this point would be to beg the main question under discussion." Norton 1996, *Op.cit.* p. 334.

Ia. Supposition : La vitesse de chute des corps [pour les mobiles décrits dans l'expérience de pensée où la pure action de la gravité est seule perceptible] dépend *uniquement* de leurs poids.

Galilée peut alors légitimement conclure VIII, uniquement en négligeant la résistance du milieu grâce à Ia. Idéalisation qu'il peut légitimement faire pour les particuliers employés dans le scénario de l'expérience de pensée. Il peut aussi légitimement conclure IX : Par conséquent, toutes les pierres [*de même matière*] tombent [presque] avec la même vitesse [dans le plein, l'air]. Mais uniquement pour ces particuliers, et dans le contexte de l'argument général des *Discours*, où il analyse par la suite les causes de la divergence des vitesses des chutes de ces particuliers. Par suite, la généralité de cette conclusion IX est limitée aux particuliers présents dans l'expérience de pensée et ne doit pas être prise isolément de la stratégie argumentative générale de Galilée.

Pour mettre en relief l'importance du choix des particuliers, surtout concernant Ia ou 8a, considérons l'argument de Norton avec des particuliers, des mobiles, de toutes matières (cette même analyse s'applique aussi à l'expérience de pensée) :

Si cette supposition est comprise comme Ia et donc destinée à parvenir à la réfutation du premier principe de la théorie d'Aristote, alors elle ne peut plus être faite, si les mobiles sont d'une matière différente. Comme on est dans le contexte de chute dans un milieu donné, dans le plein, la résistance du milieu ne peut plus être négligée pour n'importe quelle paire de mobiles. En effet, le milieu affecte disproportionnellement la vitesse de chute des mobiles de différents poids spécifiques. Car, rappelons-le, le poids spécifique est l'outil utilisé par le mobile pour écarter le milieu de son chemin. Pour assumer Ia, on doit alors supposer le vide, ce que Norton rejette à juste titre.

Si cette supposition est comprise comme 8a, donc pour aboutir à 9, c'est à dire à la théorie générale de Galilée, y compris la supposition du vide, on a vu que 8a ne nous permet pas en fait d'aboutir à 9. Cette conclusion 9 sur l'égalité de chute de tous les mobiles ne s'obtient pas à partir de l'expérience de pensée à *elle seule*, car la vitesse de chute des corps de toutes les matières *aurait pu dépendre de leur poids spécifique*. C'est exactement la conclusion du jeune Galilée du *De Motu* à la suite de la même expérience de pensée. En d'autres termes, si la vitesse de chute est proportionnelle au poids spécifique des mobiles, comme le poids spécifique du composé constitué par deux mobiles de nature différente est médian, alors le composé chute à une vitesse médiane entre le mobile lourd et le mobile léger, même dans le vide.

Norton pourra répondre que la notion de particulier ne s'applique pas à la matière des mobiles mais uniquement à leurs poids absolu. En d'autres termes, rien ne change pour l'expérience de pensée si on prend deux pierres de 8 et 4 ou deux pierres de 16 et 6, en or ou en argent, ou n'importe quelles autres dimensions et matières, pourvu qu'on ait un mobile plus lourd que l'autre et de même matière. Si la matière des mobiles n'est pas prise comme particulier, alors la conclusion IX sera générale sans que les particuliers y figurent. Dans ce cas on a besoin d'avoir une définition de ce que l'on considère comme particulier et pourquoi, définition qui manque dans l'analyse de Norton.

On peut enfin se demander quelle est l'utilité de cette contrainte d'élimination des particuliers de l'EP-argument. Rappelons-nous la thèse de Norton concernant les expériences de pensée de type 2 et interrogeons-nous sur ce qui différencie une expérience de pensée de type 2 et une expérience réelle. Dans une expérience de pensée de type 2, les particuliers sont éliminés par un saut inductif menant à une conclusion générale qui s'applique à tous les particuliers semblables. Si une expérience réelle a pour but d'établir une généralisation, alors les particuliers présents dans l'expérience réelle seront également éliminés de la conclusion. Tandis que dans les expériences de pensée de type 1, déductives, les particuliers sont impliqués dans un contre-exemple à une théorie afin de montrer une absurdité. Étant donné que Norton considère les expériences de pensée comme des arguments de ces deux types, la présence des particuliers dans l'EP-argument sert à différencier un EP-argument de n'importe quel autre argument. Mais si les particuliers sont éliminables, alors les EP-arguments se réduisent à des arguments sans particuliers, comme on l'a vu avec l'analyse de Gendler du cas de la tour de Pise.

Notre analyse du rôle des particuliers dans l'expérience de pensée ne réfute pas l'approche de Norton, car les expériences de pensée peuvent être analysées comme des EP-arguments, surtout rétrospectivement – rappelons-nous que les EP-arguments emploient des particuliers. C'est plutôt la condition (ii) sur la non-pertinence des particuliers à la généralité de la conclusion, ainsi que la thèse d'élimination de ces particuliers d'un argument à la Gendler, qui posent problème. Néanmoins, un plus grand soin doit être apporté à la définition de la notion de particulier et du rôle de ceux-ci dans l'expérience de pensée, analyse qu'on entreprendra dans la partie III.

Examinons à présent les leçons qu'on peut tirer de l'analyse historique de la tour de Pise concernant l'approche de Brown. Celle-ci se révèle à cet égard beaucoup plus problématique.

5.5 Une expérience de pensée, deux lois de la nature

Deux théories sont en accord avec l'expérience de pensée. Si la vitesse de chute est indépendante du poids absolu, elle peut néanmoins dépendre du poids spécifique (de la matière du mobile) et de la résistance du milieu. Si on idéalise l'effet de la résistance du milieu, les deux mobiles, de matière différente, chuteront-ils avec des vitesses différentes ou avec des vitesses égales ? Suite à l'expérience de pensée, Galilée conclut à une différence dans son *De Motu* de 1590, et à l'égalité dans les années 1630. L'expérience de pensée étant la même dans les deux cas, la différence de conclusion concernant la vitesse de chute dans le vide pour les mobiles de matières différentes est donc due à quelque chose d'autre. C'est ce que nous avons montré dans notre analyse de la façon dont Galilée extrapole chacune de ses deux théories (cf. 5.2 et 5.3). C'est l'interprétation du rôle des poids spécifiques des mobiles d'un côté, et de la résistance du milieu de l'autre, dans la détermination de la vitesse de chute dans le plein, qui donne ces deux conclusions différentes. Les arguments avancés par Galilée pour justifier sa théorie générale qui établit une égalité des vitesses de chute dans le vide, en 1638, contiennent un argument de passage à la limite, un raisonnement causal sur la chute de mobile de petite altitude et des expériences réelles (au moins celles avec des pendules¹⁷⁷). Tandis qu'en 1590, Galilée défend sa théorie restreinte avec une analogie archimédienne. Dans ces deux occurrences l'expérience de pensée de la tour de Pise qui précède ces arguments étant la même, elle ne peut pas forcer, *toute seule*, l'une ou l'autre théorie. Elle ne révèle et ne justifie certainement pas la conclusion concernant l'égalité de chute de *tous* les corps dans *le vide*, c'est-à-dire la théorie générale de Galilée. Chose que Brown soutient en considérant cette théorie générale comme étant la conclusion platonicienne de l'expérience de pensée de la tour de Pise.

Dire que la conclusion de l'expérience de pensée est la théorie générale de Galilée sur la chute des corps, à savoir que tous les corps tombent avec la même vitesse dans le vide, se révèle un raccourci anhistorique de la stratégie argumentative de Galilée. Galilée, suite à son expérience de pensée, rejette le premier principe de la théorie d'Aristote sur la proportionnalité de la vitesse de chute et du poids. Il peut conclure que la vitesse est indépendante du poids absolu, mais non d'autres facteurs comme le poids spécifique. Plusieurs arguments sont proposés juste après l'expérience de pensée pour montrer la dépendance de la vitesse de chute par rapport au poids

¹⁷⁷ Palmieri 2005a, sur ce point demande "Did Galileo really conduct the decisive experiments from very small heights that he mentions in his account? As is well known, it has been the business of most Galileo scholarship in the last few decades to decide whether he ever performed the experiments he reports in his writings.

spécifique et au milieu, avant que Galilée arrive enfin en 1630 à sa théorie générale sur l'égalité de vitesse de chute de *tous* les mobiles dans le *vide*.

Brown, se fondant en partie sur Koyré, veut montrer que l'expérience de pensée de la tour de Pise a permis à Galilée d'établir sa théorie générale. Revenons en guise de conclusion à l'article de Koyré où celui-ci analyse, comme on l'a fait dans ce chapitre, le cheminement historique de cette expérience de pensée.

À la fin de son analyse de l'expérience de pensée des *Discours*, Koyré cite la conclusion de Galilée concernant l'égalité de chute des mobiles de même matière et s'exclame : « La mention par Galilée de la gravité spécifique — *et ce, dans un raisonnement où elle n'a que faire* — est extrêmement curieuse. Et même, historiquement, très importante. » (C'est nous qui soulignons)

En situant l'expérience de pensée dans la stratégie argumentative des *Discours*, on a montré que cette « mention », ou plutôt cette limitation à des mobiles de même matière a toute sa place dans l'expérience de pensée; *elle a permis à Galilée de considérer uniquement l'effet du poids absolu sur la vitesse de chute*.

Koyré introduit son analyse historique de cette expérience de pensée par le rappel de cette mention. Il en fait remonter l'origine à Benedetti et il analyse la théorie restreinte des *De Motu* pour arriver enfin aux *Discours*. Koyré conclut :

L'assertion galiléenne de la chute simultanée des corps graves, telle que nous l'ont, jusqu'ici, présentée les *Discorsi*, ne repose, on s'en est bien rendu compte, que sur des raisonnements *a priori*, et des expériences imaginaires. Jamais, jusqu'ici, nous n'avons été mis en présence d'une expérience réelle ; et aucune des données numériques que Galilée avait invoquées n'exprimait des mesures effectivement exécutées. (Koyré 1960, p. 231)

Koyré affirme ici que l'assertion galiléenne de la théorie générale est faite *a priori*. Mais il est tout aussi clair que ce n'est pas la conclusion de l'expérience de pensée. Dans les « expériences imaginaires », Koyré inclut tous les arguments de Galilée qui utilisent des valeurs hypothétiques pour analyser les vitesses de chute des différents mobiles dans différents milieux. Par exemple quand Galilée dit : « imaginons que le plomb soit dix mille fois plus lourd que l'air, tandis que l'ébène ne le soit que mille fois » pour analyser comment un milieu donné diminue disproportionnellement les vitesses de mobiles de même matière, par rapport à leur vitesse identique dans le *vide*.

Koyré analyse le chemin qui a amené Galilée à la théorie restreinte, puis à la théorie générale. Il considère aussi que l'argument de passage à la limite n'est pas suffisant pour différencier entre les deux théories de Galilée ; ce sont les expériences, réalisées ou non, de chute sur de courtes distances et avec les pendules qui donnent la justification au choix théorique. Koyré semble en accord avec cette analyse :

Le raisonnement de Galilée se présente donc comme une espèce de passage à la limite : les deux séries de grandeurs, celle de la résistance des milieux dans lesquels se meuvent les graves, et celle de la différence de leurs vitesses, évoluent d'une manière concordante : plus cette résistance est forte, et plus la différence est grande ; inversement, à mesure que la première s'affaiblit, la seconde diminue. Supprimons la première : on a toute chance de voir la seconde disparaître également. Cela, bien entendu, n'est pas une preuve logiquement satisfaisante. Et l'aristotélécien n'a pas entièrement tort de ne pas l'accepter comme telle. Pour démontrer la proposition galiléenne, il faudrait une expérience. Mais celle-ci est impossible. (p. 211)

L'analyse de Koyré concorde avec celle de ce chapitre, selon laquelle l'argument de passage à la limite n'est pas « logiquement satisfaisant » : la théorie restreinte et la théorie générale, comme on l'a souligné ci-dessus, sont toutes deux compatibles avec cet argument.

Enfin, Koyré analyse la suite des *Discours* et les expériences de Galilée avec les pendules. Suite à cette dernière analyse il conclut que :

La démonstration est achevée ; la loi de la chute simultanée des graves [dans le vide] *est établie* ; les déviations observées dans la réalité sensible s'expliquent facilement par la résistance de l'air, plus grande pour les mouvements plus rapides, et plus facilement surmontée par les corps lourds que par les légers ; elle dépend aussi, bien entendu – ce que l'on a toujours su – de la forme des mobiles, plus ou moins apte à pénétrer et à diviser l'air ambiant. Elle dépend enfin de la texture de leur surface, lisse ou rugueuse et, pour ceux qui à tous ces égards sont pareils, de leur volume. La résistance mécanique est, en effet, fonction du rapport de la surface du corps à son poids ; or ce rapport est moindre dans les corps grands que dans les petits, et c'est cela qui explique – question que Sagredo avait posée quelque temps auparavant, et à laquelle il revient maintenant – : pourquoi un boulet de canon tombe-t-il plus vite qu'une balle de mousquet ? Le poids du corps, encore une fois, n'y est pour rien. (p. 235)

Ce n'est pas le but de cette thèse de défendre l'empirisme ou le réalisme chez Galilée. On souhaite seulement souligner que Koyré, l'un des défenseurs de l'apriorisme chez Galilée, n'attribue pas une fonction *platonicienne à la Brown* à l'expérience de pensée, mais à toute la stratégie argumentative analysée dans ce chapitre.

Enfin notons que l'intuition ou la perception platonicienne défendue par Brown peut se trouver plutôt dans l'extrapolation vers la théorie restreinte dans le *De Motu*. N'ayant pas l'outil théorique

ni les données d'expériences sur les pendules, Galilée, comme Benedetti, se précipite, avec une sorte d'intuition qui se traduit dans l'analogie avec la flottabilité archimédienne, et conclut que la vitesse de chute dans le vide doit être proportionnelle au poids spécifique des mobiles.

5.6 Conclusion

Récapitulons, en guise de conclusion, notre analyse historique de ce chapitre. Elle nous a permis de préciser la fonction réfutatoire et de tirer des conclusions concernant les deux approches qui rythment le débat épistémologique actuel sur les expériences de pensée.

Cette analyse nous permet de critiquer la thèse d'élimination de Norton : les particuliers sont choisis soigneusement par Galilée et sont pertinents pour la conclusion de l'expérience de pensée. Cette expérience de pensée aboutit à deux conclusions. Dans la réfutation de la théorie d'Aristote, Galilée a besoin de se limiter à des particuliers concernant la matière des mobiles en chute, pour pouvoir négliger l'effet de la résistance du milieu. Sinon le milieu affecte les mobiles de matières différentes disproportionnellement et la seule façon de négliger son effet sera de présupposer l'existence du vide, supposition que Galilée n'est pas en mesure de faire à ce stade de son argumentation, comme le note aussi Norton. Rappelons que le contexte de cette expérience de pensée est la chute dans le plein.

La deuxième conclusion attribuée à cette expérience de pensée concerne la partie constructive, si on suit la classification de Brown. Pour cette fonction, le choix des particuliers concernant la matière et la forme des mobiles permet à Galilée de négliger l'effet du poids spécifique et de la résistance du milieu sur les formes des mobiles en chute, comme une feuille et un lingot d'or. En choisissant un milieu dilué comme l'air et en revenant sur son effet sur les surfaces des mobiles, Galilée est en mesure de conclure que la vitesse de chute des mobiles *de même matière* est identique. Elle est identique si l'on peut négliger l'effet de la résistance mécanique du milieu, qui est le rapport de la surface au poids du mobile. Comme Galilée a réfuté le premier principe d'Aristote selon lequel le poids absolu cause une différence de chute pour ces mobiles, et comme il est en mesure d'idéaliser les autres facteurs qui peuvent causer une différence dans la vitesse de chute, il peut alors conclure que la vitesse de chute des mobiles de même matière est identique. Et cela dans la mesure où cette expérience de pensée figure dans une stratégie argumentative où l'effet de la résistance du milieu est précisée par la suite. Cette conclusion générale, au sens de Norton,

s'applique uniquement aux particuliers considérés dans l'expérience de pensée, et non à la vitesse de chute de *tous* les mobiles dans le plein.

Cette deuxième conclusion ne doit pas être comprise comme un accès à une loi de la nature. Comme le souligne aussi Norton, cette conclusion est « valide uniquement dans la mesure où elle est invoquée dans *des cas particuliers* dans lesquels la supposition 8a obtient, *comme la chute d'objets compacts et très lourds dans des milieux très rares*. Cette dernière étape ressemble plus à une échappatoire maladroite ou un faux pas qu'un saut dans le monde platonicien des lois. » (C'est nous qui soulignons, cf. 4.4.2). En fait, l'expérience de pensée montre que le poids absolu ne peut causer de différence de vitesse, mais elle reste silencieuse sur la question de savoir si d'autres facteurs peuvent causer une différence de vitesse de chute, dans le plein et dans le vide, en particulier le poids spécifique. Que la vitesse de chute des mobiles de même matière, comme ceux mis en jeu dans le scénario de l'expérience de pensée, soit identique, ne nous dit rien sur la loi de la nature qui permet d'établir cette égalité. Elle peut être déduite de la théorie restreinte et de la théorie générale de Galilée. En outre, l'égalité de vitesse de chute ne s'obtient pas dans la réalité ; le milieu retardera plus le mobile léger que le mobile lourd. L'égalité s'obtient uniquement dans le contexte de l'expérience de pensée où Galilée néglige l'effet de la résistance du milieu pour l'aborder par la suite.

Cette analyse montre que Brown, suite à son analyse anhistorique de l'expérience de pensée, arrive à une conclusion erronée : l'expérience de pensée ne nous donne pas un accès platonicien à une loi de la nature, la théorie générale de Galilée, du simple fait qu'elle est consistante avec deux théories, la théorie restreinte et la théorie générale. Ce n'est que suite à un développement théorique que Galilée réintroduit cette expérience de pensée pour conclure que la vitesse de chute est la même dans le vide. Il arrive à cette conclusion à l'issue d'une analyse qui commence par l'expérience de pensée, mais ne se limite certainement pas à cette dernière. L'expérience de pensée affirme que la vitesse est indépendante du poids absolu. L'argument de passage à la limite permet à Galilée de faire une conjecture concernant l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps dans le vide. Et enfin les expériences sur les pendules permettent à Galilée de confirmer cette conjecture. Ces dernières se substituent aux mesures difficilement réalisables, au moins selon les *Discours* de Galilée, de la différence des vitesses de chute de mobiles de matières différentes dans un milieu dilué et sur de courtes distances, mesures capables de confirmer l'indépendance de la vitesse de chutes des corps par rapport à leurs poids spécifique et qui auraient permis le passage de la théorie restreinte à la théorie générale sans les expériences sur les pendules.

Nous-mêmes ne sommes pas non plus en mesure de conclure cette théorie générale à partir de l'expérience de pensée de la tour de Pise, bien que nous soyons fondés à supposer l'existence du vide. Dans le vide, la vitesse de chute pourrait très bien dépendre du poids spécifique du mobile.

C'est plutôt une fonction d'exploration théorique qu'on peut attribuer à la partie constructive de cette expérience de pensée, au moins pour ce qui découle de la réfutation du premier principe d'Aristote. Cette exploration s'avère particulièrement riche dans le développement de la pensée de Galilée durant quatre décennies. Ce dernier souhaitait répondre aux questions suivantes : Si la vitesse de chute des mobiles n'est pas proportionnelle à leur poids absolu, alors de quelles variables dépend-elle ? Quelle est la cause de la divergence de la vitesse de chute dans le plein ? Et dans le vide, si elle existe ? Un développement théorique et un raisonnement argumentatif assez complexe, dans les *Discours*, ont mené Galilée à abandonner la thèse du poids spécifique comme cause de la divergence des vitesses dans le vide (sa théorie restreinte). Dans le plein, Galilée propose finalement une théorie de la résistance du milieu qui explique son effet sur la divergence de vitesse des mobiles, de toutes matières. Un développement théorique où sont impliquées, selon Palmieri, « toutes les découvertes fondamentales en mécanique et hydrostatique que Galilée avait fait au cours des quatre décennies couvrant la période allant des années 1590 aux années 1630 »¹⁷⁸.

En fait, la différence entre les conceptions de 1590 et celles de 1638 est due au traitement théorique de la résistance du milieu et du poids spécifique comme causant, ou pas, la vitesse de chute des mobiles :

- Dans les deux occurrences, en 1590 et 1638, le poids spécifique de la résistance du milieu diminue le poids spécifique du mobile. Mais en 1590, le poids spécifique est ce qui cause la vitesse de chute. Comme dans le vide le poids spécifique de la résistance du milieu est nulle, elle ne diminue donc pas le poids spécifique du mobile, sa vitesse est alors proportionnelle à son poids spécifique. Donc tous les mobiles ne tombent pas à la même vitesse selon la théorie restreinte, même dans le vide.

- En 1638 Galilée va réfuter ce rôle causal du poids spécifique et le spécifier : dans le plein, le poids spécifique n'est plus la cause de la vitesse de chute, mais plutôt l'outil utilisé par le mobile pour écarter le milieu de son chemin. Plus il est important plus il écarte la résistance du milieu facilement et plus le mobile aura de la vitesse. D'où il en résulte pour Galilée, en 1638, que dans le

¹⁷⁸ "all the fundamental discoveries in mechanics and hydrostatics that Galileo had made in the four decades spanning the period from the 1590s to the 1630s" Palmieri 2005a, *Op.cit.* p. 235.

vide, tous les mobiles de toutes les matières doivent chuter à la même vitesse, car le poids spécifique n'est plus la cause mais l'outil qui agit dans un milieu plein, et dans le vide cet outil n'a plus de fonction puisque la résistance est nulle.

Nous ne soutenons nullement que c'est l'expérience de pensée qui a poussé Galilée à ses découvertes théoriques, mais plutôt que ses découvertes lui ont donné l'outil nécessaire pour décrire l'effet de la résistance du milieu. Avec ces outils théoriques, Galilée est en mesure de conclure que la vitesse de chute des mobiles dans le vide est identique pour *tous* les corps. Une étude historique et philosophique avancée de Galilée se révèle indispensable pour bien analyser la fonction d'exploration théorique de cette expérience de pensée dans le développement de la science galiléenne. Dans sa thèse doctorale qui traite, en partie, du développement des conceptions théoriques de Galilée, Van Dyck défend la thèse selon laquelle Galilée, dans le cas d'étude de la tour de Pise, « n'est pas tant intéressé par la démonstration de régularités semi-empiriques, puisque cela impliquerait qu'il ait pris en compte tous les facteurs connus comme pertinents, que soucieux de comprendre comment le poids opère comme facteur dynamique. Et cette dernière analyse est des plus claires dans le cas de corps de même gravité spécifique, puisque pour eux, on peut négliger l'effet du milieu. »¹⁷⁹

L'analyse historique de Van Dyck étudie aussi comment Galilée se sépare de l'idée, qu'on trouve dans le *De Motu* (troisième étape de son argument par analogie, cf. 5.2.1), que la balance peut servir comme outil pour comprendre la vitesse de chute. Immédiatement après l'expérience de pensée dans les *Apostilles*, Galilée répondra à la question qui s'est posée dans le *De Motu* et qui est restée sans réponse, à savoir pourquoi, si on joint les deux mobiles en chute, ni leurs poids absolu ni leur vitesse n'augmentent :

« Ce sont des avancées mathématiques, Monsieur Rocco. Ce sont des conséquences auxquelles, pour autant que je puisse m'en assurer, vous en vous attendiez pas. Et puisque je suis certain que vous persistez à croire que, une fois la gravité en A est augmentée par l'addition de B, sa vitesse devrait également augmenter, *sinon proportionnellement au poids [peso] comme vous l'avez exigé jusqu'à maintenant avec Aristote, du moins d'une certaine façon* ; quelle ne serait pas votre surprise si je vous montrais que l'addition de B n'augmente pas la gravité de A d'un cheveu, pas plus que ne l'augmenterait l'ajout d'un millier de B ; et que, puisque son poids [peso] n'augmente pas, en conséquence sa vitesse n'augmente pas non plus, ce qui vous amène à toucher de vos propres mains à quel point vous vous êtes totalement trompé dans cette affaire! Vous allez dire : comment

¹⁷⁹ “He is not so much interested in proving semi-empirical regularities, since that would imply that he should have taken into account all factors known to be relevant, as that he is concerned about understanding how weight functions as a dynamical factor. And the latter analysis is most perspicuous in the case of bodies of the same specific gravity, since for them the effect of the medium can be neglected.” Traduit par l'auteur, Van Dyck 2005-2006 p. 233.

pourrait-il être vrai que, A et B étant deux morceaux de plomb, l'un, mis sur l'autre, n'augmentera pas sa gravité ? Et j'ajouterai que même si B était en liège son poids [*peso*] [n'] augmentera [pas], et je suis d'accord avec vous pour admettre que A, placé sur une balance, va peser [*peserà*] plus avec l'ajout de B, même si au lieu d'être en liège, c'était un flocon de laine de coton ou une feuille de lin ; et si A pesait [*pesasse*] cent livres, et B une once de plumes, sur la balance, leur composé pèsera [*peserà*] cent livres et une once. Cependant, tirer profit de cette expérience en ce qui concerne ce qui nous préoccupe est une affaire inutile et hors de propos. » (C'est nous qui soulignons)¹⁸⁰.

C'est dans cette dernière phrase que Galilée se sépare enfin de la balance¹⁸¹ comme instrument capable d'expliquer la vitesse de chute des corps¹⁸². Dans le *De Motu* l'analogie entre la vitesse de chute et la balance est claire dans la troisième partie de son argument par analogie (cf. 5.2.1). Galilée continue sa réponse à Rocco en lui exposant l'erreur du raisonnement d'Aristote ainsi que

¹⁸⁰ "These are mathematical advances, mister Rocco. They are consequences that, as far as I can ascertain, were not expected by you. And since I am certain that you persist in believing that once the gravity in *A* is increased by the addition of *B*, its velocity should also increase, *if not proportionally to the weight [peso] as you required up to now with Aristotle, then at least in some way*; how much would it not surprise you if I would show you that the addition of *B* does not increase the gravity of *A* with one hair, nor would the addition of a thousand *B*'s increase it, and that given that is doesn't grow in weight [*peso*], by consequence its speed doesn't grow either, thus making you touch with your own hand how you are totally misled in this matter! So you will say: how could it be true that, *A* and *B* being two pieces of lead, the one put on top of the other, it will not increase its gravity? And I would add that even if *B* was made of cork the weight [*peso*] will [not] increase, and I agree with you in admitting that *A*, placed on a balance, will weigh [*peserà*] more with the addition of *B*, even if it was not of cork, but a flake of cotton wool or one leaf of flax; and if *A* would weigh [*pesasse*] a hundred pounds, and *B* an ounce of plumes, on the balance their compound will weigh [*peserà*] a hundred pounds and one ounce. *Yet to take advantage of this experience in reference to what we are concerned with is a useless and irrelevant matter.*" Traduit du latin par Van Dyck 2005-2006 p. 217, traduit de l'anglais par l'auteur.

¹⁸¹ Argument que Galilée va reprendre dans les *Discours* juste avant son affirmation que les mobiles de même matière chutent avec la même vitesse dans le plein (cf. 2.2.3).

« SIMP. Je suis fort embarrassé, car il me semble que la petite pierre, ajoutée à la seconde, augmente son poids, et, si elle augmente son poids, je ne vois pas comment elle peut éviter d'augmenter sa vitesse, ou, au moins, de ne pas la diminuer.

SALV. Vous commettez ici une nouvelle erreur, seigneur Simplicio, car il n'est pas vrai que la plus petite pierre ajoute du poids à la plus grande.

SIMP. Oh! voilà une chose qui passe mon entendement.

SALV. Elle ne le passera plus, quand je vous aurai fait percevoir l'équivoque dans laquelle vous vous débattez ; il vous faut pour cela distinguer les corps graves lorsqu'ils se meuvent et lorsqu'ils sont au repos. Une grande pierre placée sur une balance non seulement pèsera davantage, si on lui ajoute une autre pierre, mais la simple addition d'une quenouille d'étope augmentera son poids des six ou dix onces que pèsera celle-ci; si au contraire vous attachez la pierre et l'étope, et les laissez tomber librement d'une certaine hauteur, croyez-vous qu'au cours du mouvement l'étope pèsera sur la pierre, accélérant ainsi sa chute, ou croyez-vous qu'elle la ralentira en la soutenant partiellement? Nous sentons la pression d'un corps disposé sur nos épaules quand nous voulons nous opposer à son mouvement, mais si nous descendons avec la vitesse qui serait naturellement la sienne, comment ce corps pourrait-il appuyer sur nous? Ne voyez-vous pas que cela reviendrait à vouloir frapper avec une lance un homme qui s'éloignerait en courant avec une vitesse égale ou supérieure à celle dont vous le poursuivez? Concluez donc que dans la chute libre et naturelle la plus petite pierre n'exerce aucune pression sur la plus grande, et n'accroît nullement son poids, comme elle le fait au repos.

SIMP. Mais si l'on plaçait la plus grande sur la plus petite?

SALV. Elle augmenterait son poids, si son mouvement était plus rapide; mais on a déjà montré que si la plus petite tombait plus lentement, elle ralentirait en partie la vitesse de la plus grande, si bien que liées ensemble, c'est-à-dire formant un corps plus pesant que la pierre la plus grande, elles se mouvraient moins vite, ce qui va contre votre supposition. Nous en concluons donc que les mobiles grands et petits, et possédant un même poids spécifique, se meuvent avec une même vitesse. » Galilée 1638, *Op.cit.* pp. 108-109.

¹⁸² Nous mentionnons ici le rôle de la balance dans la science de Galilée sans pour autant développer davantage. La thèse doctorale de Maarten Van Dyck aborde ce sujet, parmi d'autre, et fait le lien explicite avec cette expérience de pensée. Notre but est plutôt d'analyser la fonction de cette expérience de pensée par rapport à la théorie de chute des corps de Galilée (restreinte et générale) et celle d'Aristote.

l'erreur de son propre raisonnement dans le *De Motu*, lorsqu'il utilise la balance comme outil pour comprendre la vitesse de chute. En fait, la vitesse de chute des mobiles ne peut pas dépendre de leur poids absolu car en tombant les mobiles perdent, pour ainsi dire, leur poids. Une balance en chute avec le mobile ne peut pas mesurer un poids ; c'est comme quand on laisse notre main descendre avec la même vitesse que le mobile en chute :

« Mais en tout cas, Monsieur Rocco, si vous mettez la paume d'une main sous un boulet de canon pesant cent livres, qui est suspendu et soutenu par une corde, et que vous ne faites que le toucher, dites-moi si vous sentiriez son poids ? Je sais que vous répondrez non, car son poids [peso] est pris en charge par une corde, et sa descente est entièrement empêchée. Au cas où, la corde étant coupée, vous interdiriez cet effet par la force de votre bras, vous sentiriez, de fait, une charge sur votre main, qui [la main] devrait faire le travail de la corde en interdisant au boulet sa chute naturelle. Au contraire, au cas où vous ne vous opposeriez pas au boulet qui a été libéré, mais où vous céderiez à son élan en abaissant la main à la même vitesse à laquelle le boulet descendrait, dites-moi à nouveau, vous, à part le fait que vous le touchiez, vous sentiriez-vous alourdis par son poids ? Il est absolument nécessaire de répondre que ce n'est pas le cas, parce que vous n'offrez aucune résistance à la pression de ce poids. Concluez maintenant de ce raisonnement clair et concis, puisqu'il est impossible de définir l'alourdissement sinon comme cette opposition à un corps pesant qui descend, que par l'addition et la superposition l'une à l'autre des briques mentionnées ci-dessus, dont même vous admettez qu'elles descendent avec la même vitesse, car ce sont les mêmes, la gravité de l'une n'est pas augmentée par l'autre. Par conséquent, la vitesse aussi n'est pas augmentée. »¹⁸³

Cette analyse de la fonction indirecte de cette expérience de pensée nous montre son rôle dans le changement des conceptions scientifiques de Galilée, rôle qu'on souhaite ici simplement mentionner sans s'y arrêter.

Enfin, notre analyse historique et fonctionnelle de cette expérience de pensée souligne bien le rôle des particuliers choisis par Galilée : Ils lui permettent de faire les idéalizations nécessaires, soit parce que les particuliers sont de même matière et forme, soit parce que le milieu est rare et que son

¹⁸³ “But at any rate, mister Rocco, if you put the palm of one hand under a cannonball weighing a hundred pounds [*100 libbre di peso*], which is suspended and supported by a rope, and you would only touch it, tell me whether you would feel weighed down [*aggravarvi*]? I know that you will answer no, for its weight [*peso*] is supported by a rope, and its descending is entirely prevented. When the rope is cut, and you would interdict this effect by the strength of your arm, you would indeed feel a burden [*gravarvi*] on your hand, which [hand] should do the job of the rope by prohibiting to the ball its natural descent. But when you would not oppose the ball which has been let free, but you would give in to its impetus by lowering the hand with the same speed at which the ball would descend, tell me anew if you, apart from touching it, would feel yourself weighed down by its weight [*dal suo peso gravarvi*]? It is absolutely necessary to reply that this is not the case, because you don't offer any resistance to the pressing [*premura*] of that weight [*peso*]. Conclude now from this clear and brief reasoning, since it is not possible to define being weighed down [*aggravato*] if not as that opposition to a weighing body that is descending, that by the addition and superimposition of the abovementioned bricks the one to the other, which even you will allow to be descending with equal velocity because they are the same, the gravity of the one is not increased by the other. Hence, also the velocity is not increased” *Ibid.*

effet sur les différentes surfaces de ces mobiles peut être négligé. Ces particuliers permettent à Galilée d'arriver à son résultat absurde et de réfuter ainsi le premier principe d'Aristote.

Passons à présent à la dernière partie de cette thèse, où nous allons analyser les notions de possibilité des différents scénarios des expériences de pensée. Le but que nous visons par là est de proposer une structure commune capable de nous montrer comment, et si, chaque expérience de pensée peut justifier sa conclusion. Nous approfondirons alors notre analyse du rôle et de la place des différents particuliers et processus dans les différentes expériences de pensée présentées dans cette thèse.

Partie III

Une nouvelle approche des expériences de pensée scientifiques

Introduction

Dans la première partie de notre thèse nous avons commencé par définir les deux fonctions des expériences de pensée: la réfutation et l'exploration théorique. Nous avons analysé plusieurs cas d'étude en essayant de rester fidèle aux écrits de leurs auteurs, sans porter de jugement sur la justification de la conclusion de chaque expérience de pensée. Nous avons explicitement souligné, lors de l'exposition de notre classification, que *celle-ci vise à être indépendante d'une quelconque approche épistémologique sur les expériences de pensée*. Nous soutiendrons dans cette partie que les expériences de pensée doivent être analysée comme un outil scientifique autonome.

Dans la deuxième partie, nous avons examiné en détail le cas de l'expérience de pensée de la tour de Pise afin de montrer que sa fonction se limite à la réfutation. Plus précisément, même si la conclusion de l'expérience de pensée, ainsi que sa place dans la stratégie argumentative générale de Galilée, ouvre deux pistes d'exploration théorique qui mènent Galilée à deux lois différentes de la vitesse de chute, en 1590 et 1638, ce n'est pas la fonction principale de l'expérience de pensée que d'établir des lois. *À elle seule*, l'expérience de pensée ne peut pas révéler ni justifier aucune de ces lois. Ainsi, contrairement à ce qui est soutenu par Brown, l'expérience de pensée de Galilée ne peut ni révéler ni justifier la loi de Galilée sur l'égalité de la vitesse de chute de *tous* les corps dans le *vide*. Galilée ne l'a d'ailleurs pas utilisée dans ce but.

Dans la partie II, à la suite de notre analyse historique de la tour de Pise, nous avons insisté sur le fait que Galilée, en choisissant soigneusement les particuliers de l'expérience de pensée, à savoir deux mobiles de même matière, était fondé à négliger l'effet de la résistance du milieu, sans pour autant supposer l'existence du vide. Surtout il peut légitimement faire cette idéalisation dans le cadre de sa stratégie argumentative générale, au sein de laquelle il aborde le rôle de la résistance du milieu. Il en résulte que le rôle des particuliers doit être spécifié davantage afin qu'on voie comment ils contribuent à soutenir la conclusion d'une expérience de pensée, et ce contrairement à la condition (ii) de Norton, sur la non-pertinence des particuliers relativement à la généralité de la conclusion et sur leur possible élimination de l'argument qui peut remplacer une expérience de pensée.

Ces deux premières parties nous montrent alors que les expériences de pensée doivent être analysées en tant qu'outil scientifique autonome (vis-à-vis des expériences réelles, des arguments logiques et

même des simulations¹⁸⁴) et classé comme indépendant de toute approche épistémologique. Mais dire cela soulève des questions typiquement philosophiques, auxquelles on tentera de répondre dans cette partie : Peut-on analyser en quoi consiste cet outil et comment il fonctionne ? Chaque expérience de pensée est-elle unique, ou peut-on faire émerger une structure interne commune pour toutes sans pour autant les réduire à un autre outil ? La classification par fonction présentée ici, ou celle avancée par Brown, suffit-elle à les caractériser ?

Dans cette dernière partie, nous proposerons donc une structure permettant d'analyser les expériences de pensée afin de répondre aux deux premières questions par la positive à et la dernière par la négative. Cette structure se veut assez générale pour inclure toutes les expériences de pensée scientifiques, au moins celles débattues dans la littérature et dont on a analysé un échantillon représentatif dans la partie I. C'est en analysant cet échantillon que la structure que nous proposons va s'imposer d'elle-même. Elle se veut unificatrice et assez souple pour s'accommoder de leur diversité, plus souple qu'un argument logique, mais plus restrictive sur le pouvoir épistémique d'acquisition de connaissance que dans la conception de Brown. Enfin, elle reflète leur fonctionnement interne commun. Elle est alors par nature *générale* et *identifiante*, c'est-à-dire, permet de décider, face à différents scénarios, si on a affaire à une seule ou à différentes expériences de pensée.

Cette partie est également divisée en deux chapitres :

Dans le chapitre 6, nous approfondirons notre analyse du rôle et de la place des particuliers dans le scénario des expériences de pensée en analysant les notions de possibilité de ces scénarios. Cette analyse s'impose naturellement dans le cadre des expériences de pensée : On a déjà souligné à plusieurs reprises que les expériences de pensée tentent d'affirmer quelque chose sur la nature, certes en réfutant ou explorant nos théories, sans même aller et consulter cette nature. Et comme ce sont des expériences de pensée, et non pas des expériences réelles ou uniquement conçues dans le but d'une future réalisation, cela soulève naturellement la question de la notion de possibilité mise en jeu dans leur scénarios : Comment peut-on lâcher deux mobiles de même nature dans un milieu dépourvu de résistance à l'époque où la pompe pneumatique n'existait pas, et même la notion du vide était tenu pour impossible ? Peut-on, ou doit-on, mettre un chat dans une boîte et le laisser à son sort ? Ou même placer un canon sur le sommet d'une très haute montagne ? Et enfin pourra-t-

¹⁸⁴ Sur le lien entre les expériences de pensée, les expériences réelles et les simulations, cf. Rawad El Skaf et Cyrille Imbert, *Unfolding in the empirical sciences: experiments, thought experiments and computer simulations*, *Synthese*, November 2013, Volume 190, Issue 16, pp 3451-3474.

on un jour manipuler les molécules comme le démon de Maxwell ? Doit-on même se poser cette question dans le cadre de l'expérience de pensée du démon de Maxwell ? À l'époque de Maxwell, et par la suite ?

Afin de répondre à ces questions, surtout celle qui concerne le démon de Maxwell, nous approfondirons notre analyse historique de ce cas d'étude, abordé en partie dans 3.2, afin de considérer l'évolution du démon de Maxwell durant le XX^e siècle. Une évolution vers des mécanismes qui tendent à remplacer le processus de séparation décrit chez Maxwell au moyen d'un démon accompagnés de sa dynamique.

Ainsi analyser les différentes notions de possibilité de ces scénarios d'expériences de pensée nous paraît essentiel pour toute analyse épistémologique visant à comprendre la fonction, le pouvoir et la fiabilité de cet outil. Néanmoins, comme on va le voir dans ce chapitre, en abordant ce sujet de la possibilité, on rencontrera des différences subtiles quant à ce qui est possible dans le scénario et la manière d'analyser cette possibilité. Cette analyse se révèle d'autant plus nécessaire que plusieurs philosophes basent leur approche épistémologique sur une notion de possibilité nomologique, c'est-à-dire qui identifie ce qui est possible selon certains principes, lois et théories.

Au chapitre 7 nous proposerons dans une première partie (7.2 à 7.4) une structure générale pour analyser les expériences de pensée scientifiques. Cette structure, divisée en cinq étapes, nous montre comment chaque scientifique s'y prend pour répondre à une question cible. Nous analyserons ensuite sur le cas de Maxwell, en partant des différentes notions de possibilité du chapitre 6, si sa réponse était justifiée, et sinon pourquoi son expérience de pensée échoue.

Dans la deuxième partie de ce chapitre (7.5 et 7.6) nous analyserons le débat sur l'identité des expériences de pensée entre Michael Bishop et Norton. Ce débat fut ouvert par le premier dans le but de réfuter l'approche de Norton, et se base sur l'expérience de pensée de la boîte à photon contre la cohérence de la mécanique quantique (*cf.* 2.3). En bref, ce débat soulève la question de savoir sous quel aspect certains changements, dans le scénario d'une expérience de pensée, vont nous permettre de dire qu'on est en présence d'une ou de plusieurs expériences de pensée. Nous tenterons alors de répondre à cette question en utilisant notre approche et nous pousserons notre analyse de ce cas d'étude plus loin que les deux protagonistes de ce débat. Nous verrons qu'ici encore l'histoire de cette expérience de pensée s'avère plus riche que ce débat entre Bishop et Norton. Elle sera, de fait, utilisée par Einstein à plusieurs reprises et avec différents objectifs.

Enfin, ces deux chapitres nous montrent une fois de plus que dès lors qu'on s'intéresse à l'histoire d'un cas d'étude précis, la plupart du temps on va être récompensé philosophiquement. Nous trouvons peu crédible qu'on puisse faire une analyse philosophique cohérente de la plupart des expériences de pensée, sans avoir recours aux analyses historiques : car on est toujours dans un contexte scientifique précis, et les expériences de pensée autorisent une certaine évolution de leurs scénarios.

« [P]uisque la situation imaginée dans une expérience de pensée réussie ne peut clairement pas être arbitraire, à quelles conditions de vraisemblance est-elle soumise? »

Thomas Kuhn, 1964

Chapitre 6

Quelle notion de possibilité doit-elle être utilisée pour analyser les expériences de pensée ?

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons les différentes notions de possibilité nomologique impliquées dans le scénario des expériences de pensée. Disons ici simplement que cette notion de possibilité doit se comprendre comme possibilité en principe selon certaines théories, lois et principes. Par exemple, il est nomologiquement possible de mesurer, déterminer ou prédire la position et la quantité de mouvement d'un objet classique, mais il est nomologiquement impossible de mesurer, déterminer ou prédire la position et la quantité de mouvement d'un objet quantique.

Dans 6.2, nous commencerons par examiner une thèse commune à plusieurs approches épistémologiques des expériences de pensée scientifiques. Certains auteurs considèrent leur approche comme générale, c'est-à-dire comme rendant compte de l'utilisation des expériences de pensée dans tous les domaines, de la philosophie à la science, mais nous nous restreindrons aux usages scientifiques. Pour présenter cette thèse, définissons d'abord les différentes notions de possibilité nomologique auxquelles le scénario d'une expérience de pensée scientifique peut faire appel : ces scénarios peuvent être *nomologiquement possibles*, leur *possibilité nomologique peut*

rester indéterminée, ou ils peuvent être *nomologiquement impossibles*. On rencontre la première option, et à certains égards la troisième, dans plusieurs approches épistémologiques qui adoptent ce qu'on va appeler la *thèse de la possibilité nomologique*, selon laquelle le scénario d'une (bonne) expérience de pensée doit être nomologiquement possible. Cette thèse se retrouve, bien que formulée différemment, dans de nombreuses approches épistémologiques des expériences de pensée, de Kuhn aux plus récentes approches expérimentales (Sorensen, Laymon), en termes de modèles mentaux (Nersessian).

Dans 6.3, dans le but de critiquer ces approches avant de proposer la nôtre (dans le chapitre 7), nous analyserons *la notion de possibilité* impliquée dans les scénarios des expériences de pensée dans deux cas qui ont été examinés dans la partie I : le démon de Maxwell (*cf.* 3.2) dans 6.3.1, et le débat entre Einstein et Bohr sur la boîte à photon (*cf.* 2.3) dans 6.3.3. Dans le premier cas, nous sommes en présence d'un scénario sous-déterminé, de sorte que sa possibilité nomologique reste indéterminée. En outre, une description meilleure du fonctionnement mécanique du démon, comme celle présentée par Smoluchowski (*cf.* 6.3.2.1) et Feynman (*cf.* 6.3.2.2) avec leurs expériences de pensée mettant en scène un démon mécanique, se révèle sans importance pour la conclusion de Maxwell, même si ces démons mécanique sont utiles pour répondre à d'autres questions que celles de Maxwell. Dans le deuxième cas, Bohr réfute l'expérience de pensée d'Einstein et sa conclusion en offrant une meilleure description théorique et technique des procédures de la pesée et de la mesure du temps. En d'autres termes, Bohr réfute la conclusion de la boîte à photon d'Einstein en montrant que le scénario, dans sa version, est nomologiquement impossible.

Dans 6.4, à la suite de notre analyse de ces deux cas, nous exposerons la dynamique de l'évolution des scénarios des expériences de pensée, selon *la place qu'y occupent les particuliers et les processus*. Si le scénario contient des particuliers, accompagnés de leur dynamique, sous-déterminés de telle sorte qu'ils appartiennent à un processus dont la possibilité nomologique reste indéterminée, on dira qu'ils se trouvent dans l'« arrière-plan ». En revanche, si le scénario est présenté comme nomologiquement possible, alors les particuliers et surtout les processus doivent être nomologiquement possibles ; ils donc doivent être suffisamment décrits et placés au « premier plan ». La dynamique de l'évolution d'une expérience de pensée consiste alors à faire passer ces particuliers, leur dynamique et les processus associés, de l'arrière-plan vers le premier plan.

Dans 6.5, nous déduirons, de cette analyse des différentes notions de possibilité impliquées dans les expériences de pensée, certaines leçons relatives au débat actuel sur les expériences de pensée. En particulier, de nombreuses approches des expériences de pensée échouent parce qu'elles négligent la distinction entre différentes notions de possibilité, surtout lorsqu'elles demandent une

possibilité nomologique pour toute bonne expérience de pensée. En particulier, l'approche de Kuhn, les approches expérimentales et certaines approches en termes de modèles mentaux dénaturent ce qui se passe dans certaines expériences de pensée.

6.2 Possibilité nomologique du scénario

En effectuant une expérience de pensée, le scientifique procède généralement de la façon suivante : il imagine un scénario qui contient des particuliers, par exemple deux mobiles de même matière. Leur dynamique consiste à les lâcher du haut d'une tour ; ils chutent indépendamment, puis ensemble. Le scénario repose sur la supposition implicite ou explicite de certaines théories, comme la théorie d'Aristote. Il inclut également des idéalizations : par exemple, celle selon laquelle la résistance du milieu est nulle. Puis le scientifique déroule mentalement ce scénario et obtient alors un résultat ; par exemple, le résultat selon lequel, selon la théorie aristotélicienne de la chute libre, le composé plus lourd doit tomber plus rapidement et plus lentement que le plus léger des deux mobiles. Il en conclut quelque chose sur une théorie, une loi ou un principe spécifique : par exemple, il conclut que, le résultat étant absurde, la théorie d'Aristote de la vitesse de chute libre, plus précisément son premier principe, est fautive.

En présence d'un tel acte d'imagination, il est nécessaire de définir quelle notion de possibilité est utilisée dans le scénario d'une expérience de pensée. Nous soutenons qu'il y a au moins deux types de scénario selon la possibilité supposée : les scénarios *nomologiquement possibles* et ceux dont la *possibilité nomologique reste indéterminée*.

6.2.1 Scénario nomologiquement possible

Commençons par la définition des scénarios nomologiquement possibles :

Un scénario d'expérience de pensée est nomologiquement possible si le scientifique imagine des particuliers non-fictifs (un chat, deux mobiles de même nature, un canon), leur dynamique (placer le chat dans une boîte opaque, laisser tomber deux mobiles de même matière indépendamment puis ensemble, placer un canon sur le sommet d'une très haute montagne), et des processus mécaniques ou naturels (désintégration atomique, chute libre, tirer des projectiles) suffisamment décrits, de sorte qu'on puisse évaluer leur possibilité nomologique selon certaines théories, lois et principes, dont la vérité est supposée dans le scénario (la mécanique quantique, le premier principe de la théorie d'Aristote, les lois de Newton).

Ces scénarios décrivent des expériences *réalisable en principe dans le monde*, si l'on se permet toute les idéalizations nécessaires (résistance nulle du milieu, taille de la montagne). Ces idéalizations seront ou bien acceptées, ou bien rejetées par la communauté scientifique ; en particulier par le défenseur de la théorie critiquée par l'expérience de pensée, mais aussi par le critique de la théorie défendue¹⁸⁵ par l'expérimentateur en pensée, suite à son expérience de pensée.¹⁸⁶ En fait, les particuliers choisis, comme nous l'avons vu dans le cas de Galilée, facilitent ou compliquent l'acceptation de ces idéalizations.

On retrouve cette notion de possibilité dans de nombreuses approches épistémologiques des expériences de pensée, au moins depuis Kuhn, même si elle est exprimée différemment. Nous avons mentionné la supposition sous-jacente concernant la « familiarité » des données dans une expérience de pensée, qui figure dans la question de Kuhn. En fait, la plupart des approches proposent de répondre à cette question, mais rares sont celles qui abordent explicitement cette supposition sous-jacente¹⁸⁷. Selon Kuhn, « étant admis que chaque expérience de pensée réussie incorpore, dans sa conception, de l'information préalable sur le monde, cette information n'est pas elle-même mise en cause dans l'expérience. Au contraire, si nous avons affaire à une véritable expérience de pensée, les données empiriques sur lesquelles elle repose devaient être à la fois *bien connues et généralement admises* avant que l'expérience ait même été conçue.»¹⁸⁸ Cette hypothèse sert à Kuhn de réponse à la question suivante : « puisque la situation imaginée dans une expérience de pensée ne peut clairement pas être arbitraire, à *quelles conditions de vraisemblance est-elle soumise?* »¹⁸⁹ Dans la forme, « rien à propos de la situation imaginée ne peut être entièrement *insolite* ou *étrange*. » (C'est nous qui soulignons)¹⁹⁰.

¹⁸⁵ « Défendue » doit être comprise ici au sens d'exploration théorique du chapitre 3 et non pas dans sens que suggère par exemple Brown, le sens où l'expérience de pensée fournit et justifie une loi de la nature.

¹⁸⁶ cf. la règle méthodologique de Popper sur ce sujet : “the argumentative use of imaginary experiments is legitimate only if [...] the rule is adhered to that the idealizations made must be concessions to the opponent, or at least acceptable to the opponent ». Karl Popper, *Logic of Scientific Discovery*, New York : Harper, 1959, p. 442.

¹⁸⁷ Humphreys est l'un des rare philosophes à traiter explicitement cette condition de familiarité, dans le but de la réfuter. Néanmoins il emploie des arguments différents de ceux présentés dans ce chapitre. Cf. Humphreys 1993, p. 216.

¹⁸⁸ Kuhn 1964, p. 308. Traduit par l'auteur. “Granting that every successful thought experiment embodies in its design some prior information about the world, that information *is not itself at issue in the experiment*. On the contrary, if we have to do with a real thought experiment, the empirical data upon which it rests must have been both *well known* and *generally accepted* before the experiment was even conceived.”.

¹⁸⁹ *Ibid*, p. 241. Traduit par l'auteur. “since the situation imagined in a thought experiment clearly may not be arbitrary, to what *conditions of verisimilitude* is it subject?”.

¹⁹⁰ *Ibid*, p. 252. Traduit par l'auteur “nothing about the imagined situation may be entirely *unfamiliar* or *strange*.”.

Nancy Nersessian (1992) fait appel aux modèles mentaux d'un type défendu par certains psychologues cognitifs pour analyser les narrations en général et les expériences de pensée en particulier. Selon cette approche, les expériences de pensée scientifiques sont des narrations qui fonctionnent comme toute autre narration, et en tant que telles sont « une espèce de raisonnement simulé à partir d'un modèle » (p. 295.), c'est-à-dire que « les expérimentateurs en pensée manipulent des modèles mentaux de la situation décrite dans la narration de l'expérience de pensée. » (p. 291-2). Même si nous trouvons que cette approche rend les expériences de pensée plus mystérieuses en les réduisant à des modèles mentaux, tout aussi mystérieux, notre but ici n'est pas de porter un jugement sur ces modèles mentaux, mais plutôt sur l'une de leur caractéristiques. Nersessian énumère cinq caractéristiques des expériences de pensée, définies comme des modèles mentaux. Dans la seconde, qui est relative à notre enquête, elle affirme :

« Caractéristique 2: Le lecteur est invité à traverser une suite d'événements ou de processus comme on le ferait dans le monde réel. Autrement dit, même si la situation peut sembler bizarre ou fantastique, comme être dans un coffre dans l'espace, il n'y a rien de bizarre dans le déroulement. Les objets se comportent comme ils le feraient dans le monde réel, en présence ou en absence de gravité. L'hypothèse est que si l'expérience pouvait être réalisée, la chaîne des événements se déroulerait de la façon dont les choses se passent ordinairement dans le monde » (C'est nous qui soulignons) ¹⁹¹

Roy Sorensen (1992) affirme¹⁹² qu'une expérience de pensée est « une expérience [...] qui prétend atteindre son objectif sans le bénéfice de l'exécution ». La cinquième proposition dans son schéma de 'réfuteur de nécessité', qui enrégimente les expériences de pensée en cinq propositions en

¹⁹¹ Nersessian 1992, *How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science*, dans R. Giere (ed.), *Cognitive Models of Science*, Minneapolis: University of Minnesota Press, 3-44. "a species of simulative model-based reasoning." (p. 295) "That is, thought experimenters reason by manipulating mental models of the situation depicted in the thought experimental narrative." (p. 291-2). "Feature 2: The reader is invited to follow through a sequence of *events or processes as one would in the real world*. That is, even if the situation may seem bizarre or fantastic, such as being in a chest in outer space, there is nothing bizarre in the un-folding. Objects behave as they would in the real world in the presence or absence of gravity. The assumption is that if the experiment could be performed, the chain of events would unfold according to the way things usually take place in the world." p. 297. Traduit par l'auteur.

¹⁹² Il l'a affirmé aussi dans une correspondance personnelle, "Strictly speaking, the thought experimenter is committed to the possibility statement. However, he may wittingly present a scenario that has obvious impossibility in the belief that there is a possible scenario which could be substituted. For instance, I know that Plato's Ring of Gyges is flawed by the fact that an invisible man would be unable to see (because his retina could not absorb light). But I use the scenario anyway. I do not have any specific replacement in mind but I think a replacement could be furnished. Historically, *many critics of the thought experiment* focused on the possibility statement. They can be understood as denying that there is any viable replacement. They think that Maxwell's demon involves a deep physical impossibility." (C'est nous qui soulignons).

Cette correspondance souligne bien la différence entre notre analyse, qu'on développera dans ce chapitre et en particulier concernant le démon de Maxwell. C'est à dire, comme on a souligné au chapitre 6, le fait que Smoluchowski ou Feynman n'essayaient pas de « critiquer » le démon de Maxwell.

logique modale, stipule explicitement que « *le contenu* de l'expérience de pensée est une *possibilité* » (C'est nous qui soulignons).¹⁹³

Ronald Laymon (1991), affirme également que les expériences de pensée sont similaires à des expériences réelles ; elles sont des « limites idéalisées de l'expérimentation réelle ». Il affirme que, pour défendre cette approche, nous devons « montrer qu'il existe une série de raffinements expérimentaux tels qu'on peut faire des expériences réelles pour s'approcher de l'expérience de pensée idéalisée »¹⁹⁴.

Enfin, Marco Buzzoni (2010) dans son approche « transcendentale-opérationnelle » affirme¹⁹⁵ :

« *Toutes les expériences de pensée doivent être considérés comme traduisibles en expériences réelles, et toutes les expériences réelles comme des réalisations d'expériences de pensée.* Ce que les expériences de pensée ont de plus que des expériences réelles est le simple fait qu'elles existent dans une sphère purement hypothétique; ce que les expériences réelles ont de plus que des expériences de pensée est le simple fait qu'elles outrepassent la sphère du possible, dans l'exécution réelle de l'expérience. »¹⁹⁶

Nous avons déjà retracé le débat épistémologique actuel entre Norton et Brown à la question épistémologique de Kuhn (cf. 4.1). En fait, toutes ces autres approches prennent comme point de départ cette question. La réponse et l'approche de Kuhn, comme les différentes approches épistémologiques citées ci dessus, placent des restrictions que nous trouvons contraignantes pour

¹⁹³ Sorensen 1992, *Thought experiments*, Oxford: Oxford University Press. "an experiment [...] that purports to achieve its aim without the benefit of execution." (p. 205) "the content of the thought experiment is a possibility" Traduit par l'auteur, p. 135.

¹⁹⁴ Laymon 1991, *Thought Experiments of Stevin, Mach and Gouy: Thought Experiments as Ideal Limits and as Semantic Domains*, dans T. Horowitz and G. Massey (eds.), *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Lanham: Rowman & Littlefield, 167–192. "ideal limits of real experimentation." p. 167. "(1) show that there exists a series of experimental refinements such that real experiments can be made to approach the postulated idealized thought experiment" p. 174. Traduit par l'auteur.

¹⁹⁵ Il l'affirma aussi dans une correspondance personnelle "I think that any scientific law, even a principle as general as the second law of thermodynamics, must ultimately entail some technical-operational consequences. And as a fact the history of science is littered with failed attempts to build a perpetual motion machine. This is one of the technical-operational pillars both of the second law of thermodynamics and of its exemplification in Maxwell's thought experiment.

However, this does not mean that the scenario of a TE must be empirically possible. This would be a too narrow empiricism! It only means that in my opinion Maxwell's TE entails implicitly the possibility to project a corresponding real experiment." (C'est nous qui soulignons)

Buzzoni dénature l'expérience de pensée de Maxwell et sa conclusion en soutenant que Maxwell admettait la possibilité, même nomologique, quoique certainement pas empirique, de son démon.

¹⁹⁶ Buzzoni 2010, *Empirical Thought Experiments: A Transcendental-Operational View*. *Epistemologia* XXXIII: 5-26. "All thought experiments must be thought of as translatable into real ones, and all real experiments as realisations of thought ones. What thought experiments have over and above real experiments is the mere fact that they exist in a purely hypothetical sphere; what real have over and above thought experiments is the mere fact that they overstep the sphere of the possible, in the experiment's real execution." p. 1, (c'est l'auteur qui souligne), Traduit par l'auteur.

certaines expériences de pensée, en particulier celle du démon de Maxwell. Ces restrictions, bien qu'énoncées différemment, partagent une intuition sous-jacente qui se traduit dans ce qu'on va appeler la *thèse de possibilité nomologique* :

Tous les scénarios des (bonnes) expériences de pensée scientifique doivent être nomologiquement possibles.

Ainsi, le scénario de Galilée qui lâche deux mobiles du haut de la tour de Pise (*cf.* 2.2), celui qui permet de construire le mécanisme mortel de Schrödinger (*cf.* 2.4), ou même d'accélérer uniformément un ascenseur dans un espace loin d'un champ gravitationnel d'Einstein (*cf.* 3.5), sont nomologiquement possibles et sont compatibles avec cette thèse.

Au contraire, dans certains cas, le scientifique conçoit un scénario qui contient des données, c'est-à-dire des particuliers, leur dynamique et les processus associés, qui sont « peu familiers ou étranges ». Le scénario imaginé n'est pas explicitement considéré comme employant une « séquence d'événements ou de processus comme on le ferait dans le monde réel », ou comme étant un cas limite d'une expérience réelle. Dans les cas concernés, le scientifique présente soit un scénario nomologiquement impossible, soit un scénario dont la possibilité nomologique reste indéterminée. Dans la section suivante, nous allons analyser ce dernier type de scénario, celui dont la possibilité nomologique reste indéterminée.

6.2.2 Scénario dont la possibilité nomologique reste indéterminée

Comme dans la section précédente, commençons par la définition :

Un scénario d'une expérience de pensée dont la possibilité nomologique reste indéterminée est un scénario où le scientifique imagine des particuliers fictifs et décrit leur dynamique de sorte qu'ils conduisent à des processus dont la possibilité nomologique reste indéterminée.

Cette possibilité nomologique reste indéterminée, dans le sens que même avec nos meilleures théories, lois et principes qui doivent décrire ces éléments du scénario, on n'est pas en mesure de dire si tel processus est possible ou pas. L'expérience de pensée du démon de Maxwell (*cf.* 3.2) est

un exemple canonique : ce dernier imagine un particulier fictif « un petit être habile des doigts et très observateur », et sa dynamique d'ouverture et de fermeture d'une porte sans masse¹⁹⁷, de sorte qu'ils aboutissent à un *processus capable de séparer les molécules lentes des rapides*.

Notons à ce stade une distinction fondamentale : nous analysons bien dans ce chapitre *les processus et non pas leurs résultats* ; c'est-à-dire, dans le cas du démon de Maxwell par exemple, on évalue la possibilité nomologique du processus de séparation des molécules, et non ce à quoi ce processus aboutit, à savoir les molécules lentes d'un côté et les rapides de l'autre (on analysera le résultat du scénario et la conclusion de l'expérience de pensée dans le chapitre 7).

Afin de mieux comprendre la différence entre ces deux types de scénarios, ceux qui sont nomologiquement possibles et ceux dont la possibilité nomologique reste indéterminée, nous approfondirons notre analyse de deux expériences de pensée exposées dans la partie I, celle du démon de Maxwell et celle de la boîte à photon d'Einstein.

6.3 Le démon et l'horloge

Dans cette section nous allons regarder de plus près le démon de Maxwell et sa conclusion, en la comparant brièvement à une autre tentative de critiquer la deuxième loi de la thermodynamique datant de la même époque, la tentative de Josef Loschmidt, mais surtout aux expériences de pensée de Marian von Smoluchowski et de Richard Feynman, qui conçoivent des processus et des mécanismes bien décrits à la place du démon et de sa dynamique. On regardera surtout comment chaque scientifique utilise son scénario et la conclusion de son expérience de pensée. Ensuite nous résumerons la réponse de Bohr à Einstein afin d'analyser la différence entre celle-ci et les expériences de pensée de Smoluchowski ou de Feynman.

6.3.1 La notion de possibilité impliquée dans le scénario du démon de Maxwell

Nous avons déjà vu dans la section 3.2 la fonction de l'expérience de pensée du démon de Maxwell, qui consiste à montrer la nature statistique de la deuxième loi de la thermodynamique. Réexaminons la partie concernant le démon et sa dynamique, dans le scénario de l'expérience de pensée paru dans *La Chaleur* :

¹⁹⁷ Cette dernière est bien nomologiquement impossible selon toutes nos théories physiques, mais c'est une idéalisation qu'on s'est permis de faire dans le cadre de ce scénario.

« [S]i nous concevons un être dont les facultés (sens) soient assez développées pour qu'il puisse suivre chaque molécule dans sa course; cet être dont les attributs seraient cependant finis comme les nôtres deviendrait capable de faire ce que nous ne pouvons faire actuellement. [...]. Supposons maintenant que le récipient soit divisé en deux portions A et B, par une cloison dans laquelle il y ait une petite ouverture, et qu'un être qui puisse discerner par la vue les molécules individuelles ouvre et ferme cette ouverture, de manière à ne permettre l'introduction de A vers B que des molécules les plus rapidement agitées, et de B vers A, l'introduction des molécules dont le mouvement est lent, il aura ainsi, sans dépenser de travail, élevé la température de B et abaissé celle de A, malgré la seconde loi de la thermodynamique »¹⁹⁸.

Maxwell explique ici que si les facultés de son démon, sont « assez développées pour qu'il puisse suivre chaque molécule dans sa course; cet être [...] deviendrait capable de faire ce que nous ne pouvons faire actuellement ». La question qu'on se pose est de savoir comment on doit analyser un tel démon et sa dynamique. Maxwell nous décrit-il un processus nomologiquement possible ? Doit-on, ou Maxwell aurait-il dû, ou même pourrions-nous, fournir une description meilleure du mécanisme opéré par un tel démon qui aboutira au processus de séparation des molécules et dont le résultat sera d'obtenir les molécules lentes dans A et les rapides dans B ? Pour répondre à ces questions, il faut prendre en considération la conclusion de l'expérience de pensée, selon laquelle la deuxième loi de la thermodynamique est de nature statistique.

Pour mieux comprendre cette conclusion, on doit se rappeler que la deuxième loi se base sur une différence entre deux types d'énergie : en forme de travail et en forme de chaleur. Maxwell nous explique cette différence de la manière suivante :

« La deuxième loi concerne ce genre de communication de l'énergie que nous appelons le transfert de chaleur par opposition à un autre type de communication de l'énergie que nous appelons travail. Selon la théorie moléculaire, la seule différence entre ces deux types de communication de l'énergie est que les mouvements et les déplacements qui sont concernés dans la communication de la chaleur sont celles des molécules, et sont si nombreux, si petits individuellement, et si irréguliers dans leur distribution, qu'ils échappent tout à fait à toutes nos méthodes d'observation; tandis que, lorsque les mouvements et les déplacements sont ceux des corps visibles constitués d'un grand nombre de molécules qui se déplacent toutes ensemble, la communication de l'énergie est appelé travail.

Par conséquent, *nous avons seulement à supposer nos sens aiguisés à un tel degré que nous pourrions suivre, aussi facilement que l'on suit maintenant ceux*

¹⁹⁸ James Clerk .Maxwell, 1891, *Op.cit.*

des grands corps, les mouvements des molécules, et la distinction entre le travail et la chaleur disparaîtrait, car la communication de la chaleur serait vue comme une communication d'énergie du même genre que celle que nous appelons travail. »(C'est nous qui soulignons.)¹⁹⁹

Ainsi donc, nous dit Maxwell, si on est capable de faire ce que fait son démon, « *la distinction entre le travail et la chaleur disparaîtrait* », et pour cela « *nous avons seulement à supposer nos sens aiguisés à un tel degré que nous pourrions suivre, aussi facilement que l'on suit maintenant ceux des grands corps, les mouvements des molécules* ». En d'autres termes, si ce processus de séparation était nomologiquement possible, alors les concepts même de la thermodynamique « *disparaîtraient ('will break')* ». Ainsi la conclusion de Maxwell et le fait qu'il n'a pas rejeté complètement la deuxième loi suite à son expérience de pensée nous indiquent qu'il ne proposait pas son expérience de pensée comme potentiellement réalisable, même en principe, avec des processus nomologiquement possibles²⁰⁰. C'est ce qu'il dit aussi dans *la Chaleur* juste avant l'introduction de son démon ci-dessus (cf. 3.2.2) ; « la seconde loi de la thermodynamique, [...] est absolument vraie, tant que nous ne pouvons agir que sur les corps pris en masse, et que nous n'avons pas la faculté de percevoir ou la possibilité de manier les molécules séparées dont ils sont constituées. » Cette possibilité de séparer les molécules reste alors indéterminé.

Poursuivons cette analyse en la comparant avec la conclusion de Loschmidt, avant d'aborder les expériences de pensée de Smoluchowski et de Feynman.

Commençons par une tentative semblable de la même époque « 'pick a hole' dans la deuxième loi de la thermodynamique ». Selon Daub (1970), Loschmidt (1869) conçoit une expérience de pensée similaire "sans-Démon", sans être fini. Loschmidt pensait qu'un tel dispositif

¹⁹⁹ "The second law relates to that kind of communication of energy which we call the transfer of heat as distinguished from another kind of communication of energy which we call work. According to the molecular theory the only difference between these two kinds of communication of energy is that the motions and displacements which are concerned in the communication of heat are those of molecules, and are so numerous, so small individually, and so irregular in their distribution, that they quite escape all our methods of observation; whereas when the motions and displacements are those of visible bodies consisting of great numbers of molecules moving all together, the communication of energy is called work.

Hence, we have only to suppose our senses sharpened to such a degree that we could trace the motions of molecules as easily as we now trace those of large bodies, *and the distinction between work and heat would vanish*, for the communication of heat would be seen to be a communication of energy of the same kind as that which we call work" Traduit par l'auteur, p. 669, Maxwell, 1878, dans *The scientific papers of James Clark Maxwell* edited by W. D. Niven, New York : Dover 1965.

²⁰⁰ Cf. aussi l'analyse de Sheldon Krimsky, 1973, The use and misuse of critical Gedankenexperimente, *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, 4: 323–334 "By choosing such a perfect and incredible creature, Maxwell was reaching out to the pure limits of possibility, far beyond what any mechanical device could hope to accomplish. The idealized demon trap-door combination far from being an extrapolation of a series of obtainable states in nature, was rather a Pure leap in the imagination and thus does not measure up to being an empirically grounded idealization" (p. 326.) Et suite à l'analyse de l'expérience de pensée du démon de Maxwell il conclut : "The purpose of the demon experiment is to drive the theory to its limit and to indicate that by itself it is insufficient to give an adequate account of the law of entropy. There is no *obvious* logical or physical reason to invalidate the operation of the demon. If the thought experiment were constructed to suggest that an actual experiment be performed then there is some ground for Bridgman's criticism [que le processus de séparation est impossible]. But no such purpose is advanced ." p. 331.

était nomologiquement possible et a utilisé son expérience de pensée dans le but d'argumenter contre la formulation de Clausius comme base pour la deuxième loi. Il alla même jusqu'à prétendre que « le terrifiant 'nimbe' de la seconde loi, qui l'a fait apparaître comme un principe anéantissant la totalité de la vie dans l'univers, serait également détruit; [... L'humanité] aurait une source inépuisable de chaleur transformable [en travail] à portée de main dans tous les âges »²⁰¹.

« l'humanité aurait une source inépuisable de chaleur transformable en travail », pensait alors Loschmidt. Cet optimisme nous montre que non seulement il assumait que son processus de séparation des molécules était nomologiquement possible, mais aussi qu'il pourrait, peut être, devenir techniquement réalisable un jour. Ainsi, Maxwell et Loschmidt arrivent à des conclusions différentes à la suite d'expériences de pensée similaires. Le premier, contrairement au second, ne suppose pas que le processus que le démon et sa dynamique décrivent soit nomologiquement possible. Il pensait, et à juste titre, que les idéalizations nécessaires étaient bien trop importantes pour pouvoir faire l'hypothèse que l'ensemble est nomologiquement possible. Ces idéalizations sont, bien sûr, ce qui apparaît dans la première ligne de la citation de *La Chaleur*, « un être dont les facultés (sens) soient assez développées pour qu'il puisse suivre chaque molécule dans sa course ». Et comme nous le verrons avec les deux expériences de pensée suivantes, ces détails vont rendre le processus mécanique de séparation des molécules nomologiquement impossible.

6.3.2 L'impossibilité nomologique des démons mécaniques

Les démons nomologiquement possibles étaient, et sont encore, l'objet de nombreuses expériences de pensée, de simulations informatiques et même d'expériences réelles depuis le début du XX^e siècle²⁰². La recherche de démons nomologiquement possibles, ou d'une explication de leurs échecs était, et est encore, une question scientifique pertinente²⁰³.

Au début du XX^e siècle, il était devenu évident que les processus thermiques étaient des processus statistiques, et des violations empiriques de la validité universelle de la deuxième loi ont été observées avec des phénomènes de fluctuation tels le mouvement brownien d'un grain de pollen.

²⁰¹ “the terrifying *nimbus* of the second law, by which it was made to appear as a principle annihilating the total life of the universe, would also be destroyed; [... mankind] would have an inexhaustible supply of transformable heat [into work] at hand in all ages” Traduit par l'auteur, cité de Daub 1970, réimprimé en Leff et Rex 2003 *Op.cit.* p. 52.

²⁰² Cf. Leff et Rex 2003 pour une sélection d'articles clés sur le sujet.

²⁰³ Dans une analyse récente, Norton 2013 propose un argument général pour montrer l'impossibilité d'un démon nomologique de Maxwell, basé sur la mécanique statistique, en particulier sur une violation du théorème de Liouville. Alors que Hemmo et Shenker 2012 plaident pour la possibilité du démon, également basée sur la mécanique statistique, en particulier sur un volume d'espace de phase 'coarse grained'.

L'expérience de pensée du démon de Maxwell a alors été utilisée dans le but d'évaluer la deuxième loi, et surtout son maintien. Cette investigation visait à répondre (entre autres objectifs) aux deux questions suivantes : les violations spontanées et aléatoires de la deuxième loi pourraient-elles être accumulées pour produire des violations contrôlée ? Sinon, quelle est l'explication de cet échec ? En d'autres termes, pourrait-on concevoir des démons nomologiquement possibles, et si non, pourquoi ? Pour répondre à ces questions, on a proposé différentes expériences de pensée, simulations informatiques et expériences réelles²⁰⁴. Regardons comment ont été utilisées deux expériences de pensée.

6.3.2.1 La trappe de Smoluchowski

Marian von Smoluchowski (1912-1914) montre, à travers de nombreuses expériences de pensée, qu'il serait impossible pour un dispositif mécanique de manipuler des molécules comme il est demandé dans l'expérience de pensée de Maxwell. Son idée, désormais célèbre, est de diviser le conteneur contenant du gaz en deux, avec une trappe rendue asymétrique par un ressort (Figure 6.1). Cette dernière laisse passer uniquement les molécules rapides de la chambre gauche vers la chambre droite du conteneur et bloque le passage des molécules lentes. Les molécules les plus rapides s'accumulent alors dans une chambre et créent une différence de densité, qui peut être transformé en travail, et ce en violation de la deuxième loi de la thermodynamique .

Il est difficile de voir pourquoi ce mécanisme ne peut pas fonctionner comme une machine à mouvement perpétuel de seconde espèce. Néanmoins Smoluchowski conclut, au moyen d'une expérience de pensée ingénieuse et simple, qu'aucun travail ne sera produit.

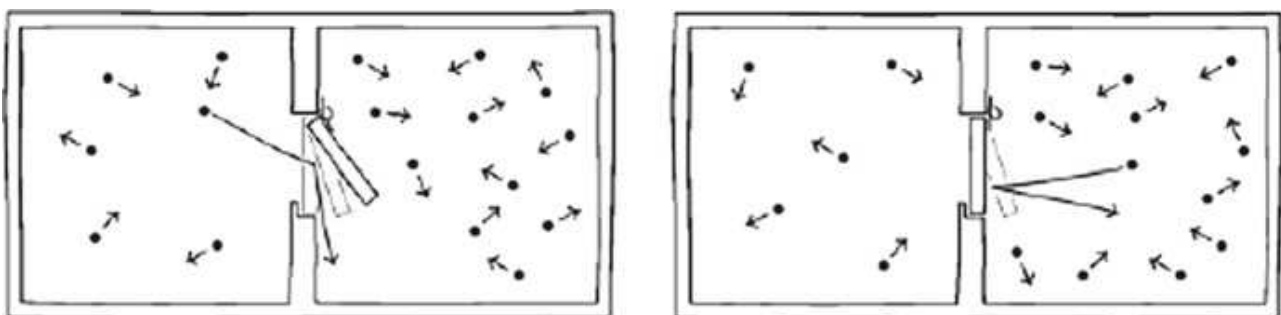


Figure 6.1 La trappe de Smoluchowski (Norton 2005)

²⁰⁴ Nous avons analysé dans El Skaf and Imbert (2013) ces trois méthodes d'investigation de démon mécanique et des explications de leur échec à fonctionner comme machine à perpétuel mouvement de seconde espèce.

Voici comment il raisonna : Étant donné que le mécanisme de la trappe dans la figure 6.1 est dans le même conteneur isolé de l'extérieur et contenant du gaz, et comme il doit être suffisamment léger pour permettre à des molécules de passer à travers la porte et pour empêcher les autres de passer dans le mauvais sens, il atteindra alors une énergie thermique élevée ; ainsi, *la trappe sera agitée par son propre mouvement brownien*. Par conséquent, elle s'ouvrira sans aucune collision et, au bout d'un certain temps, laissera passer des molécules dans la mauvaise direction, du réservoir de gauche vers celui de droite. Smoluchowski conclut que ce démon, ou processus mécanique, ne pourra pas fonctionner comme prévu. À partir de ce dispositif et de mécanismes imaginaires différents, Smoluchowski affirme :

«[I]l semble à l'heure actuelle que la construction d'une machine à mouvement perpétuel qui produit du travail en continu est exclue, *non par des difficultés purement techniques, mais par principe* »²⁰⁵ (C'est nous qui soulignons)

Ainsi, Smoluchowski conclut qu'un démon mécanique est nomologiquement impossible, est « exclu [...] par principe », et il affirme que :

« Les phénomènes de fluctuations moléculaires ne nous donnent aujourd'hui aucune raison de *rejeter complètement* la deuxième loi de la thermodynamique, comme nous en avons pour tant d'autres dogmes de la physique. Ils nous contraignent seulement à une formulation affaiblie, si nous exigeons pour les lois de la thermodynamique une validité universelle. »

Smoluchowski propose alors une telle formulation affaiblie de la deuxième loi :

« Un allongement apparemment tout à fait mineur de la formulation suffit peut-être, pour autant qu'on précise : 'Il ne peut y avoir aucun dispositif automatique qui produirait *continuellement* du travail utilisable aux dépens de la plus basse température' »²⁰⁶

²⁰⁵ “[I]t appears at present that the construction of a perpetual motion machine that produces work continuously is excluded not by purely technical difficulties, but as a matter of principle.” p. 4439 ; traduit par l’auteur ; cité dans Norton, 2013, All Shook Up: Fluctuations, Maxwell's Demon and the Thermodynamics of Computation, *Entropy* 2013, 15, 4432-4483.

²⁰⁶ “Molecular fluctuation phenomena today give us no reason to overturn completely the Second Law of thermodynamics, as we have so many other dogmas of physics. They compel us only to a weakened formulation, if we demand universal validity for the laws of thermodynamics. Perhaps an apparently quite minor extension of the wording suffices, in so far as one says: There can be no automatic device that would produce *continuously* usable work at the expense of the lowest temperature'. The brief version [of the Second Law] 'impossibility of a perpetual motion machine of the second kind' is even sufficient, for one has transferred the difficulty into the explication of the latter concept [Smoluchowski's emphasis].” Traduit par l’auteur, cité par Earman et Norton, 1998, p. 447.

Smoluchowski est ici explicite : un mécanisme nomologiquement possible aurait dû l'amener, comme Loschmidt, à « *rejeter complètement* la deuxième loi de la thermodynamique », ce que Maxwell, comme on l'a vu, n'entendait pas faire.

6.3.2.2 La roue à rochet et le cliquet de Feynman

Richard Feynman (1977) propose une expérience de pensée, basée sur un mécanisme différent, mais dans le même esprit que celui de Smoluchowski, celui de « la roue et du cliquet ».

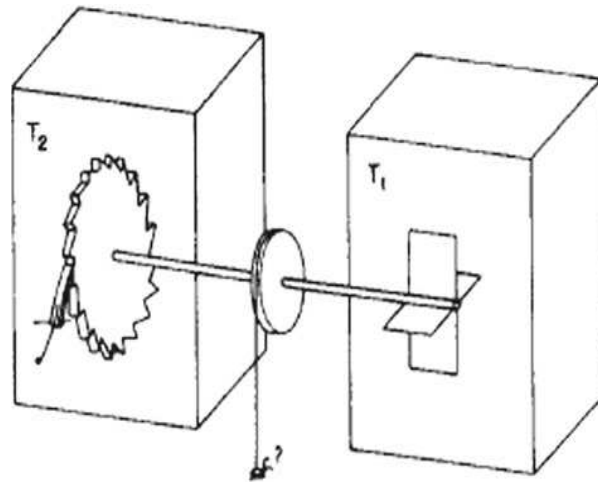


Figure 6.2 La roue et le cliquet (Feynman et al. 1977, 46-1, 1)

Regardons cette figure 6.2 ; à première vue le mécanisme est suffisamment décrit : le bombardement de particules sur les palettes dans le conteneur de droite peut faire tourner la poulie, qui se trouve à l'extérieur, dans les deux sens. Néanmoins, nous explique Feynman, à cause de la roue à rochet avec son cliquet dans le récipient de gauche, la poulie sera bloquée dans un sens et donc ne pourra tourner que dans un seul sens. Ainsi, si on attache un petit poids à l'extrémité d'un fil fixé à la poulie, une mouche par exemple, on aura alors produit du travail, grâce au bombardement des molécules sur les palettes dans le container de droite, et ce en contradiction avec la deuxième loi de la thermodynamique.

Feynman explique ensuite que cette conclusion n'est pas valide. Il explicite d'abord quelles idéalizations ne peuvent pas être permises :

« Premièrement, notre roue à rochet idéalisée est aussi simple que possible, mais même ainsi, il y a un cliquet, et il doit y avoir un ressort dans le cliquet. Le cliquet doit revenir après s'être dégagé d'une dent, de sorte que le ressort est nécessaire. »²⁰⁷

Il explicite ensuite un détail omis dans la description de son mécanisme, et aussi de la figure 6.2 :

« Une autre caractéristique de cette roue à rochet et du cliquet, non représentée sur la figure, est tout à fait essentielle. Supposons que le dispositif soit constitué de pièces parfaitement élastiques. Après le cliquet décolle de l'extrémité de la dent et est repoussé par le ressort, il va rebondir contre la roue et continuer à rebondir. Puis, quand une autre fluctuation est survenue, la roue pourrait tourner dans l'autre sens, parce que la dent pourrait passer en dessous pendant le moment où le cliquet était en l'air! Par conséquent, une partie essentielle de l'irréversibilité de notre roue est un mécanisme d'amortissement ou amortissant qui arrête le rebond. Lorsque l'amortissement se produit, bien entendu, de l'énergie qui se trouvait dans le cliquet passe dans la roue et se présente sous forme de chaleur. Donc, à mesure qu'elle tourne, la roue va devenir de plus en plus chaude. Pour rendre la chose plus simple, nous pouvons mettre un gaz autour de la roue de façon à prendre une partie de la chaleur. Quoi qu'il en soit, disons, le gaz ne cesse d'augmenter en température, ainsi que la roue. Cela durera-t-il éternellement ? Non ! Le cliquet et la roue, les deux à la même température T , ont aussi un mouvement brownien. Ce mouvement est tel que, de temps à autre, par accident, le cliquet se soulève d'une dent juste au moment où le mouvement brownien sur les palettes tente de faire tourner l'axe vers l'arrière. Et à mesure que le tout devient de plus en plus chaud, cela arrivera de plus en plus souvent. »²⁰⁸

Feynman explique ici qu'une partie essentielle de l'irréversibilité de cette roue est « un mécanisme d'amortissement ou amortissant qui arrête le rebond [du cliquet] ». Cela se traduit par une dissipation d'énergie sous forme de chaleur : le cliquet et le ressort se réchauffent et auront aussi un comportement aléatoire. Par conséquent, « de temps à autre, par accident, le cliquet se soulève d'une dent juste au moment où le mouvement brownien sur les palettes tente de faire tourner l'axe vers l'arrière. Et à mesure que le tout devient de plus en plus chaud, cela arrivera de plus en plus souvent. ». En supposant une fonction de distribution canonique, Feynman arrive enfin à la même

²⁰⁷ "First, our idealized ratchet is as simple as possible, but even so, there is a pawl, and there must be a spring in the pawl. The pawl must return after coming off a tooth, so the spring is necessary." Traduit par l'auteur, Feynman et al. 1977 *Op.cit.* 46-1.

²⁰⁸ "Another feature of this ratchet and pawl, not shown in the figure, is quite essential. Suppose the device were made of perfectly elastic parts. After the pawl is lifted off the end of the tooth and is pushed back by the spring, it will bounce against the wheel and continue to bounce. Then, when another fluctuation came, the wheel could turn the other way, because the tooth could get underneath during the moment when the pawl was up! Therefore an essential part of the irreversibility of our wheel is a damping or deadening mechanism which stops the bouncing. When the damping happens, of course, the energy that was in the pawl goes into the wheel and shows up as heat. So, as it turns, the wheel will get hotter and hotter. To make the thing simpler, we can put a gas around the wheel to take up some of the heat. Anyway, let us say the gas keeps rising in temperature, along with the wheel. Will it go on forever? No! The pawl and wheel, both at some temperature T , also have Brownian motion. This motion is such that, every once in a while, by accident, the pawl lifts itself up and over a tooth just at the moment when the Brownian motion on the vanes is trying to turn the axle backwards. And as things get hotter, this happens more often." *Ibid.*

conclusion que Smoluchowski : il montre, suite à un bref calcul, qu'il n'y a, en moyenne, pas de travail net effectué, et donc pas de violation de la deuxième loi de la thermodynamique.

6.3.2.3 Conclusion

On peut très bien analyser ces expériences de pensée ²⁰⁹ comme poursuivant l'investigation de la validité de la deuxième loi en imaginant des mécanismes nomologiquement possibles qui remplacent le démon de Maxwell, et en fournissant des explications de leurs échecs. Mais de là à les analyser comme critiquant cette expérience de pensée, comme semble l'affirmer Sorensen par exemple (*cf.* note 192 ci dessus), c'est une reconstruction anhistorique. Elle dénature aussi la fonction de ces expériences de pensée pour le scientifique. De plus, ces expériences de pensée ont réaffirmé la conclusion de Maxwell sur la nature statistique de la deuxième loi; c'est la fluctuation statistique qui explique l'impossibilité nomologique, « en principe » comme le souligne Smoluchowski, du démon.

C'est une chose de dire que la deuxième loi est valide uniquement lorsqu'on traite des molécules *en masse*, mais c'est est une autre de dire qu'elle pourra être violée ou qu'on doit complètement la rejeter, si un mécanisme nomologiquement possible peut séparer les molécules, pourvu qu'on se permette les idéalizations nécessaires. Dans le premier cas, on n'a pas besoin d'un démon nomologiquement possible pour affirmer que la deuxième loi doit s'appliquer aux phénomènes macroscopiques, et peut être violée au niveau moléculaire, *avec ou sans démon*²¹⁰. Tandis que dans le deuxième cas, on a besoin d'une meilleure description d'un tel processus pour évaluer sa possibilité nomologique et rejeter complètement la deuxième loi.

Concluons alors que dans le cas du démon de Maxwell, on n'est donc pas en présence d'un particulier et de sa dynamique qui permette d'aboutir à un processus dont la possibilité nomologique peut être déterminée ; à l'époque de Maxwell et même de nos jours, on ne trouve pas

²⁰⁹ Dans une certaine mesure aussi les expériences de pensée de Szilard ou de Bennett. Les deux postulent un coût entropique à l'acquisition ou à l'effacement de l'information et montrent qu'un démon intelligent capable de mesurer l'emplacement d'une molécule est nomologiquement impossible car il existe un coût entropique à l'acte de mesure ou dans l'effacement de l'information. Nous n'avons pas abordé ces expériences de pensée dans cette thèse, *cf.* Earman et Norton 1999 pour une critique de ces deux analyses de Szilard et Bennett et de la validité de leurs principes, qui attribuent un coût entropique à l'information.

²¹⁰ En fait Maxwell est explicite sur ce point : "If we go on to consider a finite number of molecules, even if the system to which they belong contains an infinite number, the average properties of this group, though subject to smaller variations than those of a single molecule, are still every now and then deviating very considerably from the theoretical mean of the whole system, because the molecules which form the group do not submit their procedure as individuals to the laws which prescribe the behaviour of the average or mean molecule. Hence the second law of thermodynamics is continually being violated, and that to a considerable extent, in any sufficiently small group of molecules belonging to a real body" Maxwell, 1878, dans Niven, 1965 *Op.cit.* pp. 670-671.

de consensus²¹¹. Maxwell ne le présentait pas non plus comme tel.²¹²

Examinons brièvement, avant de passer à la réponse de Bohr à Einstein, la fameuse expérience de pensée de Pierre-Simon Laplace, parue dans l'introduction de son *Essai philosophique sur les probabilités* (1814) :

« Nous devons donc 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. [...] Tous ces efforts dans la recherche de la vérité tendent à le rapprocher sans cesse [l'esprit humain] de l'intelligence que nous venons de concevoir, mais dont il restera toujours infiniment éloigné »

Ce démon nous rappelle, à certain égards, celui de Maxwell ; le particulier est bien cette « intelligence », sa dynamique est de « soumettre ces données à l'analyse », de sorte qu'on obtient un processus de calcul qui « embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome » et qui aboutirait à argumenter en faveur du déterministe : « rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux ». Nous n'entrerons pas ici dans les différentes analyses de l'impossibilité nomologique, en mécanique classique, relativiste ou quantique, de ce processus de calcul. Remarquons toutefois que dans cette expérience de pensée, le particulier et sa dynamique sont bien sous-décrits, mais aboutissent à un processus de calcul, que Laplace nous présente comme nomologiquement possible, et ce en partant de la première supposition, « Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre », ainsi que de la possibilité d'une capacité de calcul illimitée.

²¹¹ cf. les références dans la note de bas de page ci dessus sur les nouvelles analyses qui soutiennent une possibilité - Hemmo et Shenker - et une impossibilité - Norton.

²¹² Néanmoins le démon de Maxwell a été mal interprété. Ainsi P.W. Bridgman affirmait en 1941 dans le context de sa critique du démon de Maxwell : "If this possibility is seriously entertained [la séparation des molécules lentes des rapides], it throws the whole situation in thermodynamics wide open as far as practical consequences are concerned. For what does the practical man care by what method he produces perpetual motion of the "second kind" so long as he gets it? He would be perfectly willing to use as the instrument for getting it a culture of bacteria or an army of demons shut up in a box, provided with the proper marching orders invented.

If the Maxwell demon had been invented yesterday instead of in the last century I believe he would not have caused as much consternation. There are too many vital points that must be cleared up. In the first place, what is this "intelligence" that must be presupposed? Even if it need be nothing more than the ability to make automatically a selective response to the velocity and direction of the approaching molecules, such an ability involves some sort of mechanism, and this mechanism must have a minimum size and number of molecules and might well be so coarse as to make dealing with individual molecules impossible. I think we would not now be willing to assume such a mechanism unless we could give some suggestion as to how to construct it." P. W. Bridgman, *The nature of thermodynamics* Cambndee, Mass . : Harvard University Press, 1941, p. 156.

6.3.3 La réponse de Bohr : L'impossibilité nomologique du scénario de la boîte à photon d'Einstein

Selon les souvenirs de Bohr (*cf.* 2.3), Einstein a conçu l'expérience de pensée de la boîte à photons dans le but de montrer que la mécanique quantique est contradictoire (*cf.* 7.6 pour une analyse de l'autre interprétation de cette expérience de pensée, celle qui met en cause la complétude de la mécanique quantique). Il imagine une boîte remplie de photons, et dont l'un s'échappe par un trou qui peut être ouvert ou fermé par un obturateur déplacé au moyen d'une horloge au sein de la boîte. Puis il décrit brièvement deux processus de mesure simultanés sur la boîte : celui de la pesée et celui de la mesure du temps par l'horloge. Einstein conclut qu'on peut, en principe, déterminer simultanément le temps de passage du photon à travers la fente et son énergie, et ce avec un degré de précision arbitrairement grand, « en contradiction manifeste avec l'indétermination réciproque des quantités de temps et d'énergie dans la mécanique quantique »²¹³.

L'histoire continue, selon la littérature, par le triomphe de Bohr. Jammer nous raconte : «Après une nuit blanche passée à penser à cet argument [sic], Bohr releva le défi d'Einstein au moyen de sa propre théorie de la relativité générale »²¹⁴. On a déjà analysé, dans 2.3, comment Bohr rejette l'expérience de pensée d'Einstein et sa conclusion. Résumons : Bohr procède en précisant les procédures de la pesée et montre qu'elles impliquent que la boîte bouge dans un champ gravitationnel. Cela implique que la mesure du temps par l'horloge ne peut pas être précise, comme le soutenait Einstein, d'après sa propre théorie de la relativité. Cela signifie qu'en supposant que l'horloge est précise, Einstein est en train de décrire son comportement selon la théorie newtonienne, tandis que Bohr, en rejetant la précision de l'horloge, quand elle se retrouve en mouvement dans un champ gravitationnel, décrit son comportement selon la théorie relativiste.

On a bien les deux parties du scénario qui vont être précisées dans la version de Bohr : celle de la meilleure description des fonctionnements, ou des techniques, des processus, surtout celui de la pesée, et celle des théories qui les décrivent, et en particulier décrivent le fonctionnement de l'horloge. Reprenons la première petite partie de la longue analyse de Bohr (*cf.* 2.3) ; celui-ci affirme que :

²¹³ “in definite contradiction to the reciprocal indeterminacy of time and energy quantities in quantum mechanics.” Bohr 1949, *Op.cit.* p.226.

²¹⁴ “After a sleepless night over this argument Bohr rebutted Einstein's challenge with Einstein's own general theory of relativity”, Jammer 1974, *Op.cit.* p. 134. Traduit par l'auteur.

« Notre discussion a tourné autour de *la possibilité de l'utilisation* d'un appareil incorporant le dispositif d'Einstein »

La discussion de Bohr, que l'on suive sa longue citation ou son début ci-dessus, peut alors s'analyser directement comme rejetant la possibilité nomologique du scénario d'Einstein.

6.4 La dynamique de l'évolution des expériences de pensée

Ces expériences de pensée, celle de Maxwell et d'Einstein, et leur évolution, que ce soit dans la réponse de Bohr le lendemain ou dans l'expérience de pensée de Feynman un siècle plus tard, nous montrent clairement une certaine dynamique. Cette dynamique se trouve dans le passage des éléments décrits dans le scénario d'une expérience de pensée de l'arrière-plan vers le premier plan :

- *Dans l'arrière-plan* : les particuliers (le démon), leur dynamique (il ouvre et ferme une porte) *ne sont pas* suffisamment décrits : le scientifique les emploie dans le but d'aboutir à un processus (celui de la séparation des molécules lentes et rapides) dont la *possibilité nomologique reste indéterminée*. Le scientifique emploie ces processus s'il juge que leur possibilité nomologique ne doit pas être déterminé pour le but de l'expérience de pensée.
- *Au premier plan* : les particuliers et les processus sont suffisamment décrits pour qu'on puisse déterminer leur possibilité nomologique.

La dynamique de l'évolution d'une expérience de pensée se reflète dans le mouvement de ces particuliers et des processus obtenus de l'« *arrière-plan* » - où leur possibilité nomologique est assumé (les procédures de la pesée et de la mesure du temps dans la boîte à photon d'Einstein) ou ignoré (le mode de fonctionnement du démon de Maxwell) - vers le « *premier plan* » - où leur possibilité nomologique doit être déterminé (les procédures de la pesée et de la mesure du temps dans la boîte à photon de Bohr). Quand « on juge » qu'ils doivent passer au premier plan, on offre une meilleure description de leur fonctionnement et on explicite les théories qui les décrivent. Ce jugement dépend de la conclusion que l'on veut tirer de l'expérience de pensée.

C'est ce qui se passe dans la réponse de Bohr et dans les expériences de pensée de Smoluchowski ou de Feynman. La différence entre ces deux dynamiques est que dans le premier cas, Bohr juge que les processus ne sont pas suffisamment décrits et donc doivent passer au premier

plan pour qu'on puisse évaluer l'expérience de pensée d'Einstein et sa conclusion. Bohr spécifie alors les processus de mesure dans le scénario, et montre ainsi que ce dernier est nomologiquement impossible, en faisant usage de la théorie de la relativité générale. Dans le second cas, celui du démon de Maxwell, on offre une meilleure description du mécanisme pour répondre à d'autres questions que celle de Maxwell. Ces processus sont alors amenés au premier plan pour permettre de voir si on doit rejeter complètement la deuxième loi, comme le dit explicitement Smoluchowski.

Enfin, Feynman met également en lumière cette dynamique et le passage de l'arrière-plan au premier plan :

« Essayons d'inventer un dispositif qui violera la deuxième loi de la thermodynamique [...]. Maintenant, nous demandons si celui-ci est possible. Selon l'hypothèse de Carnot, il est impossible. Mais *si nous nous contentons de le regarder*, nous voyons, *à première vue, qu'il semble tout à fait possible. Donc, nous devons regarder de plus près.* En effet, si l'on regarde la roue à rochet et le cliquet, nous voyons un certain nombre de complications. » (C'est nous qui soulignons)²¹⁵

Feynman explique ici pourquoi le passage de *l'arrière-plan* au *premier plan* est nécessaire, sinon « *si nous nous contentons de le regarder*, nous voyons, *à première vue, qu'il semble tout à fait possible.* » Et si l'on regarde « de plus près », on va « trouver des complications » qui montrent que ce scénario est nomologiquement impossible et que la violation de la deuxième loi ne se produit pas.

Faisons encore un parallèle entre deux démons, pour souligner la différence entre ces deux types de scénarios : le démon de Maxwell et le démon, ou l'être, d'Einstein (*cf.* section 3.5). Il est clair que l'être qui tire l'ascenseur d'Einstein *ne rend pas* la possibilité nomologique du scénario *indéterminée*, même s'il est sous-décrit et se trouve donc dans l'arrière-plan. Cet être, ou démon, contrairement au démon de Maxwell, est remplaçable par un mécanisme ou processus nomologiquement possible. Il peut être remplacé par exemple par une fusée qui va accélérer l'ascenseur loin de tout champ gravitationnel et peut être décrit par des théories, lois et principes, dans ce cas la troisième loi de Newton, selon laquelle à toute action correspond une réaction égale et de direction opposée. Ainsi, si l'on offre une meilleure description, alors la fusée et les théories qui décrivent son fonctionnement passeront au premier plan, mais il est clair que ce n'est pas nécessaire. Cette dernière expérience de pensée est donc bien nomologiquement possible.

²¹⁵ “Let us try to invent a device which will violate the Second Law of Thermodynamics, [...] Now let us ask if this is possible. According to Carnot’s hypothesis, it is impossible. But if we just look at it, we see, *prima facie*, that it seems quite possible. *So we must look more closely.* Indeed, if we look at the ratchet and pawl, we see a number of complications.” Feynman et al. *Op.cit* 46-1.

Dans le cas du démon de Maxwell en revanche, la question de pouvoir substituer au démon un mécanisme ou processus quelconque, capable de séparer les molécules lentes des rapides, reste une question ouverte même jusqu'à nos jours. Pire, la plupart des analyses du XX^e siècle soutiennent son impossibilité nomologique. Ainsi le scénario de Maxwell se fonde sur un particulier essentiel qui fournit un processus de séparation des molécules *dont la possibilité nomologique reste au moins indéterminée, au pire nomologiquement impossible quand on essaye de proposer une meilleure description.*

Enfin, dans l'expérience de pensée du démon de Laplace, tout reste dans l'arrière-plan, tandis que Laplace suppose la possibilité nomologique de son « intelligence ». Pour ce dernier, aucune théorie, loi ou principe n'entrave le processus de calcul. Maintenant cette expérience de pensée peut être spécifiée en ramenant tout au premier plan ; l'intelligence devient alors un ordinateur et les conditions initiales précisées, et les théories qui fournissent les « formules » à cet intelligence seront aussi explicitées dans les algorithmes. De cette façon, on peut rejeter la conclusion de Laplace dans le cadre de plusieurs théories, de la mécanique classique à la mécanique quantique. Ce sont bien les idéalizations et les suppositions dans cette expérience de pensée qui sont problématiques.

La question qui se pose maintenant est de savoir pourquoi, dans l'expérience de pensée du démon, cette prétendue impossibilité nomologique ne change en rien la conclusion de Maxwell, tandis que dans le cas de la boîte à photon, la conclusion d'Einstein est rejetée par Bohr exactement pour la raison que son scénario est jugé nomologiquement impossible. La réponse doit être maintenant claire, et elle sera explicitée dans 7.4 : elle réside dans la fonction de l'expérience de pensée, et donc dans la conclusion que les différents scientifiques en tirent.

6.5 Conclusion

Puisque dans le cas du démon de Maxwell un processus sous-décrit, dont la possibilité nomologique reste indéterminée, *est suffisant*, la thèse de possibilité nomologique *est alors trop restrictive*. Ainsi les approches exposées dans 6.2, comme celle des modèles mentaux de Nersessian ou les approches expérimentales de Laymon ou Sorensen, dénaturent ce qui se passe dans certaines expériences de pensée. Ces approches ne sont pas *assez générales* pour inclure toutes les expériences de pensée, même scientifiques. Aussi, contrairement à l'affirmation et la supposition de Kuhn, certaines

situations peuvent être « peu familières ou étranges ». Le scientifique est, dans certain cas, libre d'imaginer des scénarios si étranges que même leur possibilité nomologique reste indéterminée.

On peut aussi rejeter explicitement l'idée que le démon de Maxwell fait partie d'une expérience de pensée. C'est ce que Nersessian semble penser lors du congrès de la *Philosophy of Science Association* en 1992. C'est aussi ce que nous dit Ian Hacking :

« Je suis réticent à appeler le démon de Maxwell partie d'une expérience de pensée . Il fait partie d'une fiction [fantasy]. Ici, je suis d'accord avec *Nersessian*, qui m'a fait remarquer qu'il est difficile de voir ce qui est expérimental dans le démon. Peut-être est-ce uniquement un outil rhétorique pour renforcer l'analyse statistique de Maxwell. *Le démon, pour moi, ne prouve même pas la possibilité de quoi que ce soit.*[...] Mais est-ce une expérience de pensée ? [...] Le problème, si on fait du démon de Maxwell une expérience, est qu'on ne peut pas réaliser celle-ci, même si on se permet toutes les fictions et idéalizations. » (C'est nous qui soulignons.)²¹⁶

La remarque de Nersessian, durant ce congrès montre bien la thèse de possibilité nomologique, « *il est difficile de voir ce qui est expérimental dans le démon* ». Comme c'est une expérience de pensée et non pas une expérience réelle, « voir ce qui est expérimental » doit nécessairement référer à certaines théories, loi et principes. L'analyse de Hacking, arrive à la conclusion que le démon est un « outil rhétorique », sans qu'il ne fournisse plus de détails à ce sujet. Aussi il ajoute « Mais est-ce une expérience de pensée ? »

Pour décider si c'en est une, il faut proposer une approche des expériences de pensée, et c'est ce que nous allons entreprendre dans le chapitre 7. Il faut néanmoins noter la difficulté pour ces approches à considérer le démon de Maxwell comme une expérience de pensée, surtout en cohérence avec leur thèse commune de possibilité nomologique, même si certaines l'on analysé comme tel (*cf.* Sorensen 1992 p. 142).

Pour notre part, à ce stade nous pouvons au moins dire que c'est une expérience de pensée avec une fonction d'exploration théorique propre, c'est à dire concernant la nature statistique de la deuxième loi. C'en est une dans la mesure où elle est traitée comme telle dans la littérature. Elle en est une aussi parce qu'elle a permis une exploration théorique sur les fondements de la mécanique

²¹⁶ I resist calling Maxwell's demon part of a thought experiment. It is part of a fantasy. Here *I agree with Nersessian*, who has remarked to me that it is hard to see what is experimental about the demon. Perhaps it is only a rhetorical device to reinforce Maxwell's statistical analysis. The demon does not, for me, prove even the possibility of anything. [...] But is it a thought experiment? [...]The problem with Maxwell's demon *as an experiment* is that you can't conduct it at all, no matter how much fantasy and idealization you allow yourself." Traduit par l'auteur, p. 302-303 Ian Hacking 1992, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. 1992, Volume Two: Symposia and Invited Papers*, pp. 302-308.

statistique et sur le statut de la deuxième loi, et ce jusqu'à nos jours²¹⁷. Enfin, elle en est une également parce que son scénario permet, et a permis, en faisant passer les particuliers et leur dynamique de l'arrière-plan vers le premier plan, de poser différentes questions.

Ces cas d'études, analysés en termes de leur possibilité nomologique, nous permettent aussi de tirer quelques leçons sur les deux approches de Brown et de Norton, mais surtout sur celle de Norton. Même si tous deux n'abordent pas explicitement ces notions de possibilité, leur approche peuvent facilement s'adapter et inclure ces différentes notions :

Concernant Norton, c'est sa notion de particuliers éliminables qui resurgit. Notre analyse dans 6.3.3 souligne encore une fois que nous devrions analyser le rôle et la place des particuliers, compris comme particuliers fictifs et processus, dans le scénario de chaque expérience de pensée. Le démon de Maxwell, en particulier, soulève les questions suivantes : Si l'EP-argument contient une prémisse qui décrit le démon, ou le processus qui en résulte, alors quelle sera sa valeur de vérité ? Aura-t-on un argument valide ou correct ('sound') pour cette « bonne » expérience de pensée ? Si l'argument ne contient pas de démon, alors comment peut-on l'écrire, et surtout aura-t-il la même fonction ? Cette dernière question se pose surtout vis-à-vis de l'évolution de cette expérience de pensée.

Quant à Brown, il analyse brièvement l'expérience de pensée du démon de Maxwell de la façon suivante, peut-être sans vraiment y adhérer : « Dans un sens, l'approche de Norton convient parfaitement pour cet exemple. Nous commençons avec la théorie statistique et nous dérivons la version probabiliste de la seconde loi ; nous avons donc un raisonnement déductif. Et le démon, comme le dit Norton, est un "particulier [qui est] non pertinent pour la généralité de la conclusion." En fait, le démon est tout à fait inutile; nous pouvons tirer la conclusion sans l'invoquer du tout. »²¹⁸ Nous doutons que Norton soit d'accord avec cette analyse, d'autant plus que le démon ne nous dit rien sur la version « probabiliste » de la deuxième loi, mais ça c'est une autre histoire !

²¹⁷ Sur le rôle toujours aussi important du démon de Maxwell dans les questions sur le fondement de la mécanique statistique, Cf. entre autre Hemmo et Shenker (2012) et Myrvold (2011).

²¹⁸ "In one sense, Norton's account fits this example perfectly. We start with the statistical theory and we derive the probabilistic version of the second law; so we have a deductive argument. And the demon, as Norton says, is a "particular [which is] irrelevant to the generality of the conclusion." In fact, the demon is utterly unnecessary; we can derive the conclusion without invoking it at all." Brown 1991 *Op.cit.* p.271.

Chapitre 7

La structure des expériences de pensée scientifiques

7.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous allons proposer une analyse originale de la structure des expériences de pensée scientifiques, afin d'en proposer une approche épistémologique directe, c'est-à-dire non réductrice :

Dans la section 7.2, nous proposerons d'analyser la structure générale des expériences de pensée scientifiques en cinq étapes. La structure que nous identifions permet de comprendre comment un scientifique utilise son expérience de pensée pour répondre à une question d'ordre théorique.

Dans la section 7.3, nous exposerons les deux dernières étapes de cette structure en reprenant les cas présentés dans la partie I. Cela nous conduira à mettre au jour le mécanisme interne de chacune des expériences de pensée qui ont été examinées et d'autres qui seront étudiées dans la section 7.6. Cette structure se veut générale et identifiante. Générale, parce qu'elle permet de représenter toutes les expériences de pensée scientifiques. Identifiante, parce qu'elle permet d'identifier les différentes parties d'une expérience de pensée et leurs relations et autorise ainsi à décider si on est en présence d'une ou de plusieurs expériences de pensée dès lors qu'on modifie son scénario.

²¹⁹ "An imaginary experiment should be judged on its specific purpose." traduit par l'auteur p. 331 Sheldon Krimsky, 1973, The use and misuse of critical Gedankenexperimente, *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, 4: 323–334.

Dans la section 7.4, nous montrerons que notre approche, par le biais de la structure proposée, nous permettra de suggérer une nouvelle méthode de justification des conclusions des expériences de pensée. Cette méthode nous permettra d'apprécier les expériences de pensée comme des outils scientifiques autonomes et fiables. Nous soutiendrons que c'est en analysant la notion de possibilité impliquée dans le scénario, le résultat de l'expérience de pensée et la conclusion qu'en tire le scientifique, qu'il est possible de dire comment celui-ci argumente en faveur de sa conclusion et de décider s'il est justifié qu'il le fasse.

Dans la section 7.5, nous présenterons le débat entre Bishop et Norton sur l'identité des expériences de pensée, qui s'appuie sur l'interprétation de l'expérience de pensée de la boîte à photons en termes de cohérence. Nous concluons que la structure que nous proposons est compatible avec la suggestion de Bishop selon laquelle on est en présence de deux scénarios d'une même expérience de pensée.

Dans la section 7.6, nous analyserons l'évolution de cette expérience de pensée dans les années 1930. Nous présenterons à partir de l'analyse historique de Don Howard, différente utilisation et réutilisation de la boîte à photons. Cette analyse montre comment certain changement dans le scénario peuvent affecter différemment le résultat du scénario et la conclusion de l'expérience de pensée, de tel sorte qu'on aboutit à une ou plusieurs expériences de pensée.

Enfin, pour que le lecteur se repère plus facilement, nous présenterons un résumé de la structure et de la notion de possibilité impliquée dans chaque expérience de pensée, dans deux tableaux ; dans le premier nous exposerons la structure de chaque expérience de pensée analysée dans cette thèse. Dans le second tableau, nous exposerons la structure des différentes expériences de pensée selon la notion de possibilité de leur scénario.

7.2 La structure générale des expériences de pensée

Nous avons vu tout au long de notre analyse des approches existantes les lacunes des approches dites indirectes, celle qui réduisent les expériences de pensée à d'autres outils scientifiques, comme les expériences réelles (Sorensen et Laymon), les modèles mentaux (Nersessian) et les arguments logiques (Norton).

Suite au constat de ces lacunes et de la richesse de chaque expérience de pensée, il nous semble qu'une épistémologie directe est plus que souhaitable. C'est encore plus clair quand on analyse, comme on a essayé de le faire dans cette thèse, les différents cas sans aucun engagement épistémologique préalable, mais plutôt en mettant en relief les différentes fonctions que leurs auteurs leur ont conférées, leur histoire, leur contexte scientifique et leur dynamique d'évolution.

Bien sûr, l'approche de Brown peut être considérée comme directe, mais la fonction platonicienne et la justification basée sur une prétendue perception platonicienne des lois de la nature nous semblent pour le moins énigmatiques. En outre, son exemple canonique de la fonction platonicienne des expériences de pensée, à savoir l'expérience de pensée de la tour de Pise, est réfuté par notre analyse historique (*cf.* chapitre 5).

Nous procéderons différemment et analyserons le mécanisme interne des expériences de pensée, au moins de celles qui ont été examinées dans la partie I. Nous proposerons une structure générale permettant de comprendre comment fonctionnent les expériences de pensée. Cette structure est une caractéristique nécessaire mais *pas* suffisante des expériences de pensée, en ce sens que certaines expériences réelles et simulations numériques peuvent également être analysées grâce à elle²²⁰. Néanmoins, la caractéristique du scénario d'une expérience de pensée est qu'il peut contenir des particuliers nomologiquement possibles, tels que définis dans le chapitre 6, ainsi que des particuliers qui ne sont pas déterminés dans le détail de sorte que leur possibilité nomologique reste indéterminée.

Selon la structure en cinq étapes que nous proposons, le scientifique commence par énoncer, implicitement ou explicitement, une question théorique cible. Et, dans la mesure où une partie de la recherche scientifique vise à répondre à des questions d'ordre théorique, les expériences de pensée font partie de la boîte à outil du scientifique. Cette dernière est riche et contient plusieurs outils : les arguments logiques, les simulations informatiques, les expériences réelles, les analyses analogiques et statistiques, et tant d'autres. Sans entrer dans le débat général visant à réduire certains de ces outils à d'autres, nous proposons ici de regarder l'expérience de pensée comme un outil autonome, qui sert à répondre à une question cible et dont on peut analyser le mécanisme selon le schéma suivant :

1. *Question(s) cible(s)* : Le scientifique identifie une, ou plusieurs, questions et utilise son expérience de pensée dans le but de fournir une, ou plusieurs réponses. Pour répondre, le scientifique décrit un scénario, le déroule dans son esprit, arrive à un résultat. Enfin, en raisonnant sur le scénario et son résultat, il arrive à la conclusion de l'expérience de pensée, qui est la réponse à la, ou aux questions cibles.

²²⁰ *Cf.* El Skaf et Imbert 2013 pour une analyse détaillée de ces trois outils dans le cadre de scénario nomologiquement possible. Spécifiquement avec le cas d'étude de démon de Maxwell nomologiquement possible instancié en expériences de pensée (comme ceux du chapitre 6), en simulation et en expérience réelle.

2. *Scénario* : Le scénario d'une expérience de pensée décrit une série de processus ou d'événements que le scientifique conçoit, puis raconte dans une histoire imaginaire. L'histoire a un début et une fin précises et contient une configuration expérimentale. Le scénario contient des éléments particuliers variés qui vont d'objets réalistes (deux pierres) ou fictifs (un démon) à des instruments (une horloge) ou des personnages (un physicien). Des idéalizations (une porte sans masse, la résistance du milieu est nulle). Le scientifique conçoit certaines règles ou instructions que les particuliers suivent, comme ouvrir une porte, jeter une pierre, faire des expériences dans un ascenseur, peser une boîte. Le scénario contient aussi les théories, lois et principes qui sont supposés être vrais en son sein. Ces derniers peuvent être implicites ou explicites, la seule contrainte étant que le tout soit cohérent ; ainsi ne peut-on pas supposer comme vraies la loi de Galilée et celle d'Aristote dans le même scénario.

Un scénario décrit alors une partie théorique et une partie « technique », qui concerne les particuliers, leur dynamique et les processus en jeu.

a- Théories, lois et principes assumés : Théorie d'Aristote, la mécanique quantique (la fonction d'onde ψ), le principe de Heisenberg, la théorie de relativité, la mécanique classique, la deuxième loi de la thermodynamique, la théorie cinétique.

b- Processus mécaniques ou naturels : procédure de la pesée, désintégration radioactive.

c- Particuliers : Deux mobiles de même matière, un démon, un chat, des instruments de mesures, une machine imaginaire.

d- Dynamique de ces particuliers, notamment de ceux qui sont fictifs : le démon ouvre la porte sans masse, l'être d'Einstein tire l'ascenseur, la machine imaginaire est capable d'inverser l'ordre temporel.

e- Ces particuliers et leur dynamique aboutissent à des processus nomologiquement possibles, indéterminés ou impossibles : l'être d'Einstein fait accélérer l'ascenseur comme le fait une fusée (possible), le démon de Maxwell sépare les molécules lentes des rapides (indéterminé), le processus d'inversion du temps (impossible).

f- Idéalizations : une porte sans masse, la résistance du milieu est nulle.

3. *Déroulement du scénario* : Le déploiement du scénario (*unfolding* en anglais), c'est le processus mental du scientifique ou du lecteur, qui en est responsable. C'est le processus mental, et non les

processus décrits dans le scénario. C'est un processus analogue à ce qui se passe dans un ordinateur lors de l'exécution d'un algorithme²²¹.

4. *Resultat(s) du scénario (RS)* : Si le déroulement mental du scénario se fait correctement, on obtient alors un résultat, c'est le RS. Dans une expérience de pensée, le RS est en quelque sorte l'analogue de la fin d'une histoire, mais pas la leçon de cette histoire. Cette dernière est la conclusion de l'expérience de pensée.

5. *Conclusion(s) de l'expérience de pensée (CEP)* : Le résultat du scénario n'est pas la conclusion de l'expérience de pensée ; il faut le distinguer de la CEP. Cette dernière est en général la réponse à la question cible. On verra dans les deux sections suivantes qu'on arrive à la CEP et qu'on est en mesure de la justifier en prenant en considération les différentes notions de possibilité impliquées dans le scénario, le RS, et en fournissant quelques arguments, en particulier concernant la situation décrite dans ce dernier.

Ainsi, afin de répondre à la question cible, le scientifique nous amène à considérer un scénario précis. Ce scénario est une description de particuliers et de leur dynamique et de processus naturels ou mécaniques. À la suite des processus mentaux déployés par le scientifique, on obtient un résultat. Enfin la dernière étape qui fournit la CEP est normalement implicite dans l'expérience de pensée, et nous l'explicitons dans la section 7.4 afin de montrer comment une expérience de pensée justifie sa conclusion lorsque c'est bien le cas. Mais examinons auparavant la structure des sept cas étudiés dans la partie I.

7.3 Du RS à la CEP : Les cas d'étude

Nous exposerons dans cette section les deux dernières étapes, surtout le passage du RS à la CEP, des sept expériences de pensée de la partie I. Les autres parties de la structure sont facilement reconnaissables, et directement transposables à partir du texte de chaque expérience de pensée.

1- La tour de Pise de Galilée :

RS de Galilée : Le mobile composé chute plus rapidement et plus lentement que le mobile le plus lourd.

²²¹ Notons, que nous employons cette analogie uniquement dans un but de clarification et nous ne souhaitons aucunement soutenir que les processus mentaux sont des processus computationnels.

Du RS à la CEP : Le RS décrit une situation absurde car un mobile ne peut pas être à la fois, plus rapide et plus lent qu'un même autre.

CEP de Galilée : Le premier principe de la théorie d'Aristote est faux ; le poids absolu ne peut pas causer une quelconque différence de vitesse de chute.

2- Le chat de Schrödinger :

RS de Schrödinger : Le chat se trouve dans un état mort et vivant avant qu'on ouvre la boîte et qu'on observe.

Du RS à la CEP : Le RS décrit une situation absurde; un chat ne peut pas être à la fois mort et vivant.

CEP de Schrödinger : La mécanique quantique est incomplète au sens où la fonction ψ n'offre pas une description complète de la réalité, car c'est bien de cette complétude que le RS découle.

3- La boîte à photons d'Einstein (selon l'interprétation contre la cohérence de la mécanique quantique rapportée par Bohr en 1949) :

RS d'Einstein : Il est possible de déterminer simultanément les deux variables complémentaires de temps et d'énergie du photon en effectuant les deux mesures simultanées sur la boîte.

Du RS à la CEP : Le RS décrit une situation qui doit être nomologiquement impossible selon le principe de Heisenberg.

CEP d'Einstein : La mécanique quantique est contradictoire.

4- Le Démon de Maxwell :

RS de Maxwell : Les molécules lentes sont dans A et les rapides sont dans B

Du RS à la CEP : Le RS décrit une situation nomologiquement possible sous une théorie (la théorie cinétique) mais qui doit être nomologiquement impossible selon une seconde (la thermodynamique, sa deuxième loi).

CEP de Maxwell : La deuxième loi de la thermodynamique s'applique aux molécules prises en masse ; elle est de nature statistique. Maxwell réfute aussi l'interprétation dynamique de la deuxième loi.

5- L'Ascenseur d'Einstein :

RS d'Einstein : On ne peut pas différencier, par l'observation, la chute des corps dans un référentiel en accélération uniforme loin d'un champ gravitationnel, de la chute de ces mêmes corps dans un

référentiel au repos dans un champ gravitationnel homogène.

Du RS à la CEP : Le RS décrit une situation qui est nomologiquement inexistante, au sens où l'on n'a aucune théorie qui décrive cette équivalence. Pire, la théorie newtonienne, avec la notion de mouvement absolu, offre deux descriptions théoriques différentes des deux référentiels observationnellement identiques.

CEP d'Einstein : La notion du mouvement absolu est rejetée et Einstein postule une équivalence entre un référentiel en accélération uniforme loin de tout champ gravitationnel et un référentiel dans un champ gravitationnel homogène au repos. Cela devient le postulat de la nouvelle théorie de la relativité générale.

6- Les jumeaux de Langevin :

RS de Langevin : Chacun des frères est plus âgé et moins âgé que l'autre.

RS à la CEP : Le RS décrit une situation absurde, un homme ne peut être à la fois plus âgés et plus jeunes qu'un autre. Suite à la bonne application de la relativité restreinte, en particulier la bonne application du principe de la relativité du mouvement, le RS ne s'obtient plus ; c'est bien le jumeau voyageur qui reviendra plus jeune que son frère sédentaire.

CEP de Langevin : Il n'y a plus d'absurdité quand on expose l'application correcte de la théorie de la relativité restreinte, le paradoxe disparaît.

7- Le canon de Newton :

RS de Newton : Le projectile tiré d'une hauteur précise avec une vitesse précise effectue le même mouvement orbital que celui de la Lune.

Du RS à la CEP : Le RS décrit une situation nomologiquement possible selon la nouvelle théorie proposée par Newton.

CEP de Newton : La théorie newtonienne décrit les phénomènes terrestres et célestes avec les mêmes lois. Elle se trouve exposée clairement dans un exemple simple.

7.4 Justification des CEP

Chaque structure ci-dessus met en évidence la façon dont chaque expérience de pensée mène à sa conclusion. Cette structure, et en particulier le passage du RS à la CEP, sont implicites dans chaque expérience de pensée. Néanmoins, ces notions de possibilité, le RS et la conclusion sont facilement reconnaissables dans chaque narration exposée dans la partie I. Maintenant la question est de savoir si le scientifique peut légitimement soutenir sa conclusion.

Pour répondre à cette question et offrir des critères généraux de justification de chaque CEP, nous allons diviser les expériences de pensée qui utilisent un scénario nomologiquement possible, et celles qui ne le font pas.

7.4.1 Scénarios nomologiquement possibles

Commençons par regarder le cas des expériences de pensée dont le scénario est nomologiquement possible. Le scientifique, pour passer d'un RS à une CEP, va analyser le RS qui découle du déroulement de son scénario, et le comparer à la situation décrite dans ce RS. Alors on a deux cas de figure :

1. *Le RS s'obtient à partir du déroulement d'un scénario nomologiquement possible, mais ce RS décrit une situation nomologiquement impossible.*

Dans les expériences de pensée de ce premier cas de figure, l'expérimentateur en pensée vise à :

A- Rejeter la théorie :

Avec l'expérience de pensée de la boîte à photons utilisée contre la cohérence de la mécanique quantique, Einstein, contrairement à Bohr, rejette l'impossibilité nomologique énoncée par le principe de Heisenberg, l'impossibilité de déterminer les deux variables de temps et d'énergie pour le photon. Einstein rejette donc la théorie (la mécanique quantique). Le RS est obtenu à partir du déroulement d'un scénario nomologiquement possible, mais ce RS décrit une situation nomologiquement impossible selon le principe de Heisenberg. Comme le scénario se situe dans le domaine de la mécanique quantique, Einstein arrive à la CEP selon laquelle la mécanique quantique est contradictoire, puisqu'elle permet de soutenir une proposition - il est impossible de déterminer simultanément deux variables complémentaires de temps et d'énergie du photon - et sa négation - il est possible de déterminer simultanément les deux variables complémentaires de temps et d'énergie du photon. Ainsi, l'expérience de pensée d'Einstein lui donne la justification de sa CEP dans la mesure où le scénario est nomologiquement possible.

Dans les expériences de pensée de ce premier cas de figure, l'expérimentateur en pensée peut aussi viser à :

B- Explorer une théorie, tout en rejetant une autre :

Avec l'ascenseur, Einstein rejette l'impossibilité d'une différentiation nomologique des deux référentiels, en particulier celle obtenue par la notion de mouvement absolu de Newton. Le RS décrit une situation nomologiquement impossible selon la théorie de Newton car la notion de mouvement absolu permet de faire la différentiation entre les deux référentiels décrits dans le scénario. Néanmoins, son expérience de pensée vise principalement à proposer un nouveau principe qui sera un postulat de sa future théorie de relativité générale, huit ans après. Ce principe d'équivalence rend la situation décrite dans le RS nomologiquement possible.

Avec l'expérience de pensée du canon, Newton rejette l'explication fournie par « les anciens » qui fait appel aux orbites et qui rend la situation décrite dans le RS nomologiquement impossible. Néanmoins, la fonction principale de cette expérience de pensée est d'exposer la théorie avec un exemple simple ; la théorie de Newton rend la situation décrite dans le RS nomologiquement possible.

Le défenseur de la théorie visée peut alors :

C- Nier que le RS découle du scénario :

Dans sa réponse à Einstein, Bohr rejette la possibilité du scénario d'Einstein : il montre qu'Einstein n'aurait pas dû rejeter l'impossibilité nomologique décrite par le principe de Heisenberg et soutenir que la mécanique quantique est contradictoire. Bohr montre que le RS d'Einstein ne découle pas du scénario en précisant l'impossibilité nomologique du processus de la pesée sans introduction d'un champ gravitationnel dans le scénario d'Einstein, et donc l'impossibilité de mesurer le temps et l'énergie simultanément et avec une précision arbitraire. C'est-à-dire qu'il montre qu'on ne peut pas faire les deux mesures simultanément sur la boîte avec une précision arbitraire. Le scénario d'Einstein est alors nomologiquement impossible et son RS ne découle plus du scénario, puisqu'il est nomologiquement impossible de faire les deux mesures sur la boîte. Bohr conclut donc que la mécanique quantique n'est pas montrée contradictoire par l'expérience de pensée d'Einstein.²²²

D- Rejeter les idéalizations :

On peut très bien imaginer l'aristotélicien des *Discours* rejeter l'idéalisation du milieu, sans pour autant sauver sa théorie, car comme le note Koyré, Galilée aurait eu recours à un autre argument, celui de l'oeuf de poule et de l'oeuf de marbre (cf. 5.4.2).

²²² Cf. aussi l'analyse de Krimsky de la boîte à photons, en terme d'inconsistance externe, 1973 pp. 328-330.

Le critique du nouveau postulat soutenu peut aussi :

E- Rejeter les idéalizations :

Norton nous explique la réaction de certains contemporains d'Einstein face à son expérience de pensée de l'ascenseur : « Même admettre que l'opacité de l'ascenseur n'est pas essentielle est attaquant. Une façon dont les contemporains d'Einstein ont cherché à réfuter son argument était de soutenir que les champs gravitationnels ont toujours une source, alors que les champs d'inertie n'en ont jamais. Ainsi l'équivalence observationnelle des deux cas pourrait dépendre essentiellement du fait que l'observateur n'est pas en mesure de vérifier s'il y a une masse source du champ en question ou non. »²²³

2. *Le RS s'obtient à partir du déroulement d'un scénario nomologiquement possible, mais ce RS décrit une situation absurde.*

Dans les expériences de pensée de ce second cas de figure, l'expérimentateur en pensée peut :

F - Rejeter la théorie :

Dans l'expérience de pensée de la tour de Pise, Galilée rejette le premier principe de la théorie d'Aristote qui permet d'aboutir au RS absurde selon lequel un mobile peut être à la fois plus rapide et plus lent qu'un autre.

Dans l'expérience de pensée du chat, Schrödinger rejette la complétude de la mécanique quantique qui permet de décrire le chat comme mort et vivant avant l'observation.

G- Exposer la bonne application de la théorie :

Dans l'expérience de pensée des jumeaux, Langevin rejette la mauvaise application de la relativité restreinte qui permet d'aboutir au RS absurde selon lequel chacun des frères est à la fois plus âgé et moins âgé que l'autre. Lorsqu'on applique correctement la relativité restreinte, le RS ne découle plus du déroulement du scénario.

²²³ “Even allowing that the opaqueness of the chest is inessential is challengeable. One way in which Einstein's contemporaries sought to refute his argument was to insist that gravitational fields always have sources, but inertial fields never do. Thus the observational equivalence of the two cases could depend essentially on the observer not being able to check whether the field in question has source masses or not.” Traduit par l'auteur, Norton, 1991, *Op.cit.* p. 138.

Le défenseur de la théorie a alors deux options :

H- *Soit nier que le RS découle du scénario*

La réponse de Bohr à Schrödinger (ainsi que sa réponse à la version de la boîte à photons dirigée contre l'incomplétude de la mécanique quantique, cf. 7.6.2.2) : En faisant usage de la notion de complémentarité, Bohr va considérer le chat comme un instrument de mesure et argumenter qu'il doit être décrit par la mécanique classique. Il soutient alors que le chat va être soit mort soit vivant avant l'ouverture de la boîte.

I- *Soit nier que la situation décrite est absurde*

Plusieurs réponses face à l'expérience de pensée du chat de Schrödinger adoptent cette stratégie. Le critique procède en niant que l'absurdité du RS pose problème, c'est-à-dire en expliquant pourquoi l'état superposé du chat n'est pas problématique. Par exemple, selon la théorie de la décohérence, plus l'objet superposé est composé d'un grand nombre de particules, plus les superpositions disparaissent rapidement, et c'est pour cette raison qu'un chat réel n'est jamais dans un état superposé. Dans l'interprétation de la mécanique quantique défendue par Everett, l'état superposé du chat n'est pas problématique car les deux états, mort et vivant, du chat existent en même temps, mais dans deux mondes différents.

La quantité des réponses actuelles à l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, ainsi que l'intensité du débat, montrent que ces réponses ne créent pas de consensus, contrairement à la critique de Bohr contre la boîte à photons d'Einstein²²⁴. Cela montre aussi la fonction d'exploration théorique de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger.

7.4.2 Scénarios qui ne sont pas nomologiquement possibles

Ces scénarios peuvent se diviser en deux groupes : les scénarios nomologiquement impossible et ceux qu'on a examinés dans le chapitre 6, c'est-à-dire ceux dont la possibilité nomologique du scénario reste indéterminée. Le scientifique, comme dans le cas d'un scénario nomologiquement possible, va analyser le RS qui découle du déroulement de son scénario, et le compare à la situation décrite dans cet RS. Mais il procède un peu différemment. Commençons par analyser les scénarios dont la possibilité nomologique reste indéterminé avant de brièvement exposer un exemple d'expérience de pensée avec un scénario nomologiquement impossible :

²²⁴ Au sens où Bohr montre que le scénario présenté par Einstein n'est pas suffisamment décrit pour être nomologiquement possible. Encore une fois, si un autre scénario nomologiquement possible est capable de nous fournir le RS d'Einstein est une autre question qu'on n'abordera pas dans cette thèse.

3. *Le RS s'obtient à partir du déroulement d'un scénario dont la possibilité nomologique reste indéterminée. Néanmoins ce RS décrit une situation nomologiquement possible sous une théorie donnée et nomologiquement impossible selon une autre.*

Dans les expériences de pensée de ce second cas de figure, l'expérimentateur en pensée peut :

J- *Rejeter que l'une des deux théories (ou ensemble de théories) est applicable au scénario.*

Comme dans ces cas le RS découle du déroulement d'un scénario qui n'est pas nomologiquement possible, le critique ne peut plus recourir à la stratégie de Bohr afin de montrer que le scénario n'est pas possible et donc que le RS n'en découle pas. Pour voir pourquoi, reprenons la structure de l'expérience de pensée de Maxwell :

La théorie cible de cette expérience de pensée porte sur la nature de la deuxième loi, classique ou phénoménologique, de la thermodynamique. Cette dernière interdit une machine à mouvement perpétuel de seconde espèce et le RS de Maxwell est exactement une 'machine' de cette sorte. Or, le scénario de Maxwell n'est pas nomologiquement possible, au sens où Maxwell a recours à des particuliers, à savoir le démon fictif, et sa dynamique consistant à ouvrir et fermer une porte sans masse, qui aboutit à un processus de séparation des molécules, dont la possibilité nomologique reste indéterminée. Néanmoins le résultat de ce processus, donc le RS, est nomologiquement possible selon la théorie cinétique, puisque rien n'interdit que les molécules, dans leur mouvement aléatoire, se retrouvent les lentes d'un côté et les rapides de l'autre. Mais ce résultat est en contradiction avec la deuxième loi de la thermodynamique.

Maxwell argumente de la façon suivante : ces deux théories (la théorie cinétique et la thermodynamique) sont incohérentes l'une par rapport à l'autre. Maxwell conclut que la deuxième loi doit être de nature statistique, dans le but de rétablir la cohérence. Une interprétation statistique de la deuxième loi la limite aux molécules prises en masse. L'interprétation dynamique de cette loi se trouve alors réfutée.

Cette expérience de pensée nous montre pourquoi un RS obtenu suite au déroulement d'un scénario dont la possibilité nomologique est indéterminée ne peut pas être réfuté en réfutant la possibilité nomologique du scénario. On a vu dans la section 6.3.2 que le démon mécanique de Smoluchowski,

ou celui de Feynman, ne réfutent pas l'expérience de pensée du démon de Maxwell, et n'étaient d'ailleurs pas conçus dans ce but. De fait, il est difficile de voir comment on peut réfuter l'expérience de pensée de Maxwell ou sa conclusion sur la nature statistique de la deuxième loi.

A notre avis, les deux façons de rejeter une expérience de pensée dont le scénario *n'est pas* nomologiquement possible sont :

K- *De montrer que le scénario doit être nomologiquement possible pour que la CEP suive.*

L- *De rejeter les idéalizations.*

Il reste un cas de figure qu'on n'a pas abordé, ce sont les scénarios nomologiquement impossibles : soit parce que le scientifique utilise des théories, lois et principes contrefactuels (lois du mouvement différentes), soit parce qu'il emploie des mécanismes explicitement nomologiquement impossibles (une machine capable d'inverser l'ordre temporel) :

4. *Le RS s'obtient à partir du déroulement d'un scénario nomologiquement impossible, mais la situation décrite dans ce RS n'est jamais observée.*

C'est les cas dans une expérience de pensée conçu par Norton, appelons-la le « dîner de Norton », pour critiquer les approches expérimentale :

« Par exemple, une expérience de pensée établit rapidement que la réversibilité temporelle d'une loi physique ne s'exprime pas directement dans les phénomènes. Les phénomènes manifestent une unidirectionnalité temporelle bien arrêtée. Pour le voir, il suffit d'imaginer que nous localisons un processus familier dans une machine capable d'inverser l'ordre temporel. Si l'appareil est assez grand pour accueillir un banquet, nous trouverions les convives, élégamment habillés, en train de régurgiter le contenu de leur estomac, le mâchant à l'envers pour obtenir des morceaux complets et les rapporter discrètement à leurs assiettes avec leurs fourchettes, un processus compatible avec les lois physiques, mais sinon jamais observé. L'expérience de pensée n'emploie pas une approche continue vers une certaine limite idéale, comme l'élimination progressive de la friction. En effet, l'expérience de pensée est d'autant plus efficace que nous évitons l'idéalisation, c'est-à-dire que nous rendons plus réalistes les processus soumis à l'inversion du temps. »²²⁵

²²⁵ “For example, a thought experiment quickly establishes that the time reversibility of physical law is not directly expressed in the phenomena. The phenomena manifest a decided unidirectionality in time. To see this, we need only imagine that we locate a familiar process in a device capable of reversing its time order. If the device is large enough to host a banquet, we would find elegantly dressed diners regurgitating the content of their stomachs, chewing it back to pristine morsels and modestly conveying them back to their plates with their forks—a process compatible with the physical laws but otherwise never seen. The thought experiment does not employ a continuous approach to some ideal limit, such as the gradual elimination of friction. Indeed the thought experiment is more effective the more we avoid idealization, that is, the more realistic we make the processes subject to time reversal.” Traduit par l'auteur, Norton, 2004, *Op.cit.*, p. 63, note de bas de page 12.

Sans s'attarder sur son analyse, car son but nous échappe, regardons comment notre structure se trouve directement applicable à cette expérience de pensée :

La question cible : Est ce que « la réversibilité temporelle d'une loi physique est directement exprimée dans les phénomènes » ?

Le scénario de Norton est nomologiquement impossible : Norton conçoit « une machine capable d'inverser l'ordre temporel »

Le RS de Norton : « nous trouvons les convives, élégamment habillés, régurgiter le contenu de leur estomac, les mâchant à l'envers pour obtenir des morceaux complet et modestement les transmettre à leurs assiettes avec leurs fourchettes »

RS à la CEP: Le RS décrit une situation nomologiquement possible : « un processus compatible avec les lois physiques » , *mais* « jamais observé ».

La CEP de Norton : « la réversibilité temporelle d'une loi physique ne s'exprime pas directement dans les phénomènes »

Passons à présent dans les dernières sections de ce chapitre, et de cette thèse, à une analyse plus détaillée de l'expérience de pensée de la boîte à photons, dans le cadre du débat sur l'identité des expériences de pensée.

7.5 L'identité des expériences de pensée

Maintenant que nous avons tous les éléments, nous allons entreprendre dans cette section une analyse, prolongée dans la section suivante, du débat sur l'identité des expérience de pensée. Ce débat, entre Norton et Bishop, a eu lieu à la suite de l'analyse par ce dernier de l'expérience de pensée de la boîte à photons, interprétée comme contestant la cohérence de la mécanique quantique ; cette analyse avait pour but de critiquer l'approche épistémologique des expériences de pensée défendue par Norton.

Nous allons approfondir ce débat au moyen d'une analyse historique de cette expérience de pensée, qui s'appuie sur les travaux de Howard. En fait, on retrouve à plusieurs reprises, dans de nombreux articles et lettres d'Einstein, depuis le début des années 30, différents scénarios d'une telle boîte où Einstein imagine différentes mesures effectuées sur la boîte, mais aussi sur un autre

photon qui s'échappe de cette boîte en même temps que le premier. La boîte à photons figure dans différentes expériences de pensée destinées à critiquer, à défendre et même à explorer la mécanique quantique. L'histoire et le développement de cette expérience de pensée nous fournissent un cas d'étude assez riche qui nous permettra d'aborder plusieurs problématiques relatives aux expériences de pensée, surtout liées à leur évolution. La question centrale qui se pose est de savoir si on est en présence d'une ou de deux expériences de pensée quand on change quelques détails dans le scénario. Quelles modifications peut-on apporter à une expérience de pensée sans pour autant dire qu'on est en présence d'une autre expérience de pensée ? Quelles modifications nous conduisent à une nouvelle expérience de pensée ? Comme le souligne Brown : « Il est clair que les expériences de pensée se caractérisent par une plasticité intrigante, et ceci soulève la question intéressante de savoir qu'est ce qui préserve l'identité d'une expérience de pensée »²²⁶

Dans cette section, nous présenterons ce débat entre Bishop et Norton. La critique soulevée par Bishop consiste à montrer qu'on est en présence de deux expériences de pensée, mais d'un seul argument, et donc contrairement à l'approche de Norton, les expériences de pensée ne peuvent pas être des arguments. Regardons l'argumentation de chacun avant de pousser plus loin notre analyse.

7.5.1 Débat sur l'identité des expériences de pensée autour de la boîte à photons

Le débat entre Bishop et Norton se focalise sur la boîte à photons dans la version rapportée par Bohr.

Bishop conclut suite à son analyse de ce cas d'étude :

« Le problème est que Bohr et Einstein analysaient une expérience de pensée, mais qu'ils proposaient deux t-arguments [EP-arguments] différents. Par conséquent, l'expérience de pensée de la boîte à photons ne peut pas être un t-argument. [...] Les expériences de pensée, comme des expériences réelles, peuvent être répétées. Et afin de répéter une expérience, il n'est pas nécessaire (ou même possible) de dupliquer l'original dans tous ses détails. En fait, si l'on pense que l'expérience a été bâclée, ce serait une folie d'essayer de la reproduire, avec ses erreurs. Telle était la situation de Bohr. Il soupçonnait qu'Einstein avait bâclé l'expérience de pensée de la boîte à photons, mais il ne pouvait pas voir tout de suite comment. Le « triomphe » de Bohr survint parce qu'il put montrer que l'expérience de pensée d'Einstein n'avait pas le résultat qu'Einstein lui attribuait. Cette manière de comprendre l'épisode de la boîte à photons n'a de sens que si l'on

²²⁶ «Clearly, thought experiments are characterized by an intriguing plasticity, and this raises the interesting question of what it is that preserves the identity of a thought experiment” Traduit par l'auteur, Brown et Yiftach, 2010, *Op.cit.*

suppose que Bohr a répliqué l'expérience de pensée d'Einstein, *i.e.* qu'elle étaient des tokens du même type d'expérience pensée. »²²⁷

A cette critique, Norton répond :

« Einstein et Bohr *ont* deux expériences de pensée différentes, mais similaires; et elles correspondent à deux arguments différents, mais similaires. Nous pouvons convertir les deux expériences de pensée en un seul en négligeant les différents espace-temps de chacune. Les différents paramètres de l'espace-temps sont alors responsables des différents résultats. Si cela est recevable, alors le même stratagème fonctionne pour les arguments. Quand on néglige les prémisses relatives au paramètre de l'espace-temps, *les deux arguments procèdent des mêmes prémisses expérimentales*. Ils arrivent à des résultats différents seulement en raison des différences dans les prémisses se rapportant au cadre espace-temps. » (C'est nous qui soulignons.)²²⁸

Résumons les points principaux de ce débat. Bishop critique l'approche de Norton par l'intermédiaire de son analyse du cas d'étude d'Einstein/Bohr. Il défend l'idée qu'il s'agit d'une expérience de pensée mais de deux EP-arguments (il les appelle « t-arguments ») et conclut que les expériences de pensée ne peuvent pas être des arguments. À cela Norton répond en soulignant que ce sont deux expériences de pensée « différentes mais similaires », réductibles à deux EP-arguments « différents mais similaires » : la prémisses concernant la théorie de l'espace-temps, à savoir soit la théorie classique, soit la théorie relativiste, est responsable de cette différence, le reste étant similaire.

Bishop défend une approche expérimentale, et donc analyse cet épisode dans le cadre des expériences de pensée ayant un scénario nomologiquement possible, réalisable en principe. Or, Norton a raison de souligner l'importance de la théorie, ce que Bishop fait aussi. Néanmoins Norton, en raison de sa thèse d'élimination, tend à sous-estimer et à sous-représenter le rôle des particuliers, compris comme processus, et souligne uniquement la pertinence de la différence entre les prémisses concernant la théorie de l'espace-temps. En d'autres termes, en supposant que le reste

²²⁷ "The problem is that Bohr and Einstein were analyzing one thought experiment, but they were proposing two different t-arguments [EP-argument]. Therefore, the clock-in-the-box thought experiment cannot be a t-argument. [...] Thought experiments, like real experiments, can be repeated. And in order to repeat an experiment, it is not necessary (or even possible) to duplicate the original in all its details. In fact, if one thinks that an experiment has been botched, it would be folly to try to duplicate it, mistake and all. This was Bohr's predicament. He suspected that Einstein had botched the clock-in-the-box thought experiment, but he couldn't see how right away. Bohr's "triumph" came because he was able to show that Einstein's thought experiment did not have the result Einstein thought it had. This understanding of the clock-in-the-box episode makes sense only if we suppose that Bohr replicated Einstein's thought experiment, *i.e.*, that they were tokens of the same thought experiment-type." Traduit par l'auteur, p. 539-540 Bishop 1999, Why Thought Experiments are not arguments, *Philosophy of Science*, 66:534-541.

²²⁸ "Einstein and Bohr *do* have two different, but similar thought experiments; and they correspond to two different, but similar arguments. We can convert the two thought experiments into one by ignoring the different spacetimes of each. The different spacetime settings are then responsible for the different outcomes. If that is admissible, then the same stratagem works for the arguments. Ignoring premises pertaining to the spacetime setting, *the two arguments proceed from the same experimental premises*. They arrive at different results only because of the differences in the premises pertaining to spacetime setting." Norton 2002, *Op.cit.* p. 63.

est similaire, Norton ignore la place et le rôle de la description, plus ou moins détaillée, des particuliers, compris en tant que processus ; et également la dynamique de l'évolution de ces processus.

Cette sous-estimation du rôle des éléments non théoriques du scénario se traduit à plusieurs endroits chez Norton :

« Si [les expériences de pensée] échouent, elles le font pour une raison identifiable, bien que *trouver la fausse prémisse ou le sophisme puisse ne pas être facile*. Les expériences de pensée ont la même transparence et fiabilité que l'argumentation ordinaire. » (c'est nous qui soulignons)²²⁹

« Trouver la prémisse fausse s'avère difficile » : c'est surtout vrai dans l'approche de Norton, où les particuliers, compris en tant que processus, ne jouent pas de rôle dans l'EP-argument. Car si les particuliers sont éliminés de l'argument, alors on n'est plus en mesure de comprendre pourquoi les prémisses concernant la théorie applicable à un scénario ne sont plus applicables à l'autre.

Selon notre analyse en revanche, ce qui est fautif se trouve dans le scénario, dans la notion de possibilité supposée par le scientifique, dans les théories applicables aux processus dans ce scénario, et donc dans la place des particuliers dans ce scénario, selon qu'ils sont à l'« arrière-plan » ou au « premier plan ». Puisque Einstein, selon Bohr, voulait montrer un résultat qui s'obtient à partir d'un scénario nomologiquement possible, où l'on peut mesurer simultanément le temps et l'énergie sur la boîte pour déterminer les mêmes variables pour le photon, mais ne décrit pas un scénario nomologiquement possible, la réponse de Bohr est assez convaincante. Norton peut sans problème se livrer à une telle analyse, et il le fait, mais cela reste en tension avec son analyse du rôle des particuliers et de leur élimination de l'argument qui remplace l'expérience de pensée.

7.5.2 Une expérience de pensée, deux scénarios

Mais est-ce une expérience de pensée ou deux ? La question semble sans réponse unique; elle dépend intégralement de l'approche de Norton ou de Bishop : est-elle plus une expérience ou un argument ?

En analysant les expériences de pensée comme des outils autonomes, sans les réduire à d'autres outils scientifiques, on a plutôt tendance à pencher vers l'analyse de Bishop. Nous soutenons qu'on est en présence d'*une expérience de pensée, mais avec deux scénarios différents* ; c'est la dynamique de l'expérience de pensée qui fait évoluer les processus de l'arrière-plan vers le

²²⁹ “If [thought experiments] fail, they do so for an identifiable reason, *although finding the false premise or fallacy may not be easy*. Thought experiments have the same transparency and reliability as ordinary argumentation” *Ibid.* p. 52.

premier plan. Cela devient plus clair si on essaie d'analyser la boîte à photons de Bohr indépendamment de l'expérience de pensée d'Einstein. Le RS de Bohr sera quelque chose comme ceci : on ne peut pas effectuer, simultanément et avec une précision arbitraire, les deux mesures sur la boîte et donc prédire les deux variables pour le photon. Et le RS découle du déroulement du scénario et décrit une situation nomologiquement possible. Cette lecture dénature la fonction et l'intérêt de cette expérience de pensée. Que doit-on tirer d'un tel RS, si on ne l'oppose pas à celui d'Einstein ? Quel est l'intérêt de cette expérience de pensée et quelle est sa CEP, si on ne l'oppose pas à celle d'Einstein et à sa CEP ? Nous pouvons dire qu'Einstein et Bohr ont utilisé deux scénarios différents de la même expérience de pensée : les détails des processus et les théories qui décrivent leur bon fonctionnement sont différents. Leur place dans le scénario évolue avec Bohr, car ils passent de l'arrière-plan au premier plan. Les deux scientifiques arrivent donc à deux RS et à des CEP opposés : soit le principe de Heisenberg tient toujours, et est même renforcé, et la mécanique quantique n'est pas contradictoire (RS et CEP de Bohr), soit l'inverse (RS et CEP d'Einstein).

Parallèlement, le déplacement qu'effectuent Smoluchowski ou Feynman (*cf.* 6.3.2), en amenant le particulier fictif (le démon) et sa dynamique, et donc le processus de séparation des molécules, de l'arrière-plan au premier plan, ne peut pas être compris comme critiquant l'expérience de pensée de Maxwell (*cf.* 6.3.2). La CEP de Smoluchowski *est différente de, sans être en contradiction avec*, la CEP de Maxwell. Smoluchowski explique dans sa CEP pourquoi un démon mécanique est impossible. On peut alors soutenir qu'on est en présence de deux expériences de pensée différentes.

Nous verrons dans la section suivante comment cette même boîte à photons, au coeur du débat entre Bishop et Norton sur l'identité des expériences de pensée, va aussi nous fournir plusieurs exemples qui nous permettent de voir comment certains changements dans le scénario d'une expérience de pensée aboutissent à une autre expérience de pensée avec RS et CEP différents, et aussi comment certains changements peuvent aboutir à la réutilisation de la même expérience de pensée avec le même RS et la même CEP. Ce sont les différentes versions de l'interprétation de la boîte à photons comme concernant la complétude de la mécanique quantique, c'est-à-dire de l'interprétation défendue par Howard du but visé par Einstein lors du congrès Solvay, où a eu lieu la discussion entre Einstein et Bohr.

Par la suite, dans la section 7.6.4, nous exposerons une autre utilisation par Einstein de l'appareil imaginaire de la boîte à photons, qui permet de laisser échapper deux particules d'un obturateur, celle d'Einstein, Tolman et Podolsky (ETP). C'est encore une nouvelle expérience de

pensée avec un RS et une CEP différents. Ce dernier exemple nous donnera une raison supplémentaire de considérer les boîtes à photons dirigées contre la cohérence de la mécanique quantique comme une seule expérience de pensée.

7.6 Les interprétations et l'évolution de la boîte à photons

La question à présent abordée est : Comment Einstein avait-il utilisé son expérience de pensée de la boîte à photons lors du congrès Solvay de 1930 ? Comment a-t-il utilisé cet appareil imaginaire d'une boîte qui laisse échapper une particule, ou plusieurs, d'un obturateur actionné par une horloge ? Cette question s'avère intéressante pour le débat sur l'identité des expériences de pensée. Au cas où Bohr aurait mal compris l'expérience de pensée d'Einstein ou aussi au cas où Einstein l'aurait modifiée suite à la réponse de Bohr. Dans les deux cas, il est intéressant de voir comment certaines modifications changent la fonction même de l'expérience de pensée selon le but du scientifique.

Nous avons présenté jusqu'ici la version rapporté par Bohr ; si on se fonde sur le texte de ce dernier, Einstein a utilisé son expérience de pensée de la boîte à photons lors de ce congrès, d'abord pour montrer la fausseté du principe d'indétermination de Heisenberg. Ensuite, face à la réponse de Bohr, Einstein aurait modifié son expérience de pensée pour critiquer la complétude de la mécanique quantique. La difficulté à dire exactement ce qui s'est passé est principalement liée à la façon dont Einstein introduit la boîte à photons ; c'était lors d'une discussion informelle avec Bohr, en dehors des séances officielles du congrès. Ainsi, cette discussion n'a pas été reproduite dans la transcription du congrès et Einstein ne s'est jamais prononcé sur cette version contestant la cohérence de la mécanique quantique. Cette absence de littérature primaire d'Einstein – alors qu'habituellement le scientifique met par écrit son expérience de pensée en décrivant au moins son scénario et sa conclusion – permet une autre interprétation de cette expérience de pensée. Jusqu'à nos jours, aucun consensus n'existe quant à l'objectif initial d'Einstein dans la conception de son expérience de pensée lors de ce congrès en 1930. Ce qui est sûr est qu'il voulait critiquer l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, mais la question demeure : quel aspect de cette interprétation Einstein voulait-il critiquer ? La question est importante, car selon qu'Einstein souhaitait critiquer la complétude ou la cohérence de la mécanique quantique, on est en présence de différents scénarios de l'expérience de pensée de la boîte à photons. Même différentes questions cibles, RS et CEP.

Selon Howard, l'évolution de cette expérience de pensée se raconte de la façon suivante :

« Un récit bien ancré raconte l'histoire du débat Einstein-Bohr comme celle d'un débat où Einstein essaie, de 1927 à 1930, de prouver que la théorie quantique est incorrecte, par des expériences de pensée qui exposent les violations en principe du principe de l'indétermination de Heisenberg, seulement pour obtenir que Bohr trouve la faille dans chacune, après quoi Einstein change sa direction d'attaque, critiquant la théorie quantique maintenant, non plus comme incorrecte, mais comme incomplète »²³⁰

Cependant, Howard (1985, 1989 et 2007) tente de montrer que cette histoire est fautive ; même si elle contient une part de vérité, elle ne reflète pas la pensée d'Einstein durant le congrès Solvay. C'est le « par la suite » qui lui pose problème dans le déroulement de l'histoire : Einstein, selon Howard, utilise la boîte à photons en 1930 pour montrer l'incomplétude de la mécanique quantique (ce qui, comme on l'a vu, était aussi le cas de Schrödinger (*cf.* 2.4)), et non pour réfuter le principe de Heisenberg et montrer par conséquent une contradiction en son sein. Einstein ne doutait plus en 1930 de la validité du principe de Heisenberg, mais doutait que la mécanique quantique fournisse une description complète de la réalité, et l'expérience de pensée de la boîte à photons, selon cette interprétation, ne mentionne même pas ce principe.

Nous verrons dans cette section qu'une multitude d'expériences de pensée et d'arguments ont été utilisés par Einstein dans le but de réfuter la complétude de la mécanique quantique. Nous commencerons par examiner l'argument EPR, dont une des prémisses s'appuie sur l'expérience de pensée d'EPR, et ensuite l'argument contre la complétude qu'Einstein expose dans une lettre à Schrödinger juste après la publication d'EPR. Einstein était insatisfait de la forme de la critique de la complétude dans cet article (écrit par Podolsky).

Selon l'analyse de Howard, on trouve l'origine de ces arguments dans l'expérience de pensée de la boîte à photons. C'est une lettre d'Ehrenfest à Bohr qui nous indique qu'Einstein voulait critiquer la complétude et non la cohérence de la mécanique quantique lors de ce congrès. Notre analyse se fonde principalement sur celle de Howard, qui retrace cette origine en s'appuyant sur plusieurs lettres d'Einstein²³¹. Einstein est explicite sur cette origine dans une lettre à Epstein de

²³⁰ “A well-entrenched narrative tells the story of the Einstein-Bohr debate as one in which Einstein's tries, from 1927 through 1930, to prove the quantum theory incorrect via thought experiments exhibiting in-principle violations of the Heisenberg indeterminacy principle, only to have Bohr find the flaw in each, after which Einstein shifts his direction of attack, faulting the quantum theory now not as incorrect, but incomplete” Howard 2007, *Revisiting the Einstein-Bohr Dialogue Iyyun: The Jerusalem Philosophical Quarterly* 56.
Version en ligne : <https://www.scribd.com/doc/292054514/Revisiting-the-Einstein-Bohr-Dialogue>

²³¹ Notre source des lettres d'Einstein est Howard 1985 et 1989 qui a étudié les archives d'Einstein avec ses lettres qu'il cite, qui se trouvent à l'université Hébraïque de Jérusalem.

1945, où il lui explique qu'il avait été amené à son *argument d'incomplétude* suite à l'*expérience de pensée* de la boîte à photons. Enfin, nous exposerons encore une autre utilisation de la boîte à photons dans un article de 1932 d'Einstein, Tolman et Podolsky, qu'on appellera ETP en suivant Howard. ETP nous montre que la boîte à photons est encore une fois utilisée dans une troisième expérience de pensée qui conclut que le principe de Heisenberg doit être étendu pour limiter la précision de la détermination simultanée de chacune des deux variables conjuguées à la rétrodiction comme à la prédiction.

7.6.1 EPR et L'argument d'incomplétude d'Einstein

Dans leur article 1935, Einstein Podolsky et Rosen (EPR), les auteurs présentent un argument basé sur une expérience de pensée, la fameuse expérience de pensée d'EPR, qui vise à montrer l'incomplétude de la mécanique quantique. Cet article et cette conclusion furent pris très au sérieux par la communauté scientifique, et philosophique, de l'époque, et le restent de nos jours. Ce sur quoi on s'accorde le plus est que l'argument proposé dans cet article est pour le moins assez complexe. Même Einstein n'était pas satisfait de la façon dont il était présenté, et écrira à Schrödinger, avant de lui présenter son propre argument contre la complétude de la mécanique quantique :

« Pour des raisons de langue cet [article] a été rédigé par Podolsky après plusieurs discussions. Pourtant, il n'est pas aussi réussi que je l'avais initialement voulu; ou plutôt, l'essentiel a été, pour ainsi dire, étouffé par le formalisme [Gelehrsamkeit]. »²³²

Suivons l'analyse par Howard d'EPR et ensuite de l'argument d'Einstein :

« Brièvement, l'argument qui s'y trouve est le suivant. Tout d'abord, une condition de complétude est affirmée comme une condition nécessaire qui doit être satisfaite par toute théorie scientifique acceptable: « tous les éléments de la réalité physique doivent avoir une contrepartie dans la théorie physique » (EPR 1935, p 777.). Ensuite, une condition suffisante pour l'existence d'éléments de la réalité physique (le fameux critère de réalité EPR) est définie par : « Si, sans pour autant perturber un système, nous pouvons prédire avec certitude (*i.e.* avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de la réalité physique correspondant à cette grandeur physique » (Einstein, Podolsky et Rosen 1935, p. 777). Enfin, au moyen d'un argument assez compliqué, il est alors démontré que dans une expérience de pensée de type EPR, impliquant des systèmes qui interagissent au préalable, des éléments de la réalité physique existent, correspondant à chacun des deux paramètres conjugués pour l'un des deux systèmes en interaction,

²³² “For reasons of language this [paper] was written by Podolsky after several discussions. Still, it did not come out as well as I had originally wanted; rather, the essential thing was, so to speak, smothered by the formalism [Gelehrsamkeit].” Traduit par l'auteur, cité dans Fine 1986, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press. p. 35.

puisque la valeur de l'un ou l'autre aurait pu être prédite avec certitude et sans perturber le système physique sur la base des mesures effectuées sur l'autre système. Mais la mécanique quantique soutient que les paramètres conjugués, comme la position et la quantité de mouvement linéaire le long d'un axe commun, ne peuvent pas avoir des valeurs simultanément définies. La mécanique quantique est donc incomplète, car elle échoue à satisfaire la condition de complétude. »²³³

Howard continue en affirmant que l'approche standard qui consistait à analyser EPR comme l'argument d'incomplétude d'Einstein, est « gravement fautive » :

« Tel est le compte rendu standard de l'argument d'incomplétude d'Einstein. Mais ce compte rendu est gravement fautif. Einstein pensait que la mécanique quantique est incomplète, mais pour des raisons très différentes de celles avancées dans l'article d'EPR. [...] Il n'a jamais invoqué la condition de complétude d'EPR, il n'a jamais invoqué le critère de réalité, et il n'a jamais invoqué les relations d'incertitude. De plus, ce qu'il dit rend beaucoup plus claire que dans l'article d'EPR la connexion entre sa critique de la mécanique quantique, d'une part, et ses engagements envers les théories de champs et le réalisme, de l'autre. »²³⁴

En suivant la reproduction de Howard de la lettre d'Einstein à Schrödinger du 19 Juin 1935, écrite à peine un mois après la publication de l'article d'EPR, nous pouvons exposer cet argument contre la complétude avec les mots d'Einstein :

« Dans la théorie quantique, on décrit un état réel d'un système via une fonction normalisée, ψ , des coordonnées (de l'espace de configuration). . . Or, on aimerait dire ce qui suit : ψ est corrélée univoquement avec l'état réel du système réel. . . . Si cela

²³³ "In brief, the argument found there is this. First, a completeness condition is asserted as a necessary condition that must be satisfied by any acceptable scientific theory: "every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory" (EPR 1935, p. 777). Then a sufficient condition for the existence of elements of physical reality (the famous EPR reality criterion) is laid down: "If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e. with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity" (Einstein, Podolsky, and Rosen 1935, p. 777). And then, finally, by means of a rather complicated argument, it is shown that in an EPR-type thought experiment involving previously interacting systems, elements of physical reality exist corresponding to both of two conjugate parameters for one of the two interacting systems, since the value of either could have been predicted with certainty and without physically disturbing the system on the basis of measurements carried out on the other system. But quantum mechanics holds that conjugate parameters, like position and linear momentum along a common axis, cannot have simultaneously definite values. Quantum mechanics is, thus, incomplete, since it fails to satisfy the completeness condition." Traduit par l'auteur, p. 63, Howard, "Nicht Sein Kann was Nicht Sein Darf," or the Prehistory of EPR, 1909–1935: Einstein's Early Worries about the Quantum Mechanics of Composite Systems dans Miller, Arthur I. (éd.) 1990, *Sixty two years of uncertainty*, NATO-ASI series B226, Plenum Press. pp. 61-111.

²³⁴ That is the standard account of Einstein's incompleteness argument. But that account is seriously wrong. Einstein did think quantum mechanics incomplete, but for reasons significantly different from those advanced in the EPR paper. [...] he never invoked the EPR completeness condition, he never invoked the reality criterion, and he never invoked the uncertainty relations. Moreover, what he does say makes far clearer than the EPR paper the connection between his critique of quantum mechanics, on the one hand, and his commitments to field theories and realism, on the other. " *Ibid.* pp. 63-64.

fonctionne, je parle d'une description complète de la réalité par la théorie. Mais si une telle interprétation est impossible, j'appelle la description théorique « incomplète »²³⁵.

Toujours selon Howard, Einstein « va exposer brièvement l'expérience de pensée d'EPR, en soulignant que sa seule caractéristique importante est le fait qu'en choisissant de mesurer différentes variables d'un système A, on peut attribuer deux fonctions ψ différentes, ψ_B and $\psi_{\underline{B}}$, pour l'autre système B »²³⁶. Et Einstein conclut :

Maintenant, ce qui est essentiel est exclusivement que ψ_B et $\psi_{\underline{B}}$ sont en général différents l'une de l'autre. Je soutiens que cette différence est incompatible avec l'hypothèse selon laquelle la description par ψ est corrélée univoquement avec la réalité physique (l'état réel). Après la collision, l'état réel de (AB) consiste précisément de l'état réel de A et de l'état réel de B, lesquels deux états n'ont rien à voir l'un avec l'autre. L'état réel de B ne dépend alors pas du type de mesure que j'effectue sur A. (« hypothèse de séparation » ci-dessus.) Mais alors, pour le même état de B il y a deux ψ_B (en général un nombre arbitraire de ψ_B) tout aussi justifiés, ce qui contredit l'hypothèse d'une description univoque, ou d'une description complète des états réels. » (C'est l'auteur qui souligne.)²³⁷

Regardons, avant de passer à l'expérience de pensée de la boîte à photons, l'analyse par Howard de cet argument contre l'incomplétude, avec sa postulation des deux principes de *séparation* et de *localité* :

« Une théorie complète attribue un et un seul état théorique à chaque état réel d'un système physique. Mais dans des expériences de type EPR impliquant des systèmes, spatio-temporellement séparés, mais interagissant préalablement, A et B, la mécanique quantique attribue différents états théoriques différents "fonctions psi [ψ]," à un seul et même état réel de A, par exemple, en fonction du type de mesure que nous choisissons d'effectuer sur B. De ce fait la mécanique quantique est incomplète.

L'étape cruciale dans l'argument comporte la preuve que le système A possède un et un seul état réel. On considère que cela suit de la conjonction de deux principes que je [Howard] (et non pas

²³⁵ "In the quantum theory, one describes a real state of a system through a normalized function, ψ , of the coordinates (of the configuration-space). . . . Now one would like to say the following: ψ is correlated one-to-one with the real state of the real system. . . . If this works, then I speak of a complete description of reality by the theory." Traduit par l'auteur, pp. 179 Howard, 1985, Einstein on Locality and Separability. *Studies in History and Philosophy of Science* 16: 171–201.

²³⁶ "briefly sketches the EPR *Gedankenexperiment*, stressing as its only important feature the fact that by choosing to measure different observables of one system, A, we can attribute different ψ functions, ψ_B and $\psi_{\underline{B}}$ to the other system, B." *Ibid.* pp. 179-180.

²³⁷ "In the quantum theory, one describes a real state of a system through a normalized function, ψ , of the coordinates (of the configuration-space). . . . Now one would like to say the following: ψ is correlated one-to-one with the real state of the real system. . . . If this works, then I speak of a complete description of reality by the theory. But if such an interpretation is not feasible, I call the theoretical description 'incomplete'.

Now what is essential is exclusively that ψ_B and $\psi_{\underline{B}}$ are in general different from one another. I assert that this difference is incompatible with the hypothesis that the ψ description is correlated one-to-one with the physical reality (the real state). After the collision, the real state of (AB) consists precisely of the real state of A and the real state of B, which two states have nothing to do with one another. *The real state of B thus cannot depend upon the kind of measurement I carry out on A.* ('Separation hypothesis' from above.) But then for the same state of B there are two (in general arbitrarily many) equally justified ψ_B , which contradicts the hypothesis of a one-to-one or complete description of the real states." *Ibid.* p.180.

Einstein) appelle les principes de localité et de séparabilité. La séparabilité dit que les systèmes spatio-temporellement séparés possèdent des états réels bien définis, de façon que l'état conjoint du système composite est entièrement déterminé par ces deux états distincts. La localité dit qu'un tel état réel n'est pas affecté par des événements dans les régions de l'espace-temps séparées de cet état par un intervalle du genre spatial. Einstein fait valoir que les deux principes sont applicables aux systèmes séparés dans l'expérience de type EPR (si on leur permet d'être suffisamment séparés avant que nous effectuions une mesure sur B). Il en résulte que le système A a son propre état réel bien défini à partir du moment où l'interaction entre A et B cesse, et que cet état réel n'est pas affecté par tout ce que nous faisons dans les environs de B. Mais la mécanique quantique, encore une fois, attribue différents états à A en fonction du paramètre choisi pour la mesure sur B. Ainsi, Einstein affirme que l'incomplétude de la mécanique quantique - dans le sens particulier qu'elle attribue différents états théoriques pour un seul et même état réel - suit inévitablement si nous insistons sur les principes de localité et de séparabilité. »²³⁸

Le lien entre argument et expérience de pensée est subtil dans ce que Howard appelle « l'argument d'Einstein ». Ne peut-on pas dire que c'est une expérience de pensée dont la partie théorique du scénario contient la mécanique quantique et les deux principes de séparabilité et localité, et la partie « technique » ou expérimentale, les deux particules qui se rencontrent et puis se séparent ? Le RS du scénario de cette expérience de pensée sera « le système A à son état réel bien défini du moment que l'interaction entre A et B se termine, et que cet état réel n'est pas influencé par ce qu'on fait au alentour de B ». la CEP est bien sûr que la mécanique quantique est incomplète, car elle « associe différents états théoriques, différentes fonction ψ , à un seul et unique état réel de A »

La difficulté de voir cet argument comme une expérience de pensée est que les étapes pour passer du scénario au RS, puis à la CEP, sont complexes. Regardons de près ces arguments d'incomplétude d'Einstein, que ce soit dans l'article EPR ou dans sa lettre à Schrödinger. Ce sont des arguments qui utilisent une expérience de pensée pour justifier une de leurs prémisses. La question est alors de savoir si on doit les analyser comme une expérience de pensée ou comme des arguments. Une réponse est que ce sont des arguments. Deux raisons nous poussent à les considérer

²³⁸ "A complete theory assigns one and only one theoretical state to each real state of a physical system.' But in EPR-type experiments involving spatio-temporally separated, but previously interacting systems, A and B, quantum mechanics assigns different theoretical states, different "psi [ψ]-functions," to one and the same real state of A, say, depending upon the kind of measurement we choose to carry out on B. Hence quantum mechanics is incomplete. The crucial step in the argument involves the proof that system A possesses one and only one real state. This is held to follow from the conjunction of two principles that I (not Einstein himself) call the locality and separability principles. Separability says that spatio-temporally separated systems possess well-defined real states, such that the joint state of the composite system is wholly determined by these two separate states. Locality says that such a real state is unaffected by events in regions of space-time separated from it by a spacelike interval. Einstein argues that both principles apply to the separated systems in the EPR-type experiment (if they are allowed to separate sufficiently before we perform a measurement on B). It follows that system A has its own well-defined real state from the moment the interaction between A and B ceases, and that this real state is unaffected by anything we do in the vicinity of B. But quantum mechanics, again, assigns different states to A depending upon the parameter chosen for measurement on B. Thus, Einstein claims that the incompleteness of quantum mechanics--in the special sense of its assigning different theoretical states to one and the same real state--follows inevitably if we insist upon the principles of locality and separability." Traduit par l'auteur, Howard 1990, *Op.cit.*, pp. 64-65.

comme des arguments : la première est qu'Einstein lui-même dit explicitement que c'est un argument et qu'il a été amené à cet argument par le biais d'une expérience de pensée (*cf.* la section suivante 7.6.3.) Donc ici, le scientifique lui-même différencie entre ces deux outils du raisonnement scientifique qui l'ont mené à sa conclusion contre la complétude de la mécanique quantique. La seconde est que, surtout dans EPR, il y a clairement un argument à deux prémisses, qui nous mène à la conclusion selon laquelle la mécanique quantique est incomplète, même s'il faut bien noter qu'une prémisses dans ces deux formes de l'argument, d'Einstein et d'EPR, est fondée sur une expérience de pensée comportant un scénario qui décrit deux particules qui interagissent, puis se séparent, c'est ce qu'on appelle une situation type-EPR.

Passons à présent à la boîte à photons dans ces différentes utilisations par Einstein et à son évolution.

7.6.2 La boîte à photons contre la complétude

Examinons d'abord l'analyse par Howard de la première lettre d'Ehrenfest à Bohr, où il lui explique le but qu'avait Einstein lorsqu'il a introduit l'expérience de pensée de la boîte à photons lors du congrès Solvay :

Ehrenfest continue à expliquer l'intention réelle d'Einstein. Ce qu'Einstein voulait, dit Ehrenfest, est une « machine » qui émet un projectile d'une manière telle que, après que le projectile a été émis, une inspection de la machine permettra à l'expérimentateur de prédire soit la valeur de la grandeur A du projectile, soit la valeur de sa grandeur B, ces valeurs étant alors mesurables lors du retour du projectile après un temps relativement long, ayant été réfléchi à un endroit suffisamment éloigné (1/2 année-lumière) pour assurer qu'il y a une séparation dans l'espace entre le projectile et la machine au moment où nous inspectons la machine. Selon Ehrenfest : « Il est donc, pour Einstein, au-delà de la discussion et hors de tout doute que, en raison de la relation d'incertitude, il faut naturellement choisir entre l'une ou l'autre. Mais l'[expérimentateur] peut choisir entre elles après que le projectile est déjà dans sa course "(BSC-AHQP) Et : « Il est intéressant de bien comprendre le fait que le projectile, qui est déjà en train de voler quelque part isolé 'tout seul', doit être prêt à satisfaire des prédictions 'non-commutatives' très différentes, 'sans savoir encore' laquelle de ces prédictions on fera (et testera) » (BSC-AHQP). La boîte de photons se révèle satisfaire toutes les

exigences d'une telle « machine », les deux quantités , A et B, étant respectivement, le temps de retour du photon et son énergie ou sa couleur (longueur d'onde).²³⁹

Howard continue par une exposition et une analyse de ce qu'il appelle « la seule exposition directe qu'Einstein lui-même avait donné de l'histoire de ces expériences de pensée [contre la complétude de la mécanique quantique avec la boîte à photons], [qui] était dans une correspondance avec la physicien de Cal. Tech, Paul S. Epstein. »²⁴⁰

Howard nous dit qu'Epstein avait du mal à comprendre l'argument d'incomplétude d'Einstein et qu'Einstein pensait qu'« il était peut-être préférable qu'il montre Epstein comment lui-même était arrivé à *l'argument incomplétude*. »²⁴¹ Howard cite ensuite cette lettre d'Einstein

« Je suis arrivé moi-même à cet *argument* en commençant avec une *expérience de pensée* simple. Je pense qu'il vaudrait mieux, pour nous, que je vous l'expose. » (C'est nous qui soulignons)²⁴²

Howard décrit le scénario de l'expérience de pensée de la boîte à photons, qui va être encore une fois différent de celui d'Ehrenfest, et il reproduit ensuite l'explication par Einstein de ce qu'on doit tirer de l'expérience décrite dans le scénario :

Une boîte à photons peut se mouvoir librement dans la direction x. Un observateur se déplace avec la boîte et a à sa disposition divers instruments, y compris une horloge pour synchroniser l'ouverture de l'obturateur et des outils permettant de mesurer la position de la boîte. Avant de commencer l'expérience, l'observateur laisse la boîte s'immobiliser, ce qui peut être déterminé au moyen d'une lumière émise de la boîte et réfléchi par un mur lointain. Bien sûr, savoir que la boîte est au repos, c'est-à-dire, qu'elle a une quantité de mouvement nulle dans la

²³⁹ Ehrenfest goes on to explain Einstein's real intention. What Einstein wanted, says Ehrenfest, is a "machine" that emits a projectile in such a way that, after the projectile has been emitted, an inspection of the machine will enable the experimenter to predict either the value of the projectile's magnitude A or the value of its magnitude B, these values then being measurable when the projectile returns after a relatively long time, it having been reflected at some location sufficiently distant (1 light-year) to insure that there will be a spacelike separation between the projectile and the machine at the time we inspect the machine. According to Ehrenfest: "It is thus, for Einstein, beyond discussion and beyond doubt, that, because of the uncertainty relation, one must naturally choose between the either and the or. But the [experimenter] can choose between them AFTER the projectile is already finally under way" (BSC-AHQP).H And: "It is interesting to get clear about the fact that the projectile, which is already flying around isolated 'for itself,' must be prepared to satisfy very different 'non-commutative' predictions, 'without knowing as yet' which of these predictions one will make (and test)" (BSC-AHQP).²⁶ The photon-box turns out to satisfy all of the requirements for such a "machine," the two quantities, A and B, being respectively, the time of the photon's return and its energy or color (wavelength). Traduit par l'auteur, Howard 1990, *Op.cit.* p. 99.

²⁴⁰ "The only direct account that Einstein himself ever gave of the history of these Gedankenexperimente was in an exchange of letters with the Cal Tech physicist, Paul S. Epstein." *Ibid.* p. 101.

²⁴¹ "it may be better if he shows Epstein how he himself first arrived at the *incompleteness argument*" *Ibid.*

²⁴² "I *Myself* first came upon the argument starting from a simple *thought experiment*. I think it would be best for us if I exhibited this to you" *Ibid.*

direction x , signifie que sa position est inconnue. Maintenant, l'expérimentateur ouvre et ferme le clapet à un temps déterminé, en permettant à un seul photon de s'échapper. À ce stade, l'expérimentateur a le choix de mesurer l'une de deux choses. Il ou elle peut ancrer la boîte au cadre de référence, ce qui permet une mesure précise de la position de la boîte, et donc une prédiction de l'heure exacte où le photon émis sera reçu à un emplacement distant S , ce qui signifie, dit Einstein, une "détermination précise de la position du photon". Ou bien l'expérimentateur peut faire une nouvelle mesure du recul de la quantité de mouvement de la boîte, auquel cas il ou elle peut prédire exactement l'énergie ou la couleur du photon émis. Qu'est-ce que l'expérience montre? Einstein dit :

[...]

Si ce genre d'effet physique de B [la boîte] sur le quantum de lumière qui s'est échappé, se produit, ce serait une action à distance, qui se propage avec une vitesse supraluminaires. Une telle hypothèse est bien sûr logiquement possible, mais elle est tellement contraire à mon instinct de physicien, que je ne suis pas en mesure de la prendre au sérieux – indépendamment du fait que nous ne pouvons nous faire aucune idée claire de la structure d'un tel processus.

Ainsi, je me sens contraint de penser que l'état réel des choses correspondant au quantum de lumière est indépendant de ce qui est par la suite mesuré sur B. Mais de cela, il suit : chaque caractéristique du quantum de lumière qui peut être obtenue à partir d'une mesure ultérieure sur B existe même si cette mesure n'a pas été effectuée. En conséquence, le quantum de lumière a une localisation précise et une couleur précise.

Naturellement, on ne peut pas rendre justice à cela au moyen d'une fonction d'onde. Ainsi je penche vers l'opinion que la fonction d'onde ne décrit pas (complètement) ce qui est réel, mais seulement ce qui est pour nous la connaissance maximale empiriquement accessible concernant ce qui existe vraiment. C'est ce que je veux dire quand j'avance l'idée que la mécanique quantique donne une

*description incomplète de l'état réel des choses. (c'est l'auteur qui souligne)*²⁴³

« Une telle hypothèse est bien sûr logiquement possible, mais c'est tellement contraire à mon instinct de physicien, que je ne suis pas en mesure de la prendre au sérieux » Einstein affirme. Il va rejeter cette action à distance instantanée. Rétrospectivement, on peut voir que cette détermination à distance de ce qu'on peut mesurer, déterminer ou prédire sur le photon séparé est en contradiction avec les principes de localité et de séparabilité exposés par Howard ci-dessus. Cette action à distance instantanée est bien sûr en contradiction aussi avec sa théorie de la relativité.

Aussi, dans les deux lettres ci-dessus, celle d'Ehrenfest à Bohr et celle d'Einstein à Epstein, le scénario est un peu différent sans pour autant qu'on puisse dire qu'il a abouti à une autre expérience de pensée²⁴⁴. Dans la dernière, Einstein décrit des opérations plus compliquées que celles de peser la boîte ou mesurer le temps de l'ouverture de l'obturateur. Ils consistent à ancrer au cadre la boîte en mouvement avec l'observateur et à mesurer la position ou quantité de mouvement pour prédire le temps et l'énergie. Néanmoins, le RS et la CEP dans les deux lettres sont les mêmes. Regardons alors comment on peut représenter dans notre structure les deux dernières étapes de cette expérience de pensée, dans ces versions du scénario.

²⁴³ "A photon-box can move freely in the x-direction. An observer rides with the box and has at his or her disposal various instruments, including a clock for timing the opening of the shutter and tools with which to measure the box's position. Before starting the experiment, the observer allows the box to come to rest, something that can be determined by means of light emitted from the box being reflected from a distant wall. Of course, knowing that the box is at rest, that is, that it has zero momentum in the x-direction means that its position is unknown. Now the experimenter opens and closes the shutter at a definite time, allowing one photon to emerge. At this point, the experimenter has an option to measure one of two things. He or she can either anchor the box to the reference frame, permitting a precise measurement of the box's position, and thus a prediction of the exact time when the emitted photon will be received at some distant location S, which means, says Einstein, a "sharp determination of the position of the photon." Or the experimenter can make a new measurement of the box's recoil momentum, in which case he or she can predict exactly the energy or color of the emitted photon. What does the experiment show? Einstein says: Were that kind of a physical effect from B[Box] on the fleeing light

quantum to occur, it would be an action at a distance, that propagates with superluminal velocity. Such an assumption is of course logically possible, but it is so very repugnant to my physical instinct, that I am not in a position to take it seriously--entirely apart from the fact that we cannot form any clear idea of the structure of such a process.

Thus I feel myself forced to the view that the real state of affairs corresponding to the light quantum is independent of what is subsequently measured on B. But from that it follows: every characteristic of the light quantum that can be obtained from a subsequent measurement on B exists even if this measurement is not performed. Accordingly, the light quantum has a definite localization and a definite color.

Naturally one cannot do justice to this by means of a wave function. Thus I incline to the opinion that the wave function does not (completely) describe what is real, but only a to us empirically accessible maximal knowledge regarding that which really exists. This is what I mean when I advance the view that quantum mechanics gives an incomplete description of the real state of affairs" *Ibid.* pp. 102-103.

²⁴⁴ Dans deux autres lettres à Rosenfeld et Ehrenfest, Einstein va décrire encore deux autres scénarios de la boîte à photons, mais toujours avec le même RS et CEP, cf. Howard 1985, *Op.cit.*, p. 104.

7.6.2.1 La structure de l'EP de la boîte à photons contre la complétude

La structure de l'EP de la boîte à photons se décrit de la façon suivante :

RS de la boîte à photons contre la complétude : On peut prédire soit l'énergie soit le temps du photon émis selon la mesure effectuée sur la boîte, mais après la séparation du photon.

Du RS à la CEP: Le RS décrit une situation « paradoxale »²⁴⁵, c'est-à-dire nomologiquement possible uniquement si on postule une « action à distance instantanée ».

CEP de la boîte à photons : Comme Einstein rejette cette « action à distance instantanée », il conclut que la mécanique quantique est incomplète, dans le sens où elle attribue deux fonction ψ pour la même réalité qu'est la particule non mesurée.

Notons enfin qu'Einstein, dans une lettre à Ehrenfest en 1932, admettra explicitement que cette conclusion n'est pas « logiquement nécessaire » :

« Ainsi, sans aucune expérimentation sur m , il est possible de prédire, selon un choix libre, soit la quantité de mouvement ou la position de m avec, en principe, une précision arbitraire. C'est la raison pour laquelle je me sens motivé pour attribuer une réalité objective aux deux [variables]. Cela n'est sûrement pas logiquement nécessaire, je le reconnais »²⁴⁶.

7.6.2.2 La réponse de Bohr sur la boîte à photons contre la complétude

En fait, la conclusion d'Einstein sur l'incomplétude n'est pas logiquement nécessaire car on peut très bien rejeter la localité (ou la séparabilité), et cela de différentes manières. Néanmoins, Bohr n'adopte pas cette option explicitement, mais rejette la conclusion de l'expérience de pensée. Son argument paraît moins convaincant que celui contre la boîte à photons employée pour dénoncer l'incohérence de la mécanique quantique :

« Je ne pouvais pas être en accord avec l'orientation de ses remarques [d'Einstein] telles que les rapporte Ehrenfest. À mon avis, il ne pourrait y avoir aucune autre façon de juger inadéquat un formalisme mathématique logiquement cohérent que de démontrer la divergence de ses conséquences avec l'expérience ou de prouver que ses prévisions n'épuisent pas les possibilités d'observation, et l'argumentation d'Einstein ne pourrait être dirigée vers aucune de ces fins. En fait,

²⁴⁵ Einstein cité par Rosenfeld. Cité dans Howard 1990, p. 104, "but is it not very paradoxical? How can the final state of the second particle be influenced by a measurement performed on the first, after all physical interaction has ceased between them?"

²⁴⁶ "Thus, without any experiment on m , it is possible to predict, according to a free choice, either the momentum or the position of m with in principle arbitrary accuracy. This is the reason why I feel myself motivated to attribute objective reality to both. It is to be sure not logically necessary, that I concede" Traduit par l'auteur, Einstein cité dans Howard 1990, p.104.

nous devons réaliser que dans le problème en question, nous ne traitons pas d'un seul dispositif expérimental spécifié, mais qu'on fait référence à deux arrangements différents, mutuellement exclusifs. Dans l'une, la balance, conjointement avec un autre appareil, comme un spectromètre, est utilisée pour l'étude du transfert d'énergie d'un photon, dans l'autre, un obturateur réglé par une horloge standard conjointement avec un autre appareil du même genre, chronométré de façon précise par rapport à la base, est utilisé pour l'étude du temps de propagation d'un photon sur une distance donnée. Dans ces deux cas, comme l'admet également Einstein, on attend que les effets observables soient en parfaite conformité avec les prédictions de la théorie.

Le problème souligne à nouveau la nécessité de considérer l'ensemble du dispositif expérimental, dont la spécification est impérative pour toute application bien définie du formalisme de la mécanique quantique. »²⁴⁷

Quelle notion de possibilité est impliquée dans la réponse de Bohr ? Apparemment c'est quelque chose de plus strict que la possibilité nomologique. Einstein, en décrivant la mesure sur la boîte, décrit un scénario nomologiquement possible: rien ne nous empêche de faire l'une ou l'autre mesure sur la boîte une fois que le photon est loin de la boîte et donc séparé d'elle.

Pour Bohr, même si le scénario de l'expérience de pensée d'Einstein n'a rien d'impossible, par opposition à la mesure simultanée et précise des deux variables dans le cas de la boîte à photons utilisée contre la cohérence de la mécanique quantique, le scénario de cette boîte à photons employée contre la complétude ne correspond pas, néanmoins, à une situation acceptée par son interprétation de la mécanique quantique. Selon Bohr, il faut toujours prendre en compte toute l'expérience bien spécifiée, et donc si l'on mesure le temps, on peut prédire le temps et si l'on mesure l'énergie, on peut prédire l'énergie. On voit bien ici que cette dernière réponse est moins convaincante que la première, et on est enclin à prendre au sérieux la conclusion d'Einstein contre la complétude.

Sans entrer dans les débats scientifiques et philosophiques sur la mécanique quantique, on comprend bien l'attitude de Bohr concernant le pouvoir des expériences de pensée réfutatoires. La seule chose que ces dernières peuvent faire est de montrer qu'il existe une expérience précise, où le choix de la mesure effectuée est bien défini, et qui contredit les prédictions de la mécanique

²⁴⁷ "I could not agree with the trend of his remarks as reported by Ehrenfest. In my opinion, there could be no other way to deem a logically consistent mathematical formalism as inadequate than by demonstrating the departure of its consequences from experience or by proving that its predictions did not exhaust the possibilities of observation, and Einstein's argumentation could be directed to neither of these ends. In fact, we must realize that in the problem in question we are not dealing with a single specified experimental arrangement, but are referring to two different, mutually exclusive arrangements. In the one, the balance together with another piece of apparatus like a spectrometer is used for the study of the energy transfer by a photon, in the other, a shutter regulated by a standardized clock together with another apparatus of similar kind, accurately timed relatively to the dock, is used for the study of the time of propagation of a photon over a given distance. In both these cases, as also assumed by Einstein, the observable effects are expected to be in complete conformity with the predictions of the theory.

The problem again emphasizes the necessity of considering the *whole* experimental arrangement, the specification of which is imperative for any well-defined application of the quantum-mechanical formalism." Bohr 1949 *Op. cit.* pp. 229-230.

quantique « par la démonstration de la divergence de ses conséquences avec l'expérience ou en prouvant que ses prévisions n'épuisent pas les possibilités d'observation ». Pour Bohr, il faut alors prendre en compte tout l'arrangement expérimental, dont la spécification est impérative dans le cadre de la mécanique quantique.

Néanmoins, on voit mal ce qui doit être rejeté dans le scénario d'Einstein ; la complétude de la mécanique quantique est défendue au détriment de la localité. Ainsi rien dans le scénario d'Einstein ne s'avère impossible, la non-localité nous dit que les mesures faites sur la boîte, ou sur l'autre particule dans EPR, continuent à influencer les prédictions qu'on peut faire sur la particule séparée. Ainsi, si la mécanique quantique est complète, on doit avoir une sorte d'action à distance, qui sera postulée avec beaucoup de finesse dans la littérature de la mécanique quantique. Action à distance qu'Einstein rejetait, comme il le disait à Epstein ci dessus : « elle est si contraire à mon instinct de physicien, que je ne suis pas en mesure de la prendre au sérieux ».

7.6.3 ETP : une boîte à photons différente

La boîte à photons sera réexaminée en 1931 par Einstein, Tolman, and Podolsky (« Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics »), ce que Howard appelle ETP. Au lieu de laisser passer un photon et de faire une des deux mesures sur la boîte, objet macroscopique, maintenant la boîte laisse échapper deux photons de deux trous différents, dont l'ouverture est actionnée par le même obturateur, donc au même moment. Une des particules parcourt un trajet court, SO, et l'autre un trajet plus long SRO, elle est reflétée vers O par un miroir qui se trouve sur R (figure 7.1). Voyons comment la boîte à photons d'ETP est utilisée dans ce texte, avec un autre but que celui de montrer l'incomplétude ou l'incohérence de la mécanique quantique.



Figure 7.1 : ETP

Les auteurs commencent par préciser les deux mesures sur la boîte et sur la première particule :

“On pèse la boîte avec précision avant et après l’ouverture de l’obturateur, afin de déterminer l’énergie totale des particules qui se sont échappées, et l’observateur en O est muni de moyens d’observer l’arrivée des particules, une horloge pour mesurer leur heure d’arrivée, et certains appareils pour mesurer leur quantité de mouvement. De plus, [...] la distance SO est suffisante pour que la fréquence de l’horloge à O ne soit pas perturbée par l’effet gravitationnel impliqué dans la pesée de la boîte, et la distance SRO est très longue, afin de permettre une nouvelle pesée précise de la boîte avant l’arrivée de la seconde particule. » (C’est nous qui soulignons)²⁴⁸

Ainsi, en explicitant que l’horloge n’est pas affectée par les effets gravitationnels causés par la pesée de la boîte, ETP prévoient explicitement une réponse à la critique faite par Bohr contre la boîte à photons en termes de cohérence de la mécanique quantique ; cette critique ne peut pas s’appliquer à leur scénario.

Les auteurs continuent en décrivant une mesure supplémentaire, celle de la quantité de mouvement de la première particule avant son arrivée en O :

« Supposons maintenant que l’observateur en O mesure la quantité de mouvement de la première particule à l’approche le long du chemin SO , puis mesure le temps à l’arrivée. Bien sûr, cette dernière observation, faite par exemple à l’aide d’un éclairage à rayons gamma, va changer la quantité de mouvement d’une manière inconnue. Néanmoins, connaissant la quantité de mouvement de la particule dans le passé, et donc aussi sa vitesse passée et son énergie, il semblerait possible de calculer le moment où on a dû ouvrir l’obturateur, à partir du moment connu de l’arrivée de la première particule, et de calculer l’énergie et la vitesse de la seconde particule, à partir de la perte connue dans le contenu énergétique de la boîte lorsque l’obturateur est ouvert. Il semblerait alors possible de prédire à l’avance à la fois l’énergie et le temps à l’arrivée de la seconde particule, un résultat paradoxal puisque l’énergie et le temps sont des quantités qui ne commutent pas dans la mécanique quantique. »²⁴⁹

²⁴⁸ “The box is accurately weighted before and after the shutter has opened in order to determine the total energy of the particles which have left, and the observer at O is provided with means for observing the arrival of particles, a clock for measuring their time of arrival, and some apparatus for measuring momentum. Furthermore [...] the distance SO being sufficient so that the rate of the clock at O is not disturbed by the gravitational effect involved in weighing the box, and the distance SRO being very long in order to permit an accurate reweighing of the box before the arrival of the second particle” Traduit par l’auteur, p.781, Einstein, Albert, Tolman, Richard Chase, et Podolsky, Boris, 1931, Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics, *Physical Review*, 37: 780-781.

²⁴⁹ “Let us now assume that the observer at O measures the momentum of the first particle as it approaches along the path SO , and then measures its time of arrival. Of course the latter observation, made for example with the help of gamma-ray illumination, will change the momentum in an unknown manner. Nevertheless, knowing the momentum of the particle in the past, and hence also its past velocity and energy, it would seem possible to calculate the time when the shutter must have been open from the known time of arrival of the first particle, and to calculate the energy and velocity of the second particle from the known loss in the energy content of the box when the shutter is opened. It would then seem possible to predict beforehand both the energy and the time of arrival of the second particle, a paradoxical result since energy and time are quantities which do not commute in quantum mechanics.” *Ibid.*

Ce scénario conduit ainsi à une violation du principe de Heisenberg, car on est en mesure de prédire les deux variables de temps et d'énergie de la particule non mesurée, suite aux mesures sur la boîte et sur la première particule. Mais les auteurs vont montrer que ce n'est qu'une contradiction apparente :

« L'explication de ce paradoxe apparent doit résider dans le fait que la quantité de mouvement de la particule passé ne peut pas être déterminée avec précision comme il est décrit. En effet, nous sommes forcés de conclure qu'il ne peut y avoir aucun mécanisme pour mesurer la quantité de mouvement d'une particule sans changer sa valeur [...] Il faut donc conclure que les principes de la mécanique quantique doivent impliquer une incertitude dans la description des événements passés qui est analogue à l'incertitude pour la prédiction d'événements futurs. »²⁵⁰

Leur conclusion montre qu'Einstein ne pensait plus que le principe de Heisenberg était faux, sinon il aurait utilisé cette expérience de pensée pour le réfuter. En fait, dans cet article, c'est l'inverse qui se produit ; comme les auteurs ont confiance en ce principe, ils vont montrer que le RS ne tient pas et concluent en élargissant la portée du principe à la rétrodictioin, c'est-à-dire à la prédiction exacte du passé des deux variables des particules quantiques.

7.6.3.1 La structure d'ETP

La structure de cette expérience de pensée se trouve directement dans leur paragraphe d'introduction :

« Le but de la présente note est de discuter d'une expérience idéale simple qui montre que la possibilité de décrire le cheminement passé d'une particule conduirait à des prédictions sur le comportement futur d'une seconde particule, d'un type non autorisé par la mécanique quantique [RS].

On conclura donc que les principes de la mécanique quantique impliquent effectivement une incertitude dans la description des événements passés qui est analogue à l'incertitude dans la prédiction d'événements futurs. [CEP]

²⁵⁰ “The explanation of the apparent paradox must lie in the fact that the past momentum of the particle cannot be accurately determined as described. Indeed, we are forced to conclude that there can be no mechanism for measuring the momentum of a particle without changing its value [...] It is hence to be concluded that the principles of the quantum mechanics must involve an uncertainty in the description of past events which is analogous to the uncertainty for the prediction of future events.” *Ibid.*

Et il sera montré, pour ce cas d'étude, que cette incertitude dans la description du passé découle d'une limitation de la connaissance qu'on peut obtenir par la mesure de la quantité de mouvement [RS à la CEP] »²⁵¹.

Elle se présente de la façon suivante :

RS d'ETP : On peut simultanément prédire les deux variables (temps et énergie) de la seconde particule en effectuant des mesures sur la première particule et sur la boîte.

Du *RS à la CEP*: Le RS décrit une situation qui doit être nomologiquement impossible selon le principe de Heisenberg. Les auteurs sont « forcés de conclure » que le processus de mesure de la quantité de mouvement sans modifier sa valeur doit être alors impossible. Donc ETP rejettent la possibilité nomologique du scénario. La seule façon de rejeter cette possibilité est de conclure que :

CEP d'ETP : Le principe de Heisenberg s'applique aussi à la détermination de la trajectoire passée de la particule.

7.6.3.2 Similarités et différences entre ces boîtes à photon

La structure que nous proposons révèle une similitude avec l'interprétation de la boîte à photons d'Einstein et de Bohr comme dirigée contre la cohérence. Elle nous montre aussi pourquoi cette dernière doit être analysée comme une seule expérience de pensée à deux scénarios. Dans ETP, on a à la fois le RS d'Einstein et la réponse de Bohr, c'est comme si les auteurs d'ETP rejetaient leur propre CEP :

Dans ETP et dans la version de la boîte à photons contre la cohérence de la mécanique quantique proposée par Einstein, le RS est le même, il décrit la possibilité nomologique d'une prédiction, ou d'une détermination, simultanée des deux variables conjuguées d'une particule séparée dans l'espace de la boîte, suite à des mesures effectuées sur un autre système. Dans les deux cas le RS est en contradiction avec le principe d'indétermination de Heisenberg

Dans ETP et dans la réponse de Bohr contre la version de la boîte à photons destinée à réfuter la cohérence de la mécanique quantique, les auteurs rejettent la possibilité nomologique du scénario et refusent donc que le RS en découle. Mais ils procèdent un peu différemment : dans ETP,

²⁵¹ “The purpose of the present note is to discuss a simple ideal experiment which shows that the possibility of describing the past path of one particle would lead to predictions as to the future behaviour of a second particle of a kind not allowed in the quantum mechanics [RS].

It will hence be concluded that the principles of quantum mechanics actually involve an uncertainty in the description of past events which is analogous to the uncertainty in the prediction of future events. [CEP]

And it will be shown for the case in hand, that this uncertainty in the description of the past arises from a limitation of the knowledge that can be obtained by measurement of momentum “ [RS à la CEP] *Ibid.*

les auteurs rejettent la possibilité nomologique de la situation décrite dans le RS et infèrent que le scénario doit contenir un processus impossible, à savoir, la mesure de la quantité de mouvement sans changer sa valeur. Tandis que Bohr précise les particuliers et les théories impliqués dans le scénario et arrive à montrer que le RS ne découle plus si on donne une meilleure description du scénario d'Einstein. Les deux présentations vont préciser le fonctionnement d'un certain processus de mesure dans le scénario d'origine afin de montrer que le RS ne découle plus à partir de ce scénario.

Cette comparaison nous montre qu'on peut soutenir une des deux options suivantes :

A- Une seule expérience de pensée d'ETP, avec deux scénarios présentés simultanément par les auteurs, et donc aussi une seule expérience de pensée de la boîte à photons contre la cohérence de la mécanique quantique, avec deux scénarios, ceux d'Einstein et de Bohr.

B- Deux expériences de pensée d'ETP et donc deux expériences de pensée de la boîte à photons.

L'option B est un résultat tout à fait bizarre car on est clairement en présence d'une seule expérience de pensée dans l'article de deux pages d'ETP.

Quant à la fonction de l'expérience de pensée d'ETP, elle est différente de celle de la boîte à photons contre la cohérence ou contre la complétude de la mécanique quantique. On peut l'analyser comme une exploration théorique qui succède à l'articulation d'une théorie : les auteurs disent explicitement que « l'explication du paradoxe apparent » se trouve dans l'application du principe de Heisenberg à la rétrodiction comme à la prédiction. En ce sens, cette expérience de pensée ressemble à celle de Langevin car c'est la bonne application de la théorie qui résout le paradoxe apparent du RS. Mais, ETP vont plus loin que simplement la bonne application du principe, en apportant une idée nouvelle, puisqu'ils étendent le principe à la rétrodiction. Cette expérience de pensée se trouve en quelque sorte entre les expériences de pensée qui succèdent et celles qui précèdent l'articulation d'une théorie.

Leur conclusion limite aussi ce qu'on peut espérer mesurer sur un objet macroscopique ; en effet les auteurs notent en conclusion « Enfin, il est particulièrement intéressant de souligner la remarquable conclusion que les principes de la mécanique quantique imposeraient réellement des

limites à la localisation dans le temps d'un phénomène macroscopique comme l'ouverture et la fermeture d'un obturateur. »²⁵²

Suivons enfin encore une fois l'analyse faite par Howard de la version de la boîte à photons contre la complétude de la mécanique quantique. Il cherche à montrer que l'expérience de pensée d'ETP *aurait pu être utilisée différemment* par Einstein, car, nous dit Howard, comme dans le cas d'EPR, ce n'est pas Einstein, mais cette fois Tolman qui a écrit l'article. Selon Howard, Einstein aurait pu penser à quelque chose d'autre, qui va ressembler de plus en plus au scénario d'EPR :

« Mais elle [cette expérience de pensée] se prête évidemment à d'autres usages qui auraient pu être plus intéressants pour Einstein. Ainsi, si l'on prend comme particules à nouveau des photons (dont la vitesse est une constante connue), et qu'on a la possibilité de mesurer soit le temps d'arrivée du premier photon, soit son énergie, et de prédire ainsi soit le temps d'arrivée du deuxième photon, soit son énergie (couleur). Mais la géométrie de l'expérience (la grande distance de O du réflecteur) assure que les mesures effectuées sur le premier photon ne peuvent pas affecter la seconde, si nous supposons [les principes de] séparabilité et de localité, et donc le temps de l'arrivée du deuxième photon en O et son énergie, correspondent à des propriétés du photon réelles indépendamment. Une fois encore, l'hypothèse de séparabilité conduit à des résultats en conflit avec la théorie quantique. »²⁵³

Bien sûr, ETP selon Tolman et ETP selon Howard sont deux expériences de pensée différentes, le scénario, le RS et la CEP étant différents, sans être contradictoires.

En revanche, ETP selon Howard et la version de la boîte à photons contre la complétude de la mécanique quantique sont la même expérience de pensée. Même si le scénario est un peu différent (selon qu'on laisse échapper une ou deux particules), le RS (on peut prédire soit l'énergie, soit le temps du photon émis selon la mesure effectuée sur l'autre système) et la CEP (la mécanique quantique est incomplète) sont identiques.

7.6.4 La double fonction des expériences de pensée contre la complétude : réfutatoire, puis exploratoire

²⁵² “Finally, it is of special interest to emphasize the remarkable conclusion that the principles of quantum mechanics would actually impose limitations on the localization in time of a macroscopic phenomenon such as the opening and closing of a shutter.” *Ibid.*

²⁵³ “But it obviously lends itself to other uses that may have been of more interest to Einstein. Thus, if the particles are once again taken to be photons (whose velocity is a known constant), then one has the option of measuring either the time of arrival of the first photon or its energy and thus predicting either the time of arrival of the second photon, or its energy (color). But the geometry of the experiment (the great distance of the reflector from O) insures that measurements performed on the first photon cannot affect the second, if we assume separability and locality, and thus that both the time of the second photon's arrival at O and its energy correspond to independently real properties of the photon. Once again, the assumption of separability leads to results in conflict with the quantum theory.” Traduit par l'auteur, Howard 1990, *Op.cit.*, p. 101.

Dire que la mécanique quantique est incomplète n'est pas la fin de l'histoire mais le début. Certes, la conclusion principale de l'expérience de pensée de la boîte à photons est que la mécanique quantique est incomplète, donc elle a une fonction réfutatoire au sens large du terme, comme celle du chat de Schrödinger. Néanmoins la question de ce qu'il faut tirer de la conclusion de ces expériences de pensée reste entière et largement débattue dans la littérature philosophique et scientifique sur la mécanique quantique. Comme le soulignent Bacciagaluppi et Valentini « La complétude ou incomplétude [de la mécanique quantique] reste encore une question ouverte. »²⁵⁴

Einstein est tout aussi explicite sur la fonction d'exploration théorique de ces expériences de pensée contre la complétude. Il soutient qu'il faut explorer une théorie future qui soit complète, et donc différente de la mécanique quantique. Par exemple Einstein explique dans ses remarques sur les articles rassemblés dans le volume de Schilpp où l'article de Bohr apparaît, parmi tant d'autres :

« Si la théorie quantique statistique ne prétend pas décrire complètement le système individuel (et son évolution dans le temps), il semble inévitable de chercher ailleurs une description complète du système individuel ; ce faisant, il serait clair dès le début que les éléments d'une telle description ne sont pas contenus dans le schéma conceptuel de la théorie quantique statistique. Avec celle-ci, on admettrait que, par principe, ce schéma ne pourrait pas servir de base de la physique théorique. En supposant le succès des efforts pour réaliser une description physique complète, la théorie quantique statistique serait, dans le cadre de la physique future, dans une position à peu près analogue à la mécanique statistique dans le cadre de la mécanique classique. Je suis assez fermement convaincu que le développement de la physique théorique sera de ce type; mais le chemin sera long et difficile. »²⁵⁵.

Ainsi, comme le dit Einstein, il faut explorer une physique future complète, mais hélas, la physique n'a pas évolué comme il le souhaitait.

La fonction d'exploration des expériences de pensée, et des arguments plus généraux qui utilisent une expérience de pensée comme EPR ou celui d'Einstein contre la complétude de la mécanique quantique, ont façonné cette théorie et son développement. Le développement des états

²⁵⁴ “with completeness or incompleteness remaining an open question” Traduit par l'auteur, Bacciagaluppi, G. et A. Valentini, 2009, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge: Cambridge University Press, p. 197.

²⁵⁵ “[I]f the statistical quantum theory does not pretend to describe the individual system (and its development in time) completely, it appears unavoidable to look elsewhere for a complete description of the individual system; in doing so it would be clear from the very beginning that the elements of such a description are not contained within the conceptual scheme of the statistical quantum theory. With this one would admit that, in principle, this scheme could not serve as the basis of theoretical physics. Assuming the success of efforts to accomplish a complete physical description, the statistical quantum theory would, within the framework of future physics, take an approximately analogous position to the statistical mechanics within the framework of classical mechanics. I am rather firmly convinced that the development of theoretical physics will be of this type; but the path will be lengthy and difficult.” Traduit par l'auteur, p.602, Albert Einstein, 1949, Remarks Concerning the Essays Brought Together in this Co-operative Volume, dans Schilpp, 1949, *Op.cit.*, pp. 665-688.

intriqués en est un exemple, comme le souligne l'article de Stanford sur EPR : "Le développement des états "intriqués" par Schrödinger, [...] a aussi commencé avec sa correspondance [avec Einstein] au sujet d'EPR. »²⁵⁶

Par ailleurs, l'immense littérature sur le problème de la mesure, que nous n'avons pas traité dans cette thèse car il mériterait à lui seul une thèse, est une conséquence directe de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger (ainsi que de l'article EPR) et trouve sa source dans le débat entre Einstein et Bohr, comme le souligne l'article de Stanford dédié au problème de la mesure en mécanique quantique : « Depuis la création de la mécanique quantique (MQ) le concept de mesure s'est révélé une source de difficultés dont on trouve une expression concrète dans les débats Einstein-Bohr, à partir desquels se sont développés le paradoxe d'Einstein Podolsky Rosen aussi bien que celui du chat de Schrödinger »²⁵⁷

7.6.5 Conclusion

Cette analyse de l'évolution de la boîte à photons nous montre comment des changements dans un scénario ne débouchent pas toujours sur des expériences de pensée différentes ; c'est uniquement en regardant le but du scientifique, dans son utilisation des différents scénarios, qu'on peut dire qu'on est en présence de différentes expériences de pensée ou d'une réutilisation de la même expérience de pensée :

Quand un scénario modifié est utilisé pour différents buts, comme la boîte à photons selon Bohr ou selon Ehrenfest, ou celle d'ETP, on est en présence de différentes expériences de pensée, trois dans ce cas.

Néanmoins le scénario un peu modifié peut aussi être réutilisé pour répondre à la même question cible. La boîte à photons apparaît dans diverses lettres d'Einstein à Ehrenfest, Rosenfeld et Epstein. Dans ces cas, on est bien en présence d'une réutilisation de la même expérience de pensée contre l'incomplétude de la mécanique quantique. Certes leur scénario sera un peu modifié, mais le RS et CEP seront les mêmes, ou presque. Les différences entre ces différentes réutilisations de la boîte à photons se trouvent dans la procédure de mesure ; si on mesure uniquement sur la boîte, et si on laisse échapper une ou deux particules. Elles peuvent porter aussi sur les manipulations faites sur la boîte, comme par exemple l'ancrer dans son cadre.

²⁵⁶ "Schrödinger's development of "entanglement", the term he introduced as a general description of the correlations that result when quantum systems interact, also began in this correspondence over EPR." Traduit par l'auteur.

²⁵⁷ "From the inception of Quantum Mechanics (QM) the concept of measurement proved a source of difficulties that found concrete expression in the Einstein-Bohr debates, out of which both the Einstein Podolsky Rosen paradox and Schrödinger's cat paradox developed" Traduit par l'auteur.

Enfin, la boîte à photons, selon l'interprétation contre la complétude aboutit au même CEP, ou presque, que le chat de Schrödinger (*cf.* 2.4), mais ce sont bien deux expériences de pensée. Une différence notable entre elles est que la critique contre l'incomplétude d'Einstein ne traite pas de la description par la fonction ψ des objets macroscopiques, comme l'expérience de pensée du chat²⁵⁸, tandis que celle de Schrödinger ne traite pas des mesures de variables qui ne commutent pas. Cette boîte à photons contre la complétude échappe aussi à la critique de Bohr, qui souligna l'impossibilité nomologique du scénario de la boîte à photons dirigé contre la cohérence de la mécanique quantique. Rappelons que la réponse de ce dernier consistait à montrer qu'on ne peut pas effectuer simultanément, et avec une précision arbitraire, les deux mesures sur la boîte, afin de déterminer le temps du passage du photon et son énergie à ce moment. Dans l'interprétation contre la complétude, on mesure *soit* l'une *soit* l'autre variable, mais pas les deux simultanément.

7.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une structure commune pour les expériences de pensée, qui décrit leur mécanisme interne, et qui met en évidence le rôle des particuliers et des théories dans les scénarios des expériences de pensée. On a aussi insisté sur l'importance de spécifier la notion de possibilité nomologique mise en jeu dans chaque scénario :

Le scientifique analyse, certes implicitement, le RS qui découle du déroulement de son scénario, et le compare à la situation décrite dans ce RS. Donc, selon que le RS découle d'un scénario nomologiquement possible, impossible, ou bien avec une possibilité nomologique indéterminée, la conclusion que le scientifique obtient dépend principalement de cette possibilité. Cette structure nous montre alors comment et si un scientifique a raison de soutenir sa conclusion par le biais de son expérience de pensée.

Notre approche répond aussi à un test simple proposé par Norton :

« *Un test pour toute épistémologie des expériences de pensée* : Comment allons-nous savoir que nous avons une épistémologie viable des expériences de pensée ? Je propose un test simple. [...] Nous pouvons avoir des cas dans lesquels une expérience de pensée était un résultat et où une autre expérience de pensée était la négation du même résultat. C'est ce que j'appellerai les paires «expérience de pensée – contre-expérience de pensée. » Une épistémologie des expériences de

²⁵⁸ Einstein décrit à Schrödinger dans une lettre une expérience de pensée proche de celle du chat qui consiste à décrire avec la fonction ψ l'état macroscopique d'une quantité de poudre à canon.

pensée doit être capable de nous décrire les raisons pour lesquelles au moins une de ces deux expériences de pensée échoue. *Il ne nous suffit pas de savoir par d'autres moyens que l'une ou l'autre échoue.* Nous devons être en mesure d'expliquer ce qui allait de travers dans l'expérience de pensée manquée elle-même. Considérons la situation analogue pour l'expérimentation réelle. Nous pouvons être convaincus que le résultat rapporté par une certaine expérience est incorrect; il peut contredire une théorie fermement soutenue, par exemple. Si nous voulons conserver notre confiance dans l'expérimentation, nous devons - au moins en principe - être en mesure d'expliquer comment l'expérience pourrait produire un résultat fallacieux. » (C'est nous qui soulignons.)²⁵⁹

Même si Norton n'applique pas ce test, et donc la paire « expérience de pensée – contre-expérience de pensée », à la boîte à photons d'Einstein/Bohr, nous voyons bien que ces deux expériences de pensée (selon Norton) ou deux scénarios d'une seule expérience de pensée selon notre structure, correspondent à ce test. Notre structure identifie l'expérience de pensée fautive, celle d'Einstein dans ce cas, car son scénario s'avère être nomologiquement impossible et donc son RS ne suit plus du déroulement du scénario. Ainsi, notre approche épistémologique répond à ce simple test, et ainsi selon le critère de Norton, on a proposé « une épistémologie viable des expériences de pensée ».

Nous avons également analysé dans ce chapitre le débat entre Bishop et Norton sur l'identité des expériences de pensée. Ce débat, construit à partir de l'exemple de la boîte à photons, révèle que la question de savoir ce qu'il faut considérer comme une ou plusieurs expériences de pensée était confuse. Cela nous a conduit à analyser l'histoire de cette expérience de pensée et de ses nombreuses utilisations et interprétations. Nous soutenons dans ce cadre qu'une expérience de pensée doit être identifiée par sa structure ainsi que par sa fonction, qui apparaît dans sa conclusion, la CEP. Le physicien conçoit un scénario précis afin de répondre à une question précise. Un autre physicien, ou le même, peut réutiliser ce scénario, certes un peu modifié, soit pour répondre à la même question afin de réfuter la réponse du premier, soit pour réaffirmer sa réponse initiale de la même façon. Dans les deux cas, on est en présence d'une unique expérience de pensée, certes avec des scénarios modifiés.

Les deux versions des scénarios de la boîte à photons contre la cohérence de la mécanique quantique sont un exemple du premier cas évoqué ci-dessus : Bohr améliore le scénario d'Einstein

²⁵⁹ “A test for any epistemology of thought experiments How are we to know that we have a viable epistemology of thought experiments? I propose a simple test. [...] We can have cases in which one thought experiment supports a result and another thought experiment supports the negation of the same result. These I will call “thought experiment – anti thought experiment pairs.” An epistemology of thought experiments must give us some account of why at least one of these fails. It is not enough for us to know by other means that one or other fails. We must be able to explain what went wrong in the failed thought experiment itself. Consider the analogous situation with real experimentation. We may be convinced that the result reported by some experiment is incorrect; it may contradict firmly held theory, for example. If we are to retain confidence in experimentation, we must – at least in principle – be able to explain how the experiment could produce a spurious result” Norton, 2002, *Op.cit.* p. 45.

en précisant la procédure de mesure et conclut que la boîte à photons ne montre pas de contradiction au sein de la mécanique quantique, alors que c'était la conclusion qu'Einstein souhaitait obtenir. On est donc en présence d'une même expérience de pensée développée en deux scénarios qui diffèrent par la précision de leurs particuliers, compris comme processus, et donc par leur place à « l'arrière plan » ou au « premier plan » ; et aussi par les théories applicables au fonctionnement de ces processus.

Les différentes versions de l'expérience de pensée de la boîte à photons contre la complétude de la mécanique quantique dans les différentes lettres d'Einstein sont un exemple du second cas ci-dessus. Elles montrent l'évolution d'une seule et même expérience de pensée destinée à répondre à la même question cible, et cela de la même façon.

Notons enfin que le fait de préciser la description des particuliers dans une expérience de pensée, comme le fait Bohr, n'est pas une condition suffisante pour conclure qu'on est en présence d'une seule expérience de pensée. Prenons le cas de Smoluchowski : son scénario, et en particulier le fonctionnement de son démon, est certes mieux décrit que celui de Maxwell. Néanmoins le but de Smoluchowski, et donc la question cible de son expérience de pensée, est différent. On peut alors dire qu'on a deux expériences de pensée différentes.

Concluons en soulignant encore une fois l'importance d'une analyse historique de chaque cas d'étude. Howard, sans participer directement au débat épistémologique sur les expériences de pensée, fournit un historique détaillé de l'évolution de la boîte à photons qui débouche sur EPR et enfin sur l'argument d'incomplétude d'Einstein. Si on accepte cette analyse historique, et on a toutes les raisons de le faire, on trouve que l'histoire de la boîte à photons s'avère plus riche que le débat sur la possibilité de mesurer les deux variables simultanément sur la boîte afin de réfuter le principe de Heisenberg et de faire apparaître ainsi une contradiction au sein de l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique. Einstein visait en fait la complétude de la mécanique quantique, avec cette expérience de pensée. Cette dernière évolue dans les années 1930 pour arriver à la « pureté conceptuelle » d'EPR, selon Howard, ou de l'argument d'incomplétude d'Einstein. Selon ce dernier, dans sa lettre à Epstein de 1945, c'est bien l'expérience de pensée de la boîte à photons qui l'a mené à l'argument d'incomplétude. Cette analyse ouvre plusieurs questions : cela veut-il dire que l'expérience de pensée de la boîte à photons se réduit à l'argument d'incomplétude d'Einstein ? Einstein était-il en train d'exécuter un argument en exécutant l'expérience de pensée ? Ces questions restent ouvertes et une réponse demanderait une étude plus poussée des travaux d'Einstein, de l'évolution de sa pensée, des processus cognitifs qui entrent en jeu lors de l'exécution

d'un argument et lors de l'exécution d'une expérience de pensée. Selon l'approche de Nersessian, quand on exécute une expérience de pensée, on construit un modèle mental qui ne se réduit pas à une forme propositionnelle. Notre approche des expériences de pensée reste silencieuse sur ces aspects ; nous avons cherché avant tout à comprendre le mécanisme interne des expériences de pensée et non les processus cognitifs des scientifiques qui les conçoivent, puis les exécutent dans leur esprit.

Enfin, si Norton souhaite appeler cette structure argument dans le cadre d'une logique générale, alors notre structure se trouve en accord avec son idée que les expériences de pensée sont des arguments. C'est la forme de l'argumentation dans les expériences de pensée qui nous a intéressé tout au long de cette thèse, avec la subtilité impliquée dans la notion de possibilité nomologique du scénario, le rôle et la place des particuliers et processus, et la dynamique d'évolution des expériences de pensée.

Tableaux :

Pour que le lecteur se retrouve plus facilement dans les multitudes de cas d'étude présentés dans cette thèse, nous résumons la structure et la notion de possibilité impliquée dans chaque expérience de pensée, dans les deux tableaux suivant :

Ce premier tableau expose la structure de chaque expérience de pensée.

Tableau 1 : Structure des cas d'étude

Structure des cas d'étude (cf. 7.3 and 7.4)	Scénario	RS (Résultat du Scénario)	Raisonnement du RS à la CEP	CEP (Conclusion de l'Expérience de Pensée)	Réponses contre l'EP et évolutions courante de l'EP
Boîte à photons contre la cohérence de la mécanique quantique (MQ) (cf. 2.3)	Nomologiquement possible	Il est possible de déterminer simultanément les deux variables complémentaires de temps et d'énergie du photon en effectuant les deux mesures simultanées sur la boîte	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible mais la situation décrite est nomologiquement impossible selon le principe de Heisenberg. On a une contradiction : la MQ permet d'affirmer A et non A	La MQ est montrée incohérente : Rejeter le principe, de Heisenberg, qui rend la situation décrite dans le RS nomologiquement impossible.	Nier que le RS s'obtient avec une meilleur description du scénario. Le scénario original est montré nomologiquement impossible suite au passage des éléments décrits dans ce scénario de l'arrière-plan vers le premier plan.
Boîte à photons contre la complétude de la mécanique quantique (cf. 7.6.2)	Nomologiquement possible	On peut prédire soit l'énergie soit le temps du photon émis selon la mesure effectuée sur la boîte, mais après la séparation du photon.	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible mais la situation décrite est "Paradoxal"; c'est à dire le RS n'est nomologiquement possible que si on postule un nouveau principe (celui de l'action à distance). Rétrospectivement, surtout avec l'argument général d'Einstein, on peut voir une contradiction entre : localité/séparabilité et action à distance	Einstein rejette cet ajout car il est en contradiction avec le principe de localité, et donc avec ses théories de la relativité. La MQ est incomplète : Elle attribue 2 états théoriques différents (2 fonctions ψ) pour la même réalité.	-Rejeter que le scénario soit pertinent (Bohr) : il faut spécifier quelle mesure on fait, donc on a deux réalités différentes selon la mesure sur la boîte -Rejeter un des deux principes : localité ou action à distance. C'est plutôt la localité qui est rejetée de nos jours. Sans pour autant qu'on postule une action à distance

Structure des cas d'étude (cf. 7.3 and 7.4)	Scénario	RS (Résultat du Scénario)	Raisonnement du RS à la CEP	CEP (Conclusion de l'Expérience de Pensée)	Réponses contre l'EP et évolutions courante de l'EP
ETP (Einstein, Tolman, et Podolosky, cf. 7.6.3)	Nomologiquement possible	On peut simultanément prédire les deux variables (temps et énergie) de la seconde particule en effectuant des mesures sur la première particule et sur la boîte.	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible mais la situation décrite est nomologiquement impossible selon le principe de Heisenberg. On a une contradiction : la MQ permet d'affirmer A et non A.	ETP rejettent la possibilité nomologique de leur scénario, et donc que le RS s'obtienne. Ils font passer le processus de mesure de la quantité de mouvement de l'arrière plan vers le premier plan. ETP concluent : Le principe de Heisenberg s'applique aussi aux événements passés.	- On peut imaginer qu'un physicien va soutenir que le scénario est nomologiquement possible et donc réfute le principe de Heisenberg ! - Aussi on peut imaginer que ETP était proposé contre une expérience de pensée qui visait à réfuter le principe de Heisenberg (comme la réponse de Bohr à Einstein par exemple) C'est à dire on imagine la même évolution que celle d'Einstein/Bohr avec la boîte à photon contre la cohérence de la MQ.
Démon de Maxwell (cf. 3.2 and 6.3)	Possibilité nomologique reste indéterminé	Les molécules lentes d'un côté et les rapides de l'autre.	La situation décrite dans le RS est nomologiquement possible selon la théorie cinétique, mais impossible selon la deuxième loi de la thermodynamique. Comme le RS n'est pas obtenu d'un scénario nomologiquement possible, la deuxième loi n'est pas complètement rejetée. On a une incohérence externe entre deux théories.	Maxwell modifie une des deux théories pour rétablir la cohérence : La deuxième loi est de nature statistique, elle s'applique aux molécules prises en masse.	- Rendre le scénario nomologiquement possible pour décider si l'une des deux théories doit être complètement rejetée. Les processus passent de l'arrière-plan au premier plan - Utiliser l'EP pour argumenter en faveur d'un nouveau principe. - Evaluer l'(im)possibilité nomologique d'un démon général (i.e. qui ne dépend pas d'un mécanisme particulier).
Tour de Pise de Galilée (cf. 2.2)	Nomologiquement possible	Un mobile chute plus rapidement et plus lentement qu'un même autre.	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible mais la situation décrite dans le RS est Absurde	Rejeter la théorie qui permet d'aboutir à cet RS : La théorie d'Aristote est fausse.	Rejeter les idéalizations.

Structure des cas d'étude (cf. 7.3 and 7.4)	Scénario	RS (Résultat du Scénario)	Raisonnement du RS à la CEP	CEP (Conclusion de l'Expérience de Pensée)	Réponses contre l'EP et évolutions courante de l'EP
Chat de Schrödinger (cf. 2.4)	Nomologiquement possible	Un chat à la fois mort et vivant.	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible mais la situation décrite dans le RS est Absurde.	Rejeter l'aspect de la théorie qui permet d'aboutir à cet RS : MQ est incomplète.	-Accepter l'absurdité - Rejeter qu'on obtient le RS du déroulement du scénario (la réponse de Bohr)
Jumeaux de Langevin (cf. 3.4)	Nomologiquement possible	Chacun des frères est plus âgé et moins âgé que l'autre.	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible mais la situation décrite dans le RS est Absurde.	La théorie n'est pas correctement appliquée. Le physicien rejette que le RS s'obtienne suite à la bonne application de la théorie de relativité restreinte	-Explorer l'application d'une autre théorie par rapport à cet RS : ce que la relativité générale nous dit sur ce scénario. -Rejeter la théorie, en soutenant que l'absurdité s'obtient; l'absurdité n'est pas seulement apparente (cf. citation de Jammer dans 3.4 où il mentionne les différentes réponses face à cette expérience de pensée)
Canon de Newton (cf. 3.3)	Nomologiquement possible	Différents phénomènes terrestres et célestes sont décrits par la même théorie.	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible et la situation décrite dans le RS est nomologiquement possible.	La théorie est exposée sur un exemple simple.	Rejeter les idéalizations.
L'ascenseur d'Einstein (cf. 3.5)	Nomologiquement possible	Équivalence observationnelle dans les deux référentiels.	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible et la situation décrite dans le RS est nomologiquement inexistante. L'équivalence observationnelle n'est pas théorique. Pire, la théorie newtonienne, avec la notion de mouvement absolu, offre deux descriptions théoriques différentes.	Postulation d'un nouveau principe qui rend cette équivalence observationnelle, nomologiquement équivalente.	-Ce principe deviendra, 8 ans après, un postulat de la nouvelle théorie de relativité générale. -Rejeter les idéalizations pour rejeter le principe d'équivalence postulé dans la CEP.

Structure des cas d'étude (cf. 7.3 and 7.4)	Scénario	RS (Résultat du Scénario)	Raisonnement du RS à la CEP	CEP (Conclusion de l'Expérience de Pensée)	Réponses contre l'EP et évolutions courante de l'EP
Dîner de Norton (cf. 7.4.2)	Nomologiquement impossible	Un processus de digestion inversé	Le processus de la digestion réversible est nomologiquement possible mais jamais observé	Rejeter que la réversibilité temporelle d'une loi physique s'exprime directement dans les phénomènes	
Le démon de Laplace (cf. 6.3.1)	Nomologiquement possible	« L'intelligence [...] embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome »	Le RS est obtenu d'un scénario nomologiquement possible et la situation décrite dans le RS est nomologiquement possible.	Le monde est déterministe, conclusion métaphysique	- Rejeter la possibilité nomologique du scénario. Le scénario original est montré nomologiquement impossible suite au passage des éléments décrits dans ce scénario de l'arrière-plan vers le premier plan

Ce second tableau expose la structure des différentes expériences de pensée selon la notion de possibilité de leur scénario.

Tableau 2 : Structure selon la possibilité du scénario

Les deux symboles après chaque expériences de pensée indiquent, respectivement, le RS et la CEP correspondants

Structure selon la possibilité du scénario	Nomologiquement possible	Possibilité nomologique reste indéterminé	Nomologiquement impossible
Scénario	<ul style="list-style-type: none"> - La tour de Pise *\$ - Le chat de Schrödinger *\$ - Les jumeaux de Langevin *^ - La boîte à photon contre la cohérence #S - ETP #^ - La boîte à photon contre la complétude !S - L'ascenseur d'Einstein @ & - Le canon de Newton % ~ 	Le démon de Maxwell	Le dîner de Norton
RS	<ul style="list-style-type: none"> * Absurdité # Contradiction ! Paradoxal @ Équivalence observationnelle mais pas théorique % Équivalence observationnelle et théorique 	Incohérence externe entre deux théorie	Nomologiquement possible mais jamais observé
CEP	<ul style="list-style-type: none"> \$ Rejeter la théorie ou un aspect théorique & Postuler un principe ^ Exposer la bonne application de la théorie ~ Exposer la théorie 	La cohérence est rétablie en modifiant une des deux théories	Modifier la théorie
Réponses contre l'EP et évolutions courante de l'EP	<ul style="list-style-type: none"> - Rejeter les idéalizations - Nier que le RS s'obtienne - Rejeter la possibilité nomologique du scénario - Rejeter que le scénario est pertinent pour la théorie 	<ul style="list-style-type: none"> - Faire passer certains éléments de l'arrière plan vers le premier plan (Smoluchowski, Feynman). - Utiliser l'EP pour argumenter en faveur d'un nouveau principe (Szilard, Bennett) - Evaluer l'(im)possibilité nomologique d'un démon généra selon la mécanique statistique (Norton Vs Hemmo et Shenker) 	

Conclusion

Dans le but d'évaluer l'efficacité épistémique des expériences de pensée, nous avons tenté dans cette thèse de montrer que toute approche épistémologique de ces outils scientifique doit répondre à au moins deux séries de questions :

La première, que la plupart des approches traitent explicitement, est de nature purement épistémique : Si des expériences de pensée peuvent nous apprendre quelque chose de nouveau sur le monde et nos théories, alors de quelle nature est cette connaissance ? Et comment ? Est-ce qu'elles justifient leurs conclusions ? Et de quelle façon ? Les réponses à cet ensemble de questions ne peuvent pas être données par un ou deux exemples car les expériences de pensée sont diverses et remplissent des fonctions épistémologiques différentes. Bon nombre des approches qu'on trouve dans la littérature, prétendent répondre à ces questions. Elles définissent ce que sont expériences de pensée, comment elles fonctionnent et comment elles justifient leur conclusion (la plupart du temps en les réduisant à un autre outils scientifique), et la nature de la connaissance nouvelle qu'elles prétendent nous offrir.

La deuxième série de questions, que nous avons analysées dans cette thèse, concerne les notions de possibilité que nous devrions nous attendre à trouver dans les scénarios des expériences de pensée. Puisque ce sont des expériences de pensée, plutôt que des expériences réelles, quelles restrictions devrions-nous imposer sur le scénario d'une expérience de pensée ? Autrement dit, quelle notion de possibilité devrions-nous nous attendre à trouver dans les expériences de pensée scientifique ?

Nous souhaitons, en guise de conclusion, ne pas revenir sur les détails de cette thèse mais plutôt sur notre méthodologie de travail, afin de souligner quelques points primordiaux. Notre analyse philosophique s'est voulue historique et scientifique. Scientifique, ou dans un contexte scientifique précis, car nous avons traité d'un outil *scientifique*, mal ou peu compris par les philosophes, mais utilisé par les scientifique depuis au moins Galilée, et si l'on croit Nicholas Rescher depuis les pré-socratique²⁶⁰. Historique, car comme nous y avons insisté tout au long de cette thèse, à chaque fois

²⁶⁰ Rescher, Nicholas, 1991, *Thought Experiments in Presocratic Philosophy*, dans T. Horowitz and G. Massey (eds.), *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Lanham: Rowman & Littlefield, 31–42.

qu'on entreprend l'analyse historique d'une expérience de pensée, cette dernière se retrouve beaucoup plus compliquée et subtile qu'elle n'en avait l'air au premier abord.

Notre analyse historique et contextuelle des trois cas d'étude, la tour de Pise de Galilée, le démon de Maxwell et la boîte à photon d'Einstein, nous montre clairement que dès lors que l'on s'intéresse à l'histoire d'un cas d'étude précis et au contexte scientifique de l'époque, on est toujours, tout au moins concernant ces trois expériences de pensée, récompensé philosophiquement. Il s'avère qu'à chaque histoire et chaque contexte s'ajoute l'évolution de chaque expérience de pensée, dont le moins qu'on puisse dire, est qu'elle est aussi intéressante et féconde scientifiquement, historiquement et philosophiquement, que l'original.

Ce que nous croyons profondément, suite à cette thèse, c'est qu'il faut prendre au sérieux ces deux aspects, historique et contextuel, pour produire une bonne analyse philosophique des sciences, au moins de ses outils. C'est ce que nous avons entrepris dans le cadre de cette thèse concernant l'outil qui y a été analysé, *les expériences de pensée scientifiques*.

Néanmoins, en disant cela, nous ne souhaitons pas adopter un historicisme débouchant sur le relativisme, comme on l'a tant vu durant le XX^e siècle, surtout suite aux travaux de Kuhn. Ce relativisme a fait tant de dommages à la philosophie des sciences, mais pas seulement ; on ne peut que mentionner ici les « dégâts » qu'a causé le relativisme dans de nombreuses actions publiques et politiques, dans ce que l'on appelle désormais « science wars » ou la « guerre des sciences » .

C'est bien le contraire que nous soutenons ; nous croyons qu'une étude historique peut très bien déboucher à une analyse rationnelle et objective de la connaissance. Tout au long de cette thèse nous avons essayé de rester fidèle à ces deux courants de pensée, sans pour autant succomber à la tentation de tomber dans leurs excès. Notre analyse historique a bien débouché sur une nouvelle approche des expériences de pensée qui se veut rationnelle et objective, comme elle nous fournit une méthode de justification propre : cette dernière est basée sur la structure générale et identifiante des expériences de pensée, sur une analyse des différentes notions de possibilité impliquées dans les expériences de pensée, et sur la conclusion que chaque expérience de pensée peut fournir. Même si dans chaque expérience de pensée, le scientifique peut employer des idéalizations qui peuvent être rejetées par la communauté scientifique, l'acceptation ou le rejet de ces idéalizations doit se faire sur des bases objectives et rationnelles.

L'aspect historique nous enseigne, ou tout au moins nous a enseigné tout au long de ce travail, qu'il faut toujours analyser la fonction qu'a eue un quelconque outil scientifique pour son praticien, et ce

n'est que par la suite que l'on peut se livrer à une analyse de sa méthode de justification propre ; cela vaut aussi bien pour les expériences réelle, les simulations informatiques, les modèles, et bien sûr les expériences de pensée.

Bibliographie

Bacciagaluppi, Guido. et Valentini Antony, 2009, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge: Cambridge University Press.2009

Bishop, Michael, 1999 Why Thought Experiments are not arguments, *Philosophy of Science*, 66:534–541.

Bohr, Niels, 1949, Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics Chapter 7 pp. 199-241 in Schilpp P.A. (éd.), 1949, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Cambridge University Press.

Brown, James Robert, 1991 [2010], *Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, [2ème édition], London: Routledge, Second Edition.

Brown, James Robert, 2004, Why Thought Experiments Transcend Empiricism, dans C. Hitchcock (éd.), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, Malden, MA: Blackwell, 23–43.

Brown, James Robert and Fehige, Yiftach, 2010 Thought Experiments, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2010 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <http://plato.stanford.edu/archives/win2010/entries/thought-experiment/>.

Buzzoni, Marco, 2010, Empirical Thought Experiments: A Transcendental-Operational View. *Epistemologia* XXXIII: 5-26.

Bitbol, Michel, 1992, *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil.

Earman, John and Norton, John.D., 1998, Exorcist XIV: The wrath of Maxwell's demon. Part I. From Maxwell to Szilard, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 29: 435–471.

Earman, John. and Norton, John.D., 1999, Exorcist XIV: The wrath of Maxwell's demon. Part II. From Szilard to Landauer, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 30: 1–40.

Einstein, Albert, Tolman, Richard Chase, et Podolsky, Boris, 1931, Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics, *Physical Review*, 37: 780-781.

Einstein, Albert, Podolsky, Boris, and Rosen, Nathan., 1935, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 47: 777-780.

Einstein, Albert et Infeld, Leopold, 1938, *The evolution of physics*, Cambridge University Press.

El Skaf, Rawad et Imbert, Cyrille, 2013, Unfolding in the empirical sciences: experiments, thought experiments and computer simulations, *Synthese*, 190: 3451–3474.

Feynman, Richard. P., Leighton, R. B., & Sands, M., 1977, *The Feynman lectures on physics*, original edition 1963. Boston: Addison-Wesley Publishing.

Fine, Arthur, 1986, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press.

Fine, Arthur, 2014, The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <http://plato.stanford.edu/archives/win2014/entries/qt-epr/>.

Galileo, Galilei, 1638, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, Traduit par Maurice Clavelin, Presses Universitaires de France 1995.

Galileo, Galilei, *De Motu Antiquiora*, 1590, la version électronique du manuscrit, http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/scientific_revolution/galileo/englishtranslation.

Gendler, Tamar S., 1998, Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiment, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 49: 397–424.

Gendler, Tamar S., 2000, *Thought Experiment: On the Powers and Limits of Imaginary Cases*, New York: Garland Press (now Routledge).

Hacking, Ian, 1993, “Do Thought Experiments have a Life of Their Own?”, *Proceedings of the Philosophy of Science Association*, 2: 302–308.

Heimann, P. M., 1970, “Molecular Forces, Statistical Representation and Maxwell's Demon”, *Studies in the History and Philosophy of Science*, 1: 189-211.

Hemmo, M. and Shenker, 2012, *The Road to Maxwell's Demon: Conceptual Foundations of Statistical Mechanics*; Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Howard, Don, 1985, Einstein on Locality and Separability. *Studies in History and Philosophy of Science* 16: 171–201

Howard, Don, 1990, “Nicht Sein Kann was Nicht Sein Darf,” or the Prehistory of EPR, 1909–1935: Einstein's Early Worries about the Quantum Mechanics of Composite Systems, dans Miller, Arthur I. (éd.) 1990, *Sixty two years of uncertainty*, NATO-ASI series B226, Plenum Press. pp. 61-111.

Howard, Don, 2007, Revisiting the Einstein-Bohr Dialogue *Iyyun: The Jerusalem Philosophical Quarterly* 56.

Humphreys, Paul, 1993, “Seven Theses on Thought Experiments”, in J. Earman *et al.* (eds.), *Philosophical Problems of the Internal and External World*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 205–227.

Jammer, Max, 1974, *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of QM in historical perspective*, John Wiley and Sons.

Klein, Martin, J., 1970, Maxwell, His Demon, and the Second Law of Thermodynamics, *American Scientist* Vol. 58, No. 1, pp. 84-97.

Koyré, Alexandre 1960 «Le *De Motu Graviorum* de Galilée. De l'expérience imaginaire et de son abus» *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, Tome 13 n°3, pp. 205-206/

Knott, Cargill Gilston, 1911, *Life and scientific work of Peter Guthrie Tait*, Cambridge: Cambridge University Press.

Krimsky, Sheldon, 1973, "The use and misuse of critical Gedankenexperimente", *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, 4: 323–334.

Krips, Henry, 2013, Measurement in Quantum Theory, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2013 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <http://plato.stanford.edu/archives/fall2013/entries/qt-measurement/>.

Kuhn, Thomas, 1964, "A function for thought experiments" (Reprinted from *The essential tension*, pp. 240–265, by T. Kuhn, Ed., 1977). Chicago: University of Chicago Press.

Langevin, Paul, 1911, L'évolution de l'espace et du temps, *Scientia* **10**: 31–54.

Laymon, Ronald, 1991, "Thought Experiments of Stevin, Mach and Gouy: Thought Experiments as Ideal Limits and as Semantic Domains", in T. Horowitz and G. Massey (eds.), *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Lanham: Rowman & Littlefield, 167–192.

Leff, Harvey S. and Rex, Andrew, 2003, *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.

Maxwell, James Clerk, 1891, *La Chaleur*, traduit par G. Mouret, Paris B Tignol. p. 421-422 traduction de J.C. Maxwell, 1871, *Theory of Heat*, London: Longmans, Green et Co.

Maxwell, James Clerk 1873, Molecules, *Nature*, p 437-441.

Miller, Arthur I. (éd.) 1990, *Sixty two years of uncertainty*, NATO-ASI series B226, Plenum Press.

Myrvold, Wayne C., 2011, Statistical mechanics and thermodynamics: A Maxwellian view, *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 42 (4): 237-243.

Nersessian, Nancy, 1992, How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science, dans R. Giere (ed.), *Cognitive Models of Science*, Minneapolis: University of Minnesota Press, 3–44.

Nersessian, Nancy, 1993, In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling, dans D. Hull, M. Forbes, and K. Okruhlik (eds.) PSA 1992, vol. 2, East Lansing, MI: Philosophy of Science Association, 291-301

Newton, Isaac, 1726, *Mathematical principles of natural philosophy*, Traduit par Andrew Motte, 1846.

Niven, W.D. (Ed.), 1965, *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, Vol.2, New York: Dover Publications.

- Norton, John D., 1991, Thought Experiments in Einstein's Work, dans T. Horowitz and G. Massey (eds.), *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Lanham: Rowman & Littlefield, 129–148.
- Norton, John D., 1996, Are Thought Experiments Just What You Thought?, *Canadian Journal of Philosophy*, 26: 333–366.
- Norton, John D., 2004, Why Thought Experiments Do Not Transcend Empiricism, dans Christopher Hitchcock (ed.) *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*. Oxford: Blackwell, 44–66.
- Norton, John D., 2005, Eaters of the lotus: Landauer's principle and the return of Maxwell's demon, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 36: 375–411.
- Norton, John D., 2007, *Einstein for everyone*, Nullarbor Press, 2007 Webbook
- Norton, John D. 2013, All Shook Up: Fluctuations, Maxwell's Demon and the Thermodynamics of Computation," *Entropy*, 15: 4432-4483.
- Paolo Palmieri, 2005a, 'Spuntar lo scoglio più duro': did Galileo ever think the most beautiful thought experiment in the history of science?, *Studies in History and Philosophy of Science* 36: 223–240.
- Paolo Palmieri, 2005b, Galileo's construction of idealized fall in the void, *History of Science.*, 43/4: 343–89.
- Popper, Karl, 1959, On the use and misuse of imaginary experiments, especially in Quantum Theory, dans *The Logic of Scientific Discovery*, London: Hutchinson, 442–456.
- Price, Huw, 2005 Einstein and the quantum spooks, dans C. Stewart & R Hewitt (eds.), *Waves of the Future*, Science Foundation for Physics, 221-233.
- Schrödinger Erwin, 1935 « Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik » *Naturwissenschaften*, 23, p. 807-812, 823-828, 844-849. Traduction française Michel Bitbol, 1992, *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil.
- Schilpp P.A. (éd.), 1949, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Cambridge University Press.
- Van Dyck, Maarten, 2005-2006, thèse doctorale, *An Archeology of Galileo's science of motion*, Université de GENT.

Rapport sur la soutenance de la thèse de Rawad El-Skaf « La structure des expériences de pensée scientifiques »

La soutenance a eu lieu le 7 juillet 2016 à l'Université Paris, place du Panthéon. Le jury comprend Jean Mosconi, Professeur émérite à l'Université Paris 1 ; Anouk Barberousse, Professeur à l'Université Paris IV (co-directrice) ; Maximilian Kistler, Professeur à l'Université Paris 1 (directeur de la thèse) ; John Norton, Professeur à l'Université de Pittsburgh ; Sébastien Gandon, Professeur à l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand (rapporteur) ; Denis Forest, Professeur à l'Université Paris Ouest Nanterre (président du Jury).

La soutenance commence à 14h. Dans un exposé liminaire de dix minutes, Rawad El-Skaf rappelle que les expériences de pensée constituent une énigme pour la philosophie des sciences, en tant qu'elles semblent permettre de dire quelque chose de nouveau sur la nature sans la consulter. Il rappelle ensuite quel a été son parcours, un Mémoire consacré au Démon de Maxwell l'ayant amené à la philosophie des sciences. Il résume ensuite clairement les positions défendues dans la thèse : les philosophes des sciences doivent se soucier davantage de la manière dont les scientifiques eux-mêmes utilisent et ont utilisé leurs expériences de pensée s'ils veulent comprendre la nature et la fonction de celles-ci ; le pouvoir épistémique des expériences de pensée est en particulier lié à leur capacité à agir comme des révélateurs d'incohérence et des instruments d'exploration théorique ; les expériences de pensée sont un outil scientifique *sui generis*, non-réductible à d'autres ; en ce qui concerne la relation des expériences de pensée au possible, il faut distinguer les cas, d'où l'utilité de la description d'une structure commune qui permet de classer ceux-ci. Certaines expériences de pensée utiles ont un scénario dont la possibilité nomologique reste indéterminée ; le scientifique conserve ainsi une grande latitude dans la conception de ses expériences de pensée.

Après cet exposé, Jean Mosconi prend la parole.

M. Mosconi rappelle d'abord que s'il a été initialement et pendant un certain temps le directeur officiel de la thèse de Rawad El Skaf, son rôle principal a été d'en faciliter le parcours administratif. Il veut d'emblée remercier chaleureusement tous ceux grâce auxquels cette thèse a pu être menée à bien et être soutenue ce jour : les membres du jury, John Norton, spécialiste réputé de la question, qui nous fait l'honneur de venir de Pittsburgh ; les deux rapporteurs, Denis Forest et Sébastien Gandon, qui ont accepté de travailler dans des délais très resserrés. M. Mosconi remercie particulièrement Mme Anouk Barberousse, qui dès le début a été de fait la directrice scientifique et a constamment guidé intellectuellement et soutenu moralement cette recherche ; et M. Max Kistler, qui a bien voulu devenir le directeur de cette thèse en cette année terminale, et dont la bienveillance et l'efficacité ont permis qu'elle vienne à bout des complexités administratives et qu'elle soit soutenue aujourd'hui là où elle avait été entreprise.

M. Mosconi est, dans le cas présent, spécialement heureux de voir cette thèse arriver à son terme dans de bonnes conditions après les difficultés qu'elle a traversées antérieurement du fait de circonstances fortuites. Il félicite particulièrement Rawad El Skaf du courage et de la détermination dont il a fait preuve pour poursuivre et achever cette tâche. Il n'en a pas été entièrement surpris, car il avait pu apprécier dès le début de ses travaux son enthousiasme et son engagement dans cette recherche, qui notamment l'ont amené à aller travailler quelque temps auprès du Professeur Norton à Pittsburgh.

M. Mosconi commencera par quelques remarques, banales mais brèves, sur la forme. Visiblement, le temps a manqué pour une dernière relecture pleinement efficace. Outre quelques fautes de frappe, il subsiste quelques maladresses dans l'écriture ; elles proviennent peut-être parfois de ce que la littérature du sujet est principalement en anglais et de ce que l'auteur a eu plus d'occasions de rédiger en anglais qu'en français sur ces questions. Il faudrait aussi homogénéiser certains choix de traduction, principalement dans les citations de Galilée. Malgré ces petits défauts auxquels il sera facile de remédier, la rédaction est claire et l'ensemble se lit agréablement. La profusion des abréviations (principalement au chapitre 7, RS, CEP, ...) peut d'abord déconcerter, mais se révèle naturelle et commode à l'usage. La mise en page du texte est claire et aérée ; celle des citations devrait être plus homogène.

Passant à des questions plus substantielles, M. Mosconi rencontre dans la thèse présentée quelques défauts et de grandes et nombreuses qualités. Avant d'évoquer plus en détail ces dernières, il ne cherchera pas à passer sous silence les premiers.

- Il y a dans l'ouvrage un peu trop de redites qui n'étaient pas inévitables, même si le plan choisi, tout à fait défendable, a amené l'auteur à revenir plusieurs fois sur les mêmes expériences de pensée (EP). Par exemple, les introductions de chapitre (et même l'Introduction générale) tendent trop systématiquement à prendre la forme d'un *abstract*. M. Mosconi souhaiterait qu'elles visent plus à montrer la pertinence des questions posées.

- Les longues et nombreuses citations de grands physiciens sont les bienvenues ; elles sont bien choisies et permettent au lecteur d'apprécier directement le style et la subtilité argumentative de Galilée ou d'Einstein, de Maxwell ou de Feynman ; mais elles sont suivies parfois par quelques lignes de citation partielle ou de paraphrase qui ne sont guère utiles dès lors que le texte est cité en français, et qui ne peuvent dispenser d'un véritable aperçu synthétique et d'un commentaire critique.

- La conclusion générale est trop maigre, alors que les réflexions rencontrées dans les chapitres précédents et notamment dans leurs conclusions respectives livraient de nombreux éléments disponibles pour l'étoffer.

M. Mosconi a beaucoup plus à dire sur les grandes qualités de la thèse présentée.

Il faut d'abord souligner la clarté du plan d'ensemble ainsi que le soin et la précision apportés à la subdivision des chapitres. De ce fait, la table des matières, très éclairante et commode,

permet de suivre aisément la progression de l'argumentation et pallie un peu l'absence provisoire d'un index.

Le choix consistant à aborder et à classer les EP d'abord par leur fonction a peut-être contribué à l'aisance et à la clarté de leur exposition aux chapitres 2 et 3. La familiarité ainsi acquise avec les EP présentées et avec leurs buts permet ensuite de s'attaquer dans de bonnes conditions à des questions plus complexes, les problèmes épistémologiques au chapitre 4, les problèmes de la possibilité nomologique au chapitre 6. Toutefois M. Mosconi ne cherche pas, par ces remarques, à minimiser l'intérêt de la Première partie, et notamment des réflexions de l'auteur sur la fonction d'exploration théorique à propos de l'ascenseur d'Einstein.

Le report de l'examen du problème épistémologique à la Partie II manifeste sans doute la prudence de M. El Skaf, mais celle-ci ne l'empêche pas de prendre position personnellement dans les débats, sans arrogance, mais avec netteté et vigueur et de manière argumentée. Il s'oppose à l'approche platonicienne de James Brown, mais il n'est pas entièrement d'accord avec celle de John Norton, spécialement sur la condition d'éliminabilité et sur le rôle des « particuliers » dans les EP. Son attention à la fonction de ceux-ci et à la manière dont ils sont utilisés est l'un des points spécialement intéressants de son approche, notamment à propos des EP de Galilée. M. Mosconi trouve très éclairantes les investigations menées ici à ce sujet, même si elles ne dispensent pas de réfléchir aux aspects logiques de la question.

Un aspect très convaincant de ce travail est d'avoir choisi de porter son attention sur les EP prises dans leur contexte théorique, dans l'ensemble de leur stratégie argumentative et dans leur développement historique. M. El Skaf nous livre ainsi un riche chapitre 5 sur l'EP de la Tour de Pise, où le retour sur la première théorie élaborée dans le *De Motu* a paru à M. Mosconi particulièrement éclairant. Il peut suggérer quels « obstacles épistémologiques » ont pu inciter Galilée à s'engager alors dans la voie erronée de la théorie de 1590 : généralisation hâtive (en vue d'une théorie valable pour tous les milieux) ; analogies égarantes, déductions incertaines (le poids spécifique est « médian » et c'est censé expliquer que la vitesse le soit aussi ; le poids spécifique joue toujours un rôle dans le plein, donc la théorie générale doit être fondée sur lui). Pour M. Mosconi, les remarques proposées sur les deux modes de justification de l'hypothèse H3 (la « médianeté » de la vitesse) sont très importantes car elles comblent certaines lacunes dans l'analyse de l'argument (pourquoi H3 n'est-elle jamais mise en cause ? Quelles expériences la corroborent ?).

L'auteur décrit avec soin toute la stratégie argumentative qui, par-delà l'EP proprement dite, permet à Galilée (dans les *Discorsi*) d'établir sa loi, en insistant sur le rôle décisif de l'argument de passage à la limite et surtout des expériences réelles sur le pendule. Cela aurait pu être une occasion de s'intéresser de façon un peu moins allusive à la question, dans quelle mesure une expérience réelle est d'abord une expérience de pensée – en tant qu'elle est pour une large part une construction théorique, comme Kant l'avait déjà souligné, précisément à propos des expériences de Galilée sur la chute ralentie.

Un autre exemple convaincant des bénéfices philosophiques qu'on peut tirer de l'approche historique choisie ici est fourni aux chapitres 6 et 7 par l'investigation détaillée qu'ils donnent des EP héritières de la Boîte à photons d'Einstein, du Congrès Solvay de 1930 aux considérations, parfois beaucoup plus tardives, sur les publications ETP et EPR.

L'EP du Démon de Maxwell fait l'objet de commentaires assez détaillés au chapitre 3 et l'auteur a étudié certains de ses prolongements au chapitre 6 (la question des démons mécaniques selon Smoluchowski et Feynman). On pourrait s'étonner et même regretter que soient seulement mentionnés fugitivement des développements plus récents de cette EP. M. Mosconi sait qu'en fait l'auteur connaît très bien la question, et c'est peut-être la richesse même de celle-ci qui l'a dissuadé de s'engager sur ce terrain très difficile et polémique, et à ne pas se détourner ainsi des buts plus limités qu'il s'était fixés dans cette thèse. C'était sans doute la voie la plus sage, eu égard au temps limité disponible pour terminer l'ouvrage.

M. Mosconi aurait, personnellement, quelques regrets d'une nature voisine concernant les problèmes de l'idéalisation, que la thèse aborde souvent, et de façon judicieuse, notamment à propos du vide chez Galilée, mais très succinctement à propos du Démon de Laplace. On évoque en deux lignes les problèmes que poserait sa « naturalisation ». En fait, même un ordinateur idéal ne pourrait pas toujours prédire ce qu'il adviendra d'un processus dont les lois déterministes lui seraient données, et cela pour des raisons qui ne relèvent même pas de la physique, mais des résultats de Turing sur la calculabilité. Plus récemment, la théorie algorithmique de l'information de Kolmogorov et Chaitin a permis d'explorer la notion de prédiction et de faire apparaître encore plus explicitement les limites de la prédiction. Et l'on retrouve précisément ici les recherches entreprises dans le sillage du Démon de Maxwell. L'imprécision de l'EP de Laplace, relevée à juste titre, n'empêche donc pas sa discussion d'être instructive.

En conclusion, estime M. Mosconi, Rawad El Skaf a présenté un travail bien informé, appuyé sur une solide bibliographie. Il a réalisé une étude claire, sérieuse et rigoureuse, dans laquelle il argumente avec honnêteté et modestie, mais il a affirmé franchement ses positions et les a bien défendues. Sa thèse, telle qu'elle est, à quelques détails près, est déjà un très bon travail, dont la qualité et l'intérêt méritent d'être sincèrement salués. Même si l'on aimerait le voir approfondir certains de ses développements, on ne peut lui reprocher de ne pas avoir surchargé la thèse en le faisant ici ; on espère seulement qu'elle sera prolongée, notamment dans de telles directions, par de nouveaux travaux.

Anouk Barberousse intervient ensuite.

C'est un travail préalable sur l'expérience de pensée du démon de Maxwell qui est à l'origine du travail de thèse de Rawad El Skaf. Dans ce travail de M2, il avait analysé les transformations de cette expérience de pensée ainsi que les différentes conclusions qui ont été successivement tirées de ses variantes. A partir de cette étude de cas remarquablement fouillée, il s'est tourné vers une réflexion plus générale sur les expériences de pensée scientifiques, qui a débouché sur le manuscrit présenté pour le doctorat. Il s'agit d'un manuscrit de 258 pages découpé en trois parties : la première présente des exemples d'expériences de pensée scientifiques et propose une typologie de leurs différentes fonctions, la deuxième présente et analyse le principal débat actuel en philosophie des sciences sur les expériences de pensée, et la troisième partie, constructive, propose une analyse nouvelle de la façon dont on peut tirer de la connaissance des expériences de pensée scientifiques.

La description qui vient d'être donnée de la thèse de Rawad El Skaf ne rend cependant pas compte d'une caractéristique qui mérite d'être soulignée d'emblée : la grande finesse de l'analyse historique qu'il propose de l'expérience de pensée galiléenne de la tour de Pise, qui est l'exemple le plus fouillé de la thèse. Ainsi Rawad El Skaf, afin de prendre position dans le débat entre James Brown et John Norton et de construire sa propre analyse du fonctionnement des expériences de pensée scientifiques, a-t-il cherché à comprendre de façon exhaustive, dans la limite des travaux d'histoire des sciences disponibles, quelles étaient les motivations de Galilée en proposant cette expérience de pensée sur la chute des corps, ainsi que les tenants et les aboutissants de sa démarche argumentative. Il en résulte une description et un examen critique de l'expérience de pensée de la tour de Pise plus complets et plus justes historiquement que ceux que l'on trouve en général dans les travaux de philosophie des sciences. Cette sensibilité aux usages effectifs des expériences de pensée qui caractérise la thèse de Rawad El Skaf est l'un de ses apports majeurs, car elle la distingue de nombreux travaux de philosophie des sciences qui se contentent de reconstructions simplifiées incapables, comme le montre il de façon convaincante, de saisir le rôle proprement épistémique des expériences de pensée utilisées dans l'activité scientifique.

Car le propos de cette thèse est bien de répondre de façon informée à la question soulevée par Thomas Kuhn, et rappelée dans l'exposé de soutenance : comment peut-on apprendre quoi que ce soit sur les phénomènes sans les observer ni procéder à une manipulation en laboratoire ? Qu'est-ce que les expériences de pensée peuvent nous apprendre de nouveau ? Rawad El Skaf n'est pas le premier à affronter cette question, mais il

est le premier à en proposer une analyse qui intègre les expériences de pensée dans une démarche argumentative, elle-même au coeur de l'activité scientifique dans les moments où le recours aux expériences de pensée est jugé décisif. Ainsi la présentation d'exemples d'expériences de pensée scientifiques dans la première partie de la thèse inclut-elle la prise en considération du contexte épistémique précis au sein duquel elles ont été proposées. C'est seulement à cette condition, comme la thèse le montre, que les fonctions des expériences de pensée, et donc leur nature, peuvent être analysées de façon plausible.

Les expériences de pensée dont l'apport de connaissance est présenté dans la première partie de la thèse sont tout d'abord celles qui ont eu une fonction réfutatoire (chapitre 2) : l'expérience de pensée de la tour de Pise, l'expérience de pensée de la boîte à photon proposée d'abord par Einstein, et dont l'interprétation a été transformée par Bohr, et enfin l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. Dans ces trois cas, Rawad El Skaf prend soin de présenter précisément le contexte dans lequel ces expériences de pensée ont été conçues et proposées aux interlocuteurs des scientifiques concernés, qui est à chaque fois un contexte de changement théorique. Il s'agit dans ces trois cas, grâce à l'expérience de pensée, de tenter de montrer que la théorie cible (la théorie du mouvement d'Aristote, la mécanique quantique telle que présentée par Heisenberg et Bohr) n'est pas cohérente ou complète.

Dans le chapitre 3, c'est la fonction exploratoire des expériences de pensée scientifiques qui est présentée à partir de quatre exemples nouveaux : le démon de Maxwell dans sa version originale, le boulet de canon de Newton, les jumeaux de Langevin et l'ascenseur d'Einstein. Rawad El Skaf montre dans chaque cas que l'exploration théorique rendue possible par l'expérience de pensée peut elle-même avoir plusieurs rôles, un rôle pédagogique ou un rôle d'approfondissement conceptuel, qui ne sont pas incompatibles. De la même façon que dans le chapitre 2, Rawad El Skaf présente soigneusement dans ce chapitre dans quelle démarche argumentative se situe l'expérience de pensée et quel rôle elle joue pour celui qui la propose et la présente à ses interlocuteurs.

La deuxième partie de la thèse s'ouvre sur la présentation du débat actuel sur les expériences de pensée en philosophie des sciences. Ce sont principalement les approches de Brown et de Norton qui sont présentées, le premier voyant dans les expériences de pensée des outils platoniciens de saisie par l'esprit des lois de la nature alors que le second les analyse comme des arguments logiques, une fois qu'il en a éliminé ce qu'il appelle les « particuliers », c'est-à-dire les éléments impropres à l'analyse logique, et qui, en tant que tels, sont supposés ne jouer aucun rôle dans l'efficacité épistémique des expériences de pensée.

Ce chapitre 4 d'exposition prépare l'un des chapitres-phare de la thèse, le chapitre 5, qui présente les résultats du renouveau de l'historiographie galiléenne pour ce qui est de l'expérience de pensée de la tour de Pise. S'appuyant en particulier sur les travaux de Paolo Palmieri, Rawad El Skaf retrace l'évolution de la pensée de Galilée à propos de ce qu'il convient de conclure de cette expérience de pensée. En donnant ainsi une dimension historique à cette expérience de pensée très célèbre, et qui sert de terrain au débat entre Norton et Brown, Rawad El Skaf montre combien sont réductrices les analyses qui ne s'appuient que sur l'état final de cette expérience de pensée, présenté par Galilée en 1638 dans les *Discours concernant deux sciences nouvelles*. Mieux, il montre aussi, et c'est à mon sens l'un des résultats importants de cette thèse, combien il est important de distinguer, dans l'analyse philosophique, entre le *résultat* d'une expérience de pensée et sa *conclusion*. Le résultat d'une expérience de pensée est ce à quoi aboutit le processus imaginaire qui est décrit, alors que la conclusion est l'énoncé auquel l'auteur de l'expérience de pensée veut aboutir en la présentant. C'est ce dont il cherche à convaincre ses interlocuteurs grâce au résultat auquel il a abouti en pensée, de la même façon qu'il le ferait s'il avait atteint le même résultat dans une expérience en laboratoire. L'analyse historique à laquelle procède Rawad El Skaf dans le chapitre 5 permet de mettre cette distinction en lumière. Une fois ce chapitre lu, on ne peut plus confondre résultat et conclusion d'une expérience de pensée. On a donc là un acquis philosophique important. En particulier, Rawad El Skaf met l'accent sur un aspect de l'expérience de pensée de la tour de Pise qui est souvent passé sous silence, à savoir que Galilée n'a pas seulement imaginé cette expérience dans le vide, mais bien en tenant compte de la résistance du milieu. Intégrer toute la richesse des variations prises en compte par Galilée permet à Rawad El Skaf de lui rendre sa profondeur scientifique propre.

Dans la troisième partie de la thèse, Rawad El Skaf commence par examiner une question dont il montre qu'elle est indispensable à la compréhension de l'efficacité des expériences de pensée : à partir du moment où l'auteur d'une expérience de pensée décrit des scénarios imaginés, incluant certains processus qui sont seulement possibles (et non réalisés), ou d'autres qui sont impossibles, il va de soi qu'il est nécessaire, pour bien comprendre quelle conclusion il peut en tirer, que la notion de possibilité impliquée soit bien claire -- or quelle est-elle ? Dans ce chapitre d'une grande subtilité philosophique et scientifique, Rawad El Skaf distingue plusieurs cas, selon que la possibilité en jeu est « nomologique », c'est-à-dire définie par la compatibilité avec les lois dont l'auteur de l'expérience de pensée pense qu'elles s'appliquent aux différents éléments de son scénario, ou selon qu'elle reste indéterminée. Comme il l'a indiqué clairement dans son exposé de soutenance, les cas où la

notion de possibilité en jeu est indéterminée peuvent sembler difficiles à comprendre, car que peut-on tirer d'utile d'une telle indétermination ? Exemples à l'appui (en particulier celui du démon de Maxwell), il montre que le travail intellectuel de l'expérience de pensée peut avoir précisément pour but d'explorer une telle indétermination pour la réduire. Quiconque possède une certaine familiarité avec le travail théorique en physique sait combien il est difficile, en général, d'évaluer si telle ou telle situation est nomologiquement possible : l'établissement de la compatibilité logique avec les lois admises doit souvent être conquise de haute lutte, et Rawad El Skaf met bien en évidence cet aspect du travail scientifique. On peut lui savoir gré d'avoir insisté sur cette difficulté propre au travail théorique, dans le contexte d'un débat philosophique qui a parfois tendance à en réduire les aspérités. Souligner l'importance de ces situations où la possibilité d'un scénario est indéterminée, c'est rappeler aux lecteurs que l'établissement d'une loi scientifique soulève autant de questions qu'elle n'en résout, ce qui conduit à une certaine humilité intellectuelle qui est le quotidien du théoricien, mais pas toujours celui du philosophe des sciences.

Dans le septième et dernier chapitre, enfin, Rawad El Skaf synthétise les acquis de son travail d'analyse en identifiant la structure commune à toutes les expériences de pensée et en montrant comment cette structure permet de produire des connaissances à partir de plusieurs exemples. Il nomme cette entreprise, qui est la clé de voûte de l'ensemble de la thèse, une approche « directe » des expériences de pensée, c'est-à-dire une approche qui ne les réduit pas à d'autres instruments de connaissance, comme les arguments ou les intuitions, mais les considère pour elles-mêmes, ancrées dans leur contexte scientifique spécifique, et, surtout, porteuses d'une dynamique propre. C'est l'application de cette proposition théorique nouvelle aux exemples déjà analysés précédemment qui montre le mieux la fécondité de cette approche directe car elle permet de prendre en compte de nombreux éléments généralement omis dans les analyses philosophiques des expériences de pensée scientifiques.

Au total, on a un manuscrit de thèse relativement court, mais dense, bien structuré, revenant à plusieurs reprises sur les mêmes exemples -- un tableau récapitulatif des exemples est proposé aux pages 247-249, qui permet utilement de faire le point sur les acquis de la thèse à leur propos. Il est suivi d'un autre tableau (p. 250), qui classe les exemples d'expériences de pensée selon le type de possibilité qu'elles mettent en jeu. L'effort pédagogique manifesté dans ces tableaux est représentatif de l'ensemble du manuscrit : rien d'obscur dans cette thèse, mais la trace d'une poursuite constante de clarification de problèmes philosophiques qui se sont révélés toujours plus denses et difficiles au fur et à mesure de la progression de ce travail sur une dizaine d'années. Le résultat final en est

partiellement trompeur : il s'agit de la synthèse purifiée d'une réflexion quasi-incessante pour comprendre en profondeur comment il est possible d'apprendre quoi que ce soit sur les phénomènes sans manipulation matérielle. C'est la difficulté de cette question a requis ces années de travail car Rawad El Skaf n'a pas voulu se contenter d'une réponse partielle, mais a cherché à construire une « approche » philosophique qui le convainque entièrement. Une telle exigence philosophique est rare dans une thèse.

Ainsi l'objet de ce manuscrit, qui peut sembler restreint au premier abord, est-il de fait d'une richesse philosophique que l'on pouvait soupçonner, mais que le travail de Rawad El Skaf a grandement contribué à mettre au jour. On peut rétrospectivement identifier la principale difficulté méthodologique à laquelle il a eu à faire face : une fois qu'on a pris conscience de la richesse des expériences de pensée, on peut être tenté d'aller chercher dans une étude historique approfondie la réponse aux questions philosophiques qu'elles soulèvent. Or une telle étude est souvent sans fin, puisque le travail constant des historiens des sciences met régulièrement au jour de nouvelles données textuelles et de nouvelles interprétations dont il faut tenir compte dans l'analyse philosophique. Où s'arrêter dans la quête de matériaux historiques ? La méthode suivie par Rawad El Skaf dans le chapitre 5 de la thèse, qui présente des résultats récents de l'historiographie galiléenne, est un modèle du genre, car il prend soin de ne porter à la connaissance du lecteur que ce qui, dans le travail historique, illustre et enrichit son analyse générale des expériences de pensée. Ce faisant, il présente de façon claire et concise le revirement interprétatif de l'expérience de la tour de Pise qui doit avoir lieu lorsque comme lui on se demande comment Galilée prend en compte un milieu qui n'est pas vide. Les développements présentés dans ce chapitre ont une portée tout autant philosophique qu'historique, de même que ceux sur les expériences de pensée d'Einstein qui ont structuré les débuts de la mécanique quantique au chapitre 7. La qualité de l'articulation entre histoire et philosophie des sciences est remarquable dans ce travail, ce qui a été souligné plusieurs fois durant la soutenance.

En conclusion, on peut dire que le manuscrit de thèse réussit le tour de force de présenter une approche nouvelle, originale des expériences de pensée scientifique, et ce de façon concise et claire malgré la difficulté du sujet. Parmi les acquis de ce travail, qui seront, je l'espère, bientôt publiés, je mentionnerai notamment la distinction entre le *résultat* d'une expérience de pensée et la *conclusion* de l'argument qui la mobilise, ainsi que la démonstration que certaines expériences de pensée peuvent mettre en jeu une possibilité indéterminée, ou proposer un scénario impossible. On a là à mon sens d'une contribution majeure non seulement à la philosophie des expériences de pensée, mais encore à la

philosophie des sciences théoriques, car il ne s'agit pas moins que d'interroger la nature même des hypothèses théoriques et du travail intellectuel consistant à en dégager les implications. Ce travail, particulièrement difficile, est le coeur des disciplines théoriques et rares sont les travaux philosophiques qui lui rendent justice avec autant de pertinence. C'est dans l'analyse que fait Rawad El Skaf de *l'évolution* des expériences de pensée au cours des années, voire des décennies, que ce travail souvent collectif d'approfondissement des implications des hypothèses théoriques est particulièrement bien mis en valeur. L'insistance sur la dimension collective des expériences de pensée scientifiques doit également être mise au crédit de Rawad El Skaf.

J'indiquerai pour finir que la grande culture scientifique et historique de Rawad El Skaf, qui résulte de la fréquentation assidue des arguments des grands théoriciens, donne à sa thèse une profondeur rarement atteinte dans un travail doctoral. La discussion qui a eu lieu lors de la soutenance a pleinement manifesté les effets de cette culture, qui a conduit Rawad El Skaf à des réponses toujours modestes et nuancées.

Max Kistler prend ensuite la parole.

J'ai repris la direction de la thèse de M. El Skaf lorsqu'il s'est inscrit de nouveau à l'université Paris 1 après une interruption. A ce moment-là, le travail était déjà pratiquement achevé. Je n'ai donc aucun mérite dans la réussite de ce beau travail, et je suis honoré et reconnaissant d'avoir pu jouer le rôle formel de directeur jusqu'à la soutenance.

M. El Skaf élabore une conception originale des expériences de pensée (expression qui sera désormais abrégée en « ep ») en science selon laquelle les ep sont un instrument du travail scientifique qui occupe une place à part à côté de l'expérience et du raisonnement, instrument qui ne se réduit donc ni à l'un ni à l'autre. Il prend position par rapport à deux conceptions majeures défendues dans la littérature contemporaine. Contre la conception platoniste de Brown, R. El Skaf montre que les ep ne permettent pas de saisir directement des lois de la nature, et que leur fonction est plus modeste, notamment celle de réfuter des théories ou d'en explorer d'autres. Contre l'analyse de Norton qui assimile les ep à des arguments, R. El Skaf montre que les particuliers qui figurent dans les scénarios des ep ne sont pas toujours éliminables, ce qui serait nécessaire pour transformer une ep en un argument. Surtout, il montre, et c'est sans doute l'une des thèses les plus intéressantes de la thèse, qu'une ep peut être légitime et féconde même s'il n'est pas certain que son scénario soit nomologiquement possible, c'est-à-dire, si la possibilité nomologique de ce scénario reste indéterminée, ce qui est notamment le cas de l'ep du démon de Maxwell.

La thèse de R. El Skaf est clairement structurée ; elle est en général bien rédigée, avec un grand souci de clarté. Les introductions et conclusions qui précèdent et clorent chaque chapitre permettent au lecteur de s'orienter dans le cheminement de l'argumentation. Son travail se distingue aussi par sa réussite dans l'exercice difficile d'intégrer l'histoire et la philosophie des sciences : il s'agit très clairement d'une thèse avant tout philosophique qui prend part dans un débat sur des thèses philosophiques au sujet des ep mais M. El Skaf développe ses arguments à partir d'une analyse soignée d'un certain nombre d'ep historiques qui sont examinées dans leur contexte historique d'origine, plutôt dans quelque reconstruction ultérieure.

Il y a un certain nombre d'aspects formels qui pourraient être améliorés, notamment en vue d'une publication qui me paraît hautement souhaitable.

1. Il serait très utile d'accompagner la thèse d'un index.

2. Il reste un certain nombre de coquilles qu'il faudrait corriger avant la publication.

3. Il me semble assez gênant de travailler, dans une thèse, avec des traductions, et de traduire à partir de traductions. Il faut lire les œuvres de Galilée en langue originale, et traduire directement du latin ou de l'italien. Cela peut être gênant, comme p. ex. p. 145, où on aimerait bien savoir quelles sont les expressions italiennes qui correspondent à « poids spécifique » et « gravité » dans la traduction.

De même, les textes d'Einstein (notamment pp. 225, 233) sont traduits à partir de traductions anglaises plutôt que de l'original allemand.

Il est maladroit (et difficilement compréhensible pour qui ne connaît pas l'expression anglaise correspondante) de traduire mot à mot l'expression anglaise « throw the baby out with the bathwater », ou un texte qui joue avec cette expression, comme M. El Skaf le fait p. 123 où il dit : « le bébé trop propre du débat d'aujourd'hui sur la plus belle expérience de pensée dans l'histoire de la science devrait certainement être rejeté, et l'eau du bain soigneusement analysé ».

Je voudrais vous poser trois questions :

1. Dans plusieurs passages (cf. p. 19, 29, 242/3, 254) vous présentez les ep comme des objets psychologiques, c'est-à-dire des représentations d'un scientifique qui les conçoit. Mais il me semble que l'analyse que vous faites tout au long de la thèse des ep conduit plutôt à une conception selon laquelle les ep sont jusqu'à un certain point indépendantes de concepteur et de ses intentions. Etant donné que vous donnez plusieurs exemples d'ep qui sont reprises et parfois modifiées de différentes manières par des scientifiques différents de leur concepteur original, on pourrait s'attendre à ce que vous conceviez l'identité d'une ep comme quelque chose qui est indépendante des intentions des personnes qui l'utilisent, que ce soit leur concepteur ou d'autres personnes. L'idée que les scénarios des ep et donc les ep « évoluent » (p. 180) me semble présupposer que l'ep existe indépendamment de sa représentation, au sens psychologique, par son concepteur à un moment donné. Il me semble particulièrement clair que les ep sont jusqu'à un certain point indépendantes des représentations de leurs

concepteurs, pour des ep qui, comme la boîte à photons, sont utilisées par différents scientifiques pour des buts différents, et même opposés. Einstein conçoit cette ep pour argumenter pour l'incomplétude de la mécanique quantique, mais Bohr utilise la même ep pour soutenir la conclusion opposée.

De toute manière il me semble plausible qu'une ep puisse avoir des fonctions qui échappent à leur concepteur. Une ep conçue pour réfuter une théorie peut très bien avoir une fonction exploratoire, même si cette fonction n'est découverte que par d'autres que son concepteur lui-même. Cela pourrait être le cas de l'ep de la tour de Pise qui est d'abord construite pour réfuter la théorie aristotélicienne de la chute, mais qui est ensuite utilisée pour explorer de nouvelles hypothèses sur les lois de la chute.

De manière similaire, en ce qui concerne l'ep du boulet de canon de Newton : vous dites que le but visé par Newton était d'abord « d'exposer sa théorie » (p. 74) mais que cela n'exclut pas la fonction objective de réfutation de la doctrine aristotélicienne de la différence de nature entre le sublunaire et le supralunaire. Il y a donc des fonctions objectives qui ne sont pas explicitement représentées dans l'esprit du concepteur d'une ep.

De manière générale, il y a peut-être une certaine hésitation entre deux manières de concevoir les ep : d'une part vous présentez les ep comme des objets intentionnels, constituées de scénarios abstraits qui contiennent des représentations d'objets particuliers et des arguments développés à l'aide de théories au sujet de ces scénarios ; mais d'un autre côté, les ep sont parfois présentées comme des objets psychologiques ; p. ex. lorsque vous dites que « suite aux processus mentaux déployés par le scientifique, on obtient alors un résultat (RS) ».

2. La deuxième question concerne le lien entre deux thèses originales défendues dans ce travail, à savoir celle de l'impossibilité d'éliminer les particuliers qui figurent dans le scénario d'une ep et celle de la légitimité d'ep qui reposent sur un scénario dont la possibilité nomologique est indéterminée. Est-ce que les particuliers ne sont pas éliminables parce qu'ils ne sont pas parfaitement déterminés, en d'autres termes, parce que leur description est incomplète ? Et est-ce que le fait que la possibilité nomologique d'un scénario reste indéterminée s'explique par la même raison, à savoir le fait que la description du scénario est incomplète ? Selon cette interprétation, on ne sait par exemple pas si le démon de Maxwell est possible tant qu'on n'a pas de description détaillée de sa manière d'opérer pour faire le tri des molécules en fonction de leur vitesse.

La question qui se pose alors est : comment est-ce possible que cette indétermination n'ait pas d'impact sur la légitimité de la conclusion de l'ep ? Est-ce qu'il ne faut pas exiger pour que l'ep soit légitime que, au contraire, le particulier incomplètement décrit en question, en l'occurrence le démon de Maxwell, soit en réalité éliminable ?

Si le raisonnement que je viens d'exposer est correct, l'indétermination de la possibilité nomologique du scénario d'une ep ne remet pas en cause la pertinence de sa conclusion parce que le particulier en question ne joue pas vraiment un rôle essentiel dans le raisonnement de l'ep, autrement dit parce qu'il est éliminable. Cela semble donc suggérer qu'il existe une tension entre les deux thèses soutenues dans la thèse : a) qu'il est impossible d'éliminer les particuliers des scénarios des ep, et b) qu'il existe des ep légitimes qui ont un scénario dont la possibilité nomologique est indéterminée.

3. Dans une partie très originale de la thèse, M. El Skaf étudie des cas historiques d'ep qui ont fait l'objet de modifications et qui existent donc en plusieurs versions. Selon l'une des idées particulièrement intéressantes que M. El Skaf propose dans son analyse de ces transformations, certaines ep sont modifiées en faisant passer un élément du scénario de l'ep du second plan au premier plan (p. 182). Est-ce que le fait de passer un particulier (p. ex. la boîte à photons et sa pesée) du second au premier plan correspond à sa description plus complète ? Est-ce que cela permet parfois, ou toujours, de lever l'indétermination de la possibilité du scénario, en ce sens qu'il est déterminé si le scénario est possible ou non dès lors que le particulier en question est passé au 1^{er} plan ? Est-ce que cela rend parfois ou toujours le particulier éliminable, au sens où sa description plus complète permet de remplacer la référence au particulier par une condition initiale décrite dans le vocabulaire de la théorie ? Ce raisonnement suggère qu'une ep devient pleinement légitime lorsque les particuliers qui figurent dans son scénario ont été éliminés, ce qui permet également de déterminer si le scénario est nomologiquement possible.

M. Kistler se déclare parfaitement satisfait des réponses apportées à ses questions par M. El Skaf. Il conclut en félicitant M. El Skaf de ce travail riche et original. Les questions soulevées par son travail témoignent de la fécondité de ses analyses. La qualité de la thèse et le talent philosophique et aussi pédagogique dont M. El Skaf fait preuve dans ce travail font espérer qu'il trouve rapidement un poste d'enseignant-chercheur ou de chercheur qui lui permettrait de poursuivre ses travaux dans de bonnes conditions. M. Kistler considère par ailleurs qu'il serait hautement souhaitable que cette thèse soit rapidement publiée.

John Norton, de l'Université de Pittsburgh, s'est exprimé ensuite.

Rawad El Skaf's dissertation project is a bold one. The philosophical literature on thought experiments has experienced major growth over the last few decades. (Here I limit myself to the literature in philosophy of science. It is the one I know best and the one pertinent to El Skaf's project.) My overall sense is that the literature is maturing and that just about everything that can be said has been said. Hence El Skaf chose to enter a mature literature where it is extremely hard to add any significant novelty. The challenge is formidable and the chances of success not great.

I was very pleased to discover that El Skaf has managed to meet the challenge. His dissertation contains new insights of importance on the philosophy of thought experiments. The other jury members have indicated many of these. Here I would like to indicate one I find especially important.

El Skaf has drawn attention to the importance of the notion of possibility. It is the key conception that must be tracked if one is to understand how thought experiments work. In a sense we all knew this. The question of possibility was always to be asked. However it is El

Skaf who has drawn our attention to it specifically. We have to know its precise nature in thought experiments, he has urged. Most importantly, he has identified a common mechanism involving possibility through which thought experiments can evolve.

In this mechanism, in the thought experiment of the first iteration, certain processes are presumed possible, but their possibility is not emphasized. Rather, it is tacitly incorporated into the thought experiment. In El Skaf's scenario language, it lives in the background, where we may not even notice it. Then someone notices it and realizes that it is an important presumption of the thought experiment and that it may be wrong. The thought experiment evolves to a new iteration in which the initial possibility is replaced by another. The result can be a complete reversal of what the original thought experiment had concluded.

El Skaf provides several important examples. They include the Maxwell demon thought experiment, in its evolution from Maxwell's original version into the naturalized version of Smoluchowski and Feynman; and Einstein's "clock in a box" thought experiment challenge to Niels Bohr and Bohr's revised version that meets Einstein's challenge.

During the jury, I pressed El Skaf on two questions.

First, I asked about his solution to what he calls "Kuhn's problem." That is, given that thought experiments are armchair imaginings, how is it possible for them to inform us about the world? El Skaf's account of thought experiments is that they are consistency checkers and inconsistency removers. He is right that removing an inconsistency cannot leave us worse off. My question is how we can know that we are better off for it.

I suggested to him a thought experiment on unicorns that reveals an inconsistency in claims about unicorns. We may remove the inconsistency. However rendering statements about unicorns consistent has brought us no knowledge of the world. Unicorns are fictions.

El Skaf answered that, in his view, thought experiments do more than restore consistency to some set of proposition. They do so by drawing on background facts that can include a considerable body of scientific knowledge. Empirical knowledge of the world enters through those background facts. Bringing our understanding closer to that background does reveal facts about the world to us.

I thought this was a strong answer.

My second question concerned El Skaf's claim that thought experiments are consistency checkers that reveal inconsistencies and suggest repairs. I was initially quite sure that this is true only for some thought experiments, albeit important ones. So I started to collect examples that I believed would not fit this model.

Already then I ran into trouble. My first example was the Einstein elevator thought experiment. When I checked what El Skaf had written about it, I saw that, in his hands, it does fit his model. While I normally think of the experiment as a useful heuristic for Einstein constructing a new gravitation theory, El Skaf points out that its first step is to identify an inconsistency between the idea that uniform motion and acceleration are distinct. Einstein finds no difference in experience between uniform acceleration without gravity and uniform motion with a homogeneous gravitational field. This challenges their distinctness.

In the course of my questioning of El Skaf, I posed more examples that I thought would be problematic: Newton's cannonball and Laplace's calculator. As the discussion continued, it became clear that both of these could be reformulated as revealing and removing an inconsistency. In the case of Newton's cannonball, it is an inconsistency between the idea that celestial and terrestrial physics are distinct and the celestial-like orbital motion of the cannonball. In the case of Laplace's calculator, it is an inconsistency between the expectation of indeterminism in the world and the perfect predictive powers of the calculator.

By the end of the discussion, I had become confident that this reformulation would always be possible. I suggested that it might be as simple as this: with sufficient ingenuity, we can turn any argument into a *reductio*, that is, one that reveals an inconsistency between some suitably formulated hypothesis and other premises. This, I suggested, might be what is happening with each of these thought experiments. It is a transformation that is assured to succeed. That assurance, I should add, is good. It means that we can be confident that El Skaf's approach can be fitted to any thought experiment.

Once again, I felt that El Skaf provided a strong response.

John D. Norton

Sébastien GANDON intervient ensuite.

La thèse de R. El Skaf s'intitule « La structure des expériences de pensée scientifiques ». Elle est composée de 258 pages, bibliographie et annexes comprises, et se subdivise en trois parties.

La première partie se propose d'introduire le sujet par une revue et une classification de sept expériences de pensée (par la suite désignées par « ep ») en physique : la tour de Pise de Galilée, la boîte à Photon d'Einstein et Bohr, le chat de Schrödinger, le démon de Maxwell, le boulet de canon de Newton, les jumeaux de Langevin, l'ascenseur d'Einstein. L'auteur cherche à élaborer une classification fonctionnelle théoriquement neutre des différents types d'ep, en distinguant les ep réfutatoires des ep exploratoires ; il subdivise cette dernière catégorie en séparant les explorations véritables des présentations didactiques. Le matériel présenté là sera repris, réélaboré, affiné tout au long de la thèse.

La seconde partie est entièrement consacrée à l'ep de la tour de Pise. L'étude est justifiée par le rôle que l'ep joue dans le débat philosophique sur la nature et la fonction des ep, notamment dans la discussion entre Norton et Brown. C'est donc aussi dans cette seconde partie que le candidat expose le débat épistémologique sur les ep, qui prend sa source chez Kuhn : comment une expérience de pensée, une expérience qui ne s'effectue pas « réellement », sur des objets naturels, peut-elle nous apprendre quelque chose sur la réalité et sur ses lois ?

Norton adopte une approche que le candidat qualifie d'indirecte, au sens où les ep sont réduites à des arguments logiques, déductifs ou inductifs. La position de Brown est directe, au sens où il considère les ep comme des instruments épistémiques irréductibles : les ep constitueraient une voie d'accès spécifique et indépendante aux lois de la nature. R. El Skaf partage avec Brown l'idée que les ep sont irréductibles, mais il refuse son platonisme. Il paraît donc au final plus proche des positions de Norton. Dans le second chapitre de la partie II, le candidat analyse le rôle que l'ep de la tour de Pise a joué dans le développement de la pensée de Galilée. Ce détour historique permet de réfuter l'analyse de Brown, pour qui la loi de la chute des corps est établie chez Galilée par une ep. R. El Skaf distingue poids absolu et poids spécifique et montre que dans les textes de jeunesse, Galilée n'utilise pas l'ep de la tour de Pise pour établir l'indépendance de la vitesse de chute par rapport au poids absolu. Il permet aussi de montrer que les particuliers (ici les différences matérielles entre les corps) participent de la dynamique conceptuelle de l'ep, et d'établir, contre Norton que les particuliers ne sont pas éliminables.

La troisième partie vise à élaborer une théorie directe des ep, qui soit plus raisonnable et plus réaliste que celle de Brown. Le candidat met en avant deux idées : en premier lieu, les ep ne sont pas des arguments logiques déguisés, car les références à des particuliers ne sont pas éliminables ; en second lieu, le scénario d'une ep n'est pas toujours considéré comme nomologiquement possible, il peut être explicitement présenté aussi comme étant nomologiquement indéterminé. C'est notamment le cas dans l'ep du démon de Maxwell. Le chapitre 6 est consacré à l'analyse des ep dont les scénarios sont nomologiquement indéterminés.

Dans le dernier chapitre, R. El Skaf dégage une caractérisation générale des ep, en distinguant cinq composants : la question cible, le scénario, le déroulement du scénario, le résultat du scénario et la conclusion de l'expérience de pensée. Cette caractérisation récapitule les analyses précédentes, elle fait notamment une place à l'impossibilité de réduire les particuliers, à l'indétermination nomologique des scénarios, ainsi qu'au contexte historique. Le candidat conclut son travail par un examen des problèmes posés par les conditions d'identité d'une ep, et montre comment sa caractérisation générale permet d'y répondre.

L'objet de la thèse est nettement circonscrit, le corpus et la littérature critique également. On peut, on le verra, regretter la limitation liminaire des ep aux ep en physique. Mais cette restriction a le mérite de déterminer nettement le sujet.

Le manuscrit est extrêmement clair. Les exemples, parfois techniques, sont présentés avec précision et pédagogie. L'auteur sait expliquer rapidement les points essentiels ; il sait ne pas entrer dans les détails quand cela n'apporte rien à son analyse. L'organisation à l'intérieur de chaque chapitre est annoncée, puis rappelée (plusieurs fois) au cours du développement, et ce qui est annoncé correspond à ce qui est réalisé. C'est une exigence minimale mais c'est une exigence qui n'est pas satisfaite dans beaucoup de thèses. R. El Skaf donne véritablement au lecteur tous les moyens pour suivre et comprendre sa démarche, et son travail doit être loué pour cela.

Si la thèse est exemplaire au niveau médian de l'organisation des chapitres et de l'analyse des ep, la présentation au niveau « microscopique » de l'expression, comme au niveau « macroscopique » de l'organisation globale, n'atteint pas le même niveau d'excellence.

Je n'ai eu aucun mal à comprendre le français, mais il reste des coquilles ou maladroites, notamment dans certains chapitres (comme l'introduction : « elle s'appuiera sur la proposition une structure générale et identifiante » (14), « Nous critiquerons également une approche qu'on peut qualifier de directe, mais qui attribue aux ep d'autres fonctions que nous, comme celle de révéler... » (18)). La syntaxe est parfois étrange – j'aurai préféré deux trois phrases, là où on n'en trouve qu'une, trop longue. Mais ce n'est qu'un point de détail.

L'organisation globale du manuscrit pose à mon sens un problème plus sérieux. La seconde partie est cohérente : le candidat expose le débat entre Brown et Norton, réfute Brown et suggère que, contrairement à ce qu'affirme Norton, les particuliers ne sont pas éliminables. On s'attendrait à ce que la partie III développe la critique de Norton. Mais le chapitre 6 ouvre un nouveau chantier : les scénarios sont-ils toujours nomologiquement possibles ? Je ne sais pas quel est exactement le rapport entre la partie II (le débat Norton-Brown, le statut des particuliers) et le premier chapitre de la partie III (l'indétermination nomologique). Le chapitre 7 aurait pu reprendre et articuler les deux problèmes, mais ce n'est pas le cas. C'est encore un nouveau problème -- caractériser de façon générale des ep et déterminer leurs conditions d'identité -- qui est abordé. R. El Skaf ne referme pas toujours les dossiers qu'il ouvre. Les introductions aux chapitres sont pertinentes, informatives et claires ; mais les introductions aux parties, notamment l'introduction à la partie III (177-180), sont plus faibles. Je reviendrai sur l'articulation entre la partie II (la question du caractère éliminable des particuliers) et la partie III (la question du statut des modalités dans les ep) bientôt.

Venons en contenu. J'ai beaucoup appris en lisant ce travail. R. El Skaf expose clairement quels sont les problèmes auxquels il se confronte, quelles sont les principales alternatives discutées dans la littérature, et quelle position il adopte. J'ai beaucoup apprécié la façon dont il analyse les ep, en étant sensible aux détails historiques, mais en ne perdant jamais de vue le problème philosophique. Je trouve convaincante la façon dont il utilise l'histoire pour réfuter (ou en tout cas affaiblir) la thèse de Brown. On reproche aux philosophes des sciences leur désintérêt pour l'histoire des sciences et la dynamique concrète de l'évolution scientifique. Mais il faut adresser un reproche symétrique aux historiens des sciences, qui bien souvent délaissent les questions épistémologiques substantielles. R. El Skaf a su construire, dans sa partie II, un cadre dans lequel une confrontation féconde entre histoire et épistémologie sur la nature des ep peut être menée.

Les développements sur le démon de Maxwell m'ont particulièrement intéressé -- notamment les analyses en 6.3 (188-197) sur la conclusion que tire Maxwell de son ep et sur la postérité qu'a eu cette ep. Il aurait peut-être fallu, d'ailleurs développer la discussion de ce cas un peu plus -- notamment analyser de façon plus détaillée la nature de l'individu fictif (le démon dans l'exemple) qui apparaît dans cet ep.

Le travail me semble être traversé par deux intuitions critiques majeures. En premier lieu, les particuliers jouent dans les ep un rôle crucial – ils sont, contrairement à ce qu'avance Norton, inéliminables. En second lieu, il ne faut pas, comme on le fait souvent (Kuhn, Sorensen, Laymon, Buzzoni, Nersessian), poser que les ep ont un scénario nomologiquement possible. Il y a des ep dont les scénarios sont nomologiquement indéterminés. Ces deux remarques me semblent vraies, elles me semblent importantes, elles me semblent fécondes. En développant et en défendant ces deux thèses, R. et Skaf contribue de façon réelle et

substantielle à la discussion philosophique sur la nature des ep. Et je souhaite que ces idées soient diffusées, le plus rapidement possible, sous forme d'articles qu'il conviendrait de publier dans les meilleurs journaux.

Ceci étant dit, je pense que le candidat aurait pu aller plus loin dans l'analyse. Les deux remarques, essentiellement négatives et critiques, sont d'excellents points de départ, mais on aurait aimé que la discussion aboutisse à des conclusions plus positives et déterminées. J'ai deux regrets, qui sont en réalité moins des critiques que des invitations à développer davantage les pistes empruntées dans la thèse.

1. Le premier regret tient à la structure interne du travail : R. El Skaf n'analyse que très rarement le rapport entre ces deux principales idées. Je ne sais pas, à la fin de la lecture, s'il y a un rapport ou non entre le caractère inéliminable des particuliers et le caractère nomologiquement indéterminé des scénarios. Ou plutôt : il y a bien un rapport puisqu'un scénario nomologiquement indéterminé est un scénario dans lequel intervient un particulier fictif (187). Mais cette définition des ep indéterminées me plonge encore plus dans l'obscurité : qu'est-ce qu'un particulier fictif ? L'ascenseur d'Einstein, la montagne de Newton, les environnements vides de Galilée ne sont-ils pas aussi fictifs ? Et indépendamment de cette question, un autre problème se pose : on ne voit pas bien, dans le cas des ep nomologiquement déterminée cette fois, quel rôle crucial (puisque'ils sont inéliminables ici aussi) jouent les particuliers. L'auteur ne discute pas ce point. Dans le chapitre 5, il explique le rôle des poids spécifiques dans l'évolution de la pensée de Galilée, mais il ne dit pas en quoi ce serait le statut de particulier des poids spécifiques (plutôt que des traits liés au contexte) qui leur donne tant d'importance.

De façon plus générale, la façon dont R. El Skaf utilise la notion de particulier n'est pas assez précise. Une ep n'est pas un bout de réalité. C'est un discours dans lequel on fait référence à des propriétés et à des particuliers. Quand le candidat parle de particulier, il parle en fait de référence à des particuliers. Et on ne peut pas dès lors éviter le questionnement sur le type de référence aux particuliers. Quand E. El Skaf parle de particulier, quel type de référence à des particuliers a-t-il en tête ? Des références *de re* – le particulier est directement visé sans l'intermédiaire de concept ou de propriété –, ou bien des références *de dicto* – le particulier est visé par l'intermédiaire d'une ou d'un réseau de propriétés ? L'usage de cette distinction, standard en philosophie du langage depuis Kripke, Burge, etc., aurait aidé à mieux articuler le problème. D'après ce que je comprends, la référence aux poids spécifiques chez Galilée serait une référence *de re* (il y aurait un appel à des espèces naturelles) ; mais la référence au démon chez Maxwell, et à tous les particuliers fictionnels, serait *de dicto* – le démon est décrit par ses propriétés. Quoiqu'il en soit, une attention plus grande sur les divers types de référence aux particuliers aurait sans doute clarifié la discussion sur le caractère inéliminable des particuliers.

2. Le second regret ne concerne pas la cohérence interne du propos, mais une absence : le candidat ne fait à aucun moment le lien entre son analyse et l'usage et la réflexion sur les ep en philosophie du langage. Comme on le sait, dans les années soixante-dix, de nombreux philosophes (Kripke, Putnam, Burge) ont élaboré des ep (dont le but était d'ailleurs de

clarifier la nature de la référence à des particuliers), et ont dans le même temps réfléchi aux compétences sémantiques qu'il fallait postuler pour comprendre en général le fonctionnement d'une ep. Or, pour tous ces philosophes, la réflexion sur les ep combine deux intuitions, l'une ayant trait à la nature de la référence à des particuliers, l'autre à la nature des modalités. Ouvrez *Naming and Necessity* – Kripke ne cesse de dire que le problème de la référence aux particuliers engage et est engagé par le problème de la nature de la nécessité et de la contingence. Dit autrement, pour un ensemble de philosophes du langage dans les années soixante-dix, la question de la référence aux particuliers et la question de la nature des modalités sont différentes facettes du même problème. R. El Skaf, quant à lui, développe deux idées fortes sur les ep, dont la première porte sur le statut des particuliers, la seconde sur le statut des modalités – c'est-à-dire exactement les mêmes problèmes que, dans les années soixante-dix, les philosophes du langage associent à la question des ep type Terre Jumelle. Il me semble que les intuitions de l'auteur et celles des philosophes du langage sont suffisamment convergentes pour rendre une confrontation avec cette littérature naturelle et pertinente – ne serait-ce que pour écarter la comparaison. Ceci d'autant plus que l'articulation entre ces deux idées dans la thèse n'est pas convaincante. Comme je l'ai indiqué plus haut, le travail aurait de toute façon bénéficié de certaines distinctions faites en philosophie du langage (celle entre *de re* et *de dicto* notamment). Sans doute le candidat pourra-t-il, à l'avenir, prolonger ses analyses par une exploration des relations entre ep scientifiques et ep en philosophie du langage ?

Concernant le dernier chapitre, j'ai du mal à saisir où le candidat veut en venir, et en quoi consiste la nouveauté de sa caractérisation. Deux points m'ont particulièrement arrêté.

R. El Skaf affirme en premier lieu que le scénario d'une ep doit être cohérent : « Le scénario contient aussi les théories, lois et principes qui sont supposés être vrais en son sein. Ces derniers peuvent être implicites ou explicites, la seule contrainte étant que le tout soit cohérent; ainsi ne peut-on pas supposer comme vraies la loi de Galilée et celle d'Aristote dans le même scénario. » (208). Je saisis mal. Le scénario de la tour de Pise, et tous les scénarios d'ep réfutatoires, sont incohérents, puisqu'ils aboutissent à une contradiction. R. El Skaf doit donc parler de l'absence d'incohérence manifeste – mais qu'est-ce qu'une incohérence manifeste ? Dans une preuve par l'absurde chez Euclide, on trouve des figures impossibles. Elles sont impossibles, mais servent dans le raisonnement.

Concernant l'identité des ep, R. El Skaf affirme ceci : « une expérience de pensée doit être identifiée par sa structure ainsi que par sa fonction, qui apparaît dans sa conclusion, la CEP. » Cela veut dire qu'une ep A est la même qu'une ep B ssi elles ont la même CEP et la même structure ? Mais à quel (quels ?) composant(s) de la caractérisation générale correspond la notion de fonction et de structure ? La fonction est-elle identique à la CEP ? Mais la fonction d'une ep est de répondre à une question cible – donc pourquoi ne pas identifier fonction et question cible ? Et la structure d'une ep est-elle son scénario ? Selon R. El Skaf, y a-t-il finalement une ep de la tour de Pise, ou plusieurs ? Les scénarios sont presque identiques, mais les CEP ainsi que les questions cibles changent à chaque fois. Il y aurait donc, me semble-t-il, plusieurs ep différentes de la tour de Pise. Mais au chapitre 4, le présupposé est qu'il y a différentes présentations successives d'une même ep. Comment concilier ce qui est dit là et ce qui est avancé au chapitre 7 ?

R. El Skaf répond de façon précise à mes questions, en se concentrant sur celles relatives au dernier chapitre de sa thèse. Il a clarifié certains points que je n'avais pas saisis à la lecture – par exemple qu'il y a bel et bien une et une seule ep de la tour de Pise, et que cela ne contredit pas du tout les critères d'identité énoncés au chapitre 7. Il a aussi admis ne pas bien connaître la littérature en philosophie du langage – préférant se concentrer sur la science, l'histoire des sciences et la philosophie des sciences, ce qui est un choix tout à fait judicieux.

Pour finir, je voudrai dire que les réserves que je viens de formuler, qui restent localisées, ne remettent pas en question mon évaluation, très favorable, de ce travail, qui réussit à articuler de façon claire et argumentée, une véritable thèse. On aurait certes pu souhaiter que R. El Skaf pousse encore plus loin son analyse ; mais celle-ci n'en demeure pas moins, en l'état, est une contribution réelle et pertinente à une discussion importante en philosophie des sciences. J'ai été jusqu'à présent rapporteur de huit thèses de doctorat et le présent opus fait partie des deux meilleurs qu'il m'ait été donné de lire.

Denis FOREST intervient en dernier.

A l'évidence, la thèse de Rawad-El Skaf est une thèse d'une grande qualité. Elle se caractérise d'abord par un très grand détail dans l'analyse de plusieurs expériences de pensée canoniques en physique et par la volonté de rendre les expériences de pensée scientifiques *aux scientifiques*, indépendamment de ce que les philosophes ont pu en penser.

Les thèses sont exposées avec beaucoup de clarté avant d'être critiquées : ainsi, dans le chapitre 4, l'analyse de Brown, de ses convictions d'arrière-plan et sa conception des expériences de pensée ; puis, dans le chapitre 5, la manière dont est réintroduite l'histoire des sciences contre Brown, sont des moments particulièrement éclairants et convaincants.

Ensuite, cette thèse sera très utile, y compris pour des philosophes qui ne sont pas des philosophes de la physique. En particulier l'analyse de la possibilité, la critique de la thèse de la possibilité nomologique (au chapitre 6) et au chapitre 7 la distinction entre possibilité nomologique du scénario et possibilité nomologique du résultat du Scénario, peuvent s'avérer féconde en philosophie de l'esprit. Ainsi l'affirmation de Derek Parfit au § 89 de *Reasons and Persons* selon laquelle « il peut être utile de considérer des expériences de pensée impossibles » est éclairée par les distinctions proposées par Rawad El-Skaf. En effet la possibilité du scénario envisagée par Parfit (la greffe séparée des hémisphères cérébraux) est indéterminée, mais les résultats actuels de la commissurotomie montrent en revanche qu'on peut avoir deux courants de pensée séparés : la possibilité nomologique du résultat du scénario justifie le recours à l'expérience de pensée – en l'occurrence, celle des triplés qui nous amène à construire une nouvelle conception des personnes et de la continuité de leur existence.

Au chapitre des regrets, la thèse pouvait par endroit aider davantage le lecteur. Le chapitre introductif ne comporte pas de revue générale de la littérature philosophique sur le sujet. Les précisions tardent parfois à venir : par exemple : p. 98 « on peut diviser ces autres approches en deux grandes catégories : approches expérimentales et approches du type modèle mental, qu'on abordera, d'une façon critique, dans le chapitre 6 ». Les noms liés à ces approches sont donnés nettement plus loin (p. 182). P. 100 : « Gendler (1998) par exemple critique l'approche de Norton ainsi que celle de Brown en analysant la tour de Pise à son tour. Ce faisant, elle propose une approche alternative, le constructivisme ». Mais le constructivisme de Gendler n'est pas expliqué, et ses positions auraient mérité d'être davantage débattues – comme lorsqu'elle explique que l'expérience de pensée de la Tour de Pise invite l'aristotélicien à un « acte d'introspection » par lequel il va reconnaître qu'il a des croyances tacites qui sont inarticulées et non plausibles.

Denis Forest en vient à deux questions. La première porte sur la formule p. 207 : « Nous proposerons une structure générale permettant de comprendre comment fonctionnent les expériences de pensée. Cette structure est une caractéristique nécessaire mais pas suffisante des EP [...] ». Est-ce à dire qu'aucune caractéristique nécessaire et suffisante ne peut être trouvée, ou que l'analyse proposée est appelée à être complétée ultérieurement ? La question rejoint celle de la spécificité des expériences de pensée parmi les outils dont dispose le scientifique. On peut regretter que la question, abordée plusieurs fois, ne reçoive pas de réponse synthétique dans la conclusion.

La réponse de Rawad El-Skaf complète celle déjà contenue dans son exposé introductif. La structure commune des expériences de pensée scientifiques ne leur est pas complètement spécifique. Seules les expériences de pensée qui se rapportent à un scénario dont la possibilité est indéterminée se distinguent des autres outils de la science d'une manière telle qu'on puisse parler à leur sujet de conditions nécessaires et suffisantes.

La seconde question est suscitée par le fait que la thèse s'intitule « la structure des expériences de pensée scientifiques » et qu'on y trouve exclusivement un traitement des expériences de pensée en physique. Pourquoi la seule physique, alors que par exemple James Lennox a consacré un article aux « Expériences de pensée darwiniennes » ? Il pourrait y avoir deux explications à ce choix. La première est que la question centrale de la thèse était celle de la structure générale des expériences de pensée en science, et non la question de savoir quelles sciences ont recours aux expériences de pensée. Mais il reste alors à se demander

pourquoi les expériences de pensée les plus connues et les plus emblématiques sont toutes des expériences de pensée en physique. La seconde explication serait que la thèse se restreint à la physique parce qu'il y a lieu de distinguer entre les « simples » explorations de scénarios imaginaires comme on peut en trouver en biologie (cf. chapitre IV de *l'Origine des espèces*) et les authentiques expériences de pensée ; la restriction à la physique serait alors l'indice d'une différence de nature entre des types de science. Mais la possibilité nomologique est définie dans la thèse de manière large – p. 183 : la « possibilité nomologique d'un scénario s'évalue selon certaines théories, lois et principes, dont la vérité est supposée dans le scénario ». En ce cas, s'il y a une théorie de l'évolution, il doit y avoir aussi des scénarios évolutifs qui sont évaluables en termes de « possibilité nomologique » et qui donnent lieu à de véritables expériences de pensée. Cette interrogation bien entendu, porte sur le sens qu'il faut donner aux choix opérés dans la thèse, et non sur la légitimité de ceux-ci.

La réponse de Rawad El-Skaf à cette question a été, là encore, parfaitement claire. Se disant intéressé par les analyses de Lennox, il ne donne pas à la restriction à la physique du champ d'investigation dans la thèse le sens de la revendication d'une spécificité de la physique par rapport à d'autres disciplines.

Après avoir délibéré et procédé à un vote à Bulletin secret, le jury décerne à M. Rawad El-Skaf le titre de Docteur de l'Université Paris 1, et attribue à la thèse la Mention très Honorable avec les Félicitations.

peuple K.A

J. Mosconi

Jean

Stout