

Université de Montréal

**Images du temps dans les manuels scolaires :
recherche-création pour comprendre les rapports entre
représentations et savoirs en physique**

par

Marie-Maude Roy

Département de communication et département de physique
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Maîtrise individualisée ès sciences (M. Sc) de
recherche-création en communication et physique

11 septembre 2020

Université de Montréal

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé

**Images du temps dans les manuels scolaires : recherche-crédation pour
comprendre les rapports entre représentations et savoirs en physique**

présenté par

Marie-Maude Roy

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Mme Lorna Heaton, Ph.D.

(présidente-rapporteuse)

Mme Aleksandra Kaminska, Ph.D.

(codirectrice de recherche)

M. Normand Mousseau, Ph.D.

(codirecteur de recherche)

Ghislain Thibault, Ph.D.

(membre du jury)

M. Luc Stafford, Ph.D.

(membre du jury)

Résumé

Les milieux de production et de diffusion des savoirs sont marqués par une omniprésence des modalités visuelles de représentation, et la physique n’y fait pas exception. Ce mémoire de recherche-crédation en physique et communication explore la place et le fonctionnement de l’image, et de la relation texte-image, dans des dispositifs de médiation des connaissances appartenant à cette discipline scientifique. Après un retour historique sur la notion de temps en physique, je poursuis en dirigeant l’attention vers les images du temps objectif tout particulièrement. Le temps objectif, par la pluralité de ses compréhensions et représentations en physique, mais aussi par sa relation particulière aux images que l’on assume atemporelles, s’arrime bien aux motifs de ce travail. Huit manuels de physique standards sont analysés pour comprendre et catégoriser les types et les fonctions des images. Pour ce faire, j’effectue d’abord une analyse sémiotique des images. Avec les résultats, je développe une classification de six catégories d’images, ce qui me permet d’ordonner et de mettre en valeur leur richesse sémiotique. J’analyse ensuite les textes (titres et passages textuels référant aux images) par deux méthodes : 1) une analyse quantifiée avec l’écriture d’un programme Python qui automatise la recherche de mots clés et 2) une lecture proche de ces textes pour en soutirer la façon dont les auteurs qualifient leurs images. J’incorpore une dimension créative supplémentaire à ma démarche en réalisant deux visualisations des concepts et thèmes émergents de l’analyse. Je propose ainsi une interprétation des résultats par une carte des images du temps objectif et une image qui aborde l’ambiguïté du discours des auteurs, la subordination du langage textuel ainsi que la négociation du statut de l’image entre modalité de représentation dévaluée et dispositif de présentation objectif. Tout au long de ce travail, j’intègre les questionnements de ma recherche dans ma propre démarche, en produisant de nombreuses figures pour analyser et interpréter les concepts, ce qui me permet d’expérimenter moi-même avec le visuel en tant que modalité de production de savoirs. À travers la poursuite d’une meilleure compréhension du fonctionnement épistémologique des images en physique, je propose des pistes méthodologiques pour travailler au croisement d’une science naturelle, de la communication et la culture visuelle.

Mots clés : Images scientifiques, Temps objectif, Représentation, Recherche-Création, Communication scientifique, Communication visuelle, Sémiotique visuelle, Manuels de physique.

Abstract

Knowledge production and dissemination environments are marked by the omnipresence of visual modes of representation, and physics is no exception. This research-creation project in physics and communication explores the place and functioning of the image, and of the text-image relationship, in knowledge mediation devices belonging to this scientific discipline. After a historical overview on the concept of time in physics, I continue by directing attention to the images of *objective time* in particular. Objective time, by the plurality of its understandings and representations in physics, but also by its particular relationship to images that we assume to be timeless, fits well with the reasons for this work. Eight standard physics textbooks are analyzed to understand and categorize the types and functions of images. To do this, I first perform a semiotic analysis of the images. With the results, I develop a classification of six categories of images, which allows me to order and highlight their semiotic richness. I then analyze the texts (titles and text segments referring to the images) by two methods: 1) a quantified analysis with the writing of a Python program which automates the research of keywords and 2) a close reading of these texts to extract the way in which the authors qualify their images. I incorporate an additional creative dimension to my approach by making two visualizations of the concepts and emerging themes of the analysis. I thus propose an interpretation of the results by a map of objective time images and an image that addresses the ambiguity of the authors' discourse, the subordination of textual language as well as the negotiation of the status of the image between devalued representation mode and device objective presentation. Throughout this work, I integrate the questions of my research into my own approach, producing numerous figures to analyze and interpret the concepts, which allows me to experiment with the visual as a modality of knowledge production. Through the pursuit of a better understanding of the epistemological functioning of images in physics, I propose methodological tracks to work at the intersection of natural science, communication and visual culture.

Keywords : Scientific images, Objective time, Representation, Research-Creation, Scientific communication, Visual communication, Visual semiotics, Physics textbooks.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	5
Liste des tableaux	8
Table des figures	9
Liste des sigles et des abréviations	11
Remarques préliminaires	12
Remerciements	13
Introduction	1
Chapitre 1. REVUE DE LITTÉRATURE ET CADRE CONCEPTUEL ..	4
1.1. Les visages du temps : une histoire du concept de temps en physique	4
1.2. La représentation des savoirs : culture visuelle et images scientifiques	10
1.3. La sémiotique de Peirce : une structure pour l'analyse d'images	15
Chapitre 2. PROBLÉMATIQUE	21
Chapitre 3. MÉTHODOLOGIE	24
3.1. Définition du corpus pour l'analyse	25
3.2. Analyse du corpus	25
3.3. Visualisation	28
3.4. Prolongement possible : exposition	29
Chapitre 4. ANALYSE ET RÉSULTATS	31
4.1. Les types d'images	31
4.2. Les fonctions des images	42

Les identifiants de l'image et le vocabulaire du visuel	42
Les fonctions attribuées aux images	46
Rapports entre textes et images	46
Visualisation des données	48
Chapitre 5. DISCUSSION	51
Chapitre 6. LIMITES	53
6.1. Plasticité et iconicité pour approfondir l'analyse du corpus	53
6.2. Les limites du corpus	54
6.3. Pour confronter davantage les conclusions	57
6.4. Limite de la méthodologie	57
6.5. Des questions qui demeurent	58
Chapitre 7. CONCLUSION	60
Références	63
Annexe A	73
Annexe B	76
Annexe C	81

Liste des tableaux

1	Liste des manuels de physique sélectionnés	26
2	Les types d'images répertoriées selon leur relation au temps.....	33

Table des figures

1	<i>Good clock vs. bad clock</i> . Source : Figure 1.9 de Misner, Thorne et Wheeler (1973, p. 27).....	1
2	Des images qui représentent le temps : (a) la flèche, (b) l'Univers-bloc et (c) l'inflation cosmique.....	10
3	Diagramme représentant différentes approches comme autant de perspectives sur les images scientifiques (ma production). Cette pluralité dans la façon de s'intéresser aux images les amène à être comprises différemment. L'image est à la fois une métaphore visuelle de la notion de perspective disciplinaire et une carte de l'écosystème théorique des images scientifiques. L'image se trouve aussi dans l'Annexe A pour une meilleure lisibilité. Les citations sont dans leur langue originale.	14
4	Représentation schématique de la sémiologie selon Peirce (ma production).....	17
5	Capture d'écran d'un ordinateur présentant un logiciel de traduction en ligne pour traduire pour le terme « picturing » de l'anglais vers le français (ma production). ..	18
6	Petit lexique visuel des termes couramment associés à l'image (ma production). ..	20
7	<i>Ceci n'est pas le temps</i> [image numérique] (ma production). Cette image est un détournement de l'oeuvre très célèbre <i>La Trahison des images</i> (1929) de René Magritte.	21
8	Schéma du processus méthodologique (ma production).	24
9	Carte des images du temps objectif issues de manuels de physique (ma production). ..	39
10	Gros plan sur les sous-catégories d'images « trajectoire » et « évolution espace-temps ».	40
11	<i>Schéma de lignes d'univers remplissant l'espace-temps</i> . Cette même image apparaît dans deux manuels à l'étude : Misner (1973) et Taylor (1992).....	44

12	Deux images diagrammatiques tirées de Goldstein (2001) afin d'illustrer la subordination de l'image au code de l'écrit.	48
13	Visualisation de données issues de deux différentes étapes d'analyse de la partie textuelle du corpus (ma production).....	49
14	Une sélection d'images issues des manuels sélectionnés pour aborder leur richesse iconique.....	55
15	Capture d'écran en deux temps : traduction du terme « graphic » de l'anglais vers le français via un logiciel de traduction en ligne et recherche d'images pour les termes « graphic » et « graphique » via un moteur de recherche populaire (ma production). On peut constater que même si la traduction sous-entend que les deux termes ont la même signification, les images obtenues dans les deux cas ne suivent pas les mêmes tendances — celles de gauche semblent référer à la pratique du design graphique alors que celles de droite sont des diagrammes (à bandes pour la majorité).....	56
16	Deux représentations possibles pour l'Univers-bloc.....	57
17	<i>Formulation de la question de recherche ou comment tricoter son sujet de maîtrise [photographie traitée] (ma production). La photographie présente l'étalement de bouts de papier sur lesquels on peut lire des phrases interrogatives et les dates de leur rédaction. Un fil de laine les relie maladroitement — ce fil symbolise le cheminement non linéaire et ponctué d'embûches (les nœuds) du processus de construction de la question de recherche de ce mémoire. Alors qu'en physique, le projet de maîtrise se présente traditionnellement sous la forme d'une énigme statique donnée à l'étudiant qui doit la résoudre (Kuhn, 1996), la question à l'origine de projet, comme celle de biens des projets en sciences sociales et humaines, s'est présentée plutôt comme un objet dynamique, développé <i>au fil du temps</i>.....</i>	61

Liste des sigles et des abréviations

APA	<i>American Psychological Association</i>
EP	Espace pictural
HPS	<i>History and Philosophy of Science</i>
QFT	<i>Quantum Field Theory</i>
RG	Relativité générale
STS	<i>Science and Technology Studies</i>
RC	Recherche-création

Remarques préliminaires

J'adopte une formulation inclusive et épiciène dans ce mémoire, autant que mes connaissances à ce niveau me le permettent. N'étant pas grammairienne ni linguiste, il se peut que des manquements à cet égard subsistent. Diminuer un tant soit peu le sexisme linguistique (Lessard et Zaccour, 2017b) et donner de la visibilité aux femmes afin de mieux manifester leur présence (Lessard et Zaccour, 2017a) au sein de la littérature académique sont les intentions derrière ce choix. À tout le moins, on défiera l'écriture d'une langue française tributaire de son histoire marquée par une misogynie persistante (Viennot, 2014).

Afin que ce mémoire soit intelligible pour les personnes francophones, j'ai traduit les citations issues de travaux publiés en des langues différentes. Néanmoins, certains termes ou expressions n'ont pas été traduits et on retrouvera quelques passages en anglais. Les raisons qui sous-tendent ce choix conscient sont expliquées dans le texte.

Remerciements

J'aimerais tout d'abord exprimer ma plus grande reconnaissance envers ma directrice et mon directeur de recherche qui ont cru en mon projet et l'on rendu possible. Je remercie Aleksandra pour ses encouragements bienveillants, ses conseils et son enthousiasme tout au long de cette aventure académique. Je remercie Normand pour les riches discussions et son ouverture vis-à-vis des thèmes que j'ai choisi d'explorer.

Je ne remercierai jamais assez Mirjam Fines-Neuschild, dont j'étais la fière padawan. Ces quelques mots ne permettront pas de rendre justice à tes innombrables contributions, ni à la chance que j'ai eue de partager avec toi les hauts et les bas de la construction d'un projet à l'identité double.

Merci à mes collègues du Laboratoire Artefact, dont les projets de recherche originaux et ambitieux ainsi que l'accueil chaleureux m'auront convaincue de la richesse intellectuelle et sociale de la communauté au département de communication. Merci à nos voisin·e·s du corridor de matière condensée qui ont enduré les aléas du bureau des « Gurlz » pendant ces deux dernières années et demi.

Tout particulièrement, je remercie Lucie Maude Fournier, Félix Antoine Goudreault, Géraldine Piguet et Rémi Toupin qui m'ont faite profiter généreusement de leur expertise technique et/ou de leur regard critique. Votre aide précieuse et votre soutien moral ont contribué à ce mémoire autant qu'à ma motivation à poursuivre cette recherche.

J'aimerais aussi souligner le passage sur mon chemin de personnes qui m'ont inspirée par leurs idées, mais aussi par leur personnalité, et qui m'ont incitée ce faisant à poursuivre dans le milieu académique — je pense notamment à Molly Kao, Emma McKay et Ghislain Thibault.

Un merci tout spécial à Éric Dupuis pour les précieuses discussions dans les divans de La Planck, à Gabrielle Beaudin pour son rationalisme percutant, à mes sœurs — qui sont

simplement les meilleures sœurs, à ma mère pour tout, à mon père qui m'a transmis sa créativité sans limite ainsi qu'à Frédéric Tardif et Maxime Isabel pour leur fraternité. La fin de cette recherche s'arrime d'ailleurs avec celle d'une collocation légendaire : merci à mes ami·e·s du 208 et du 2701 d'avoir partagé le quotidien d'une nomade à temps partiel.

Introduction

§1.5. TIME

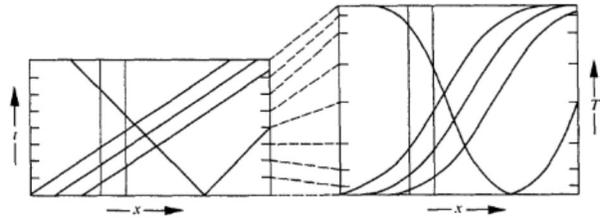


FIGURE 1. *Good clock vs. bad clock.* Source : Figure 1.9 de Misner, Thorne et Wheeler (1973, p. 27).

Le temps est un concept qui peut paraître si simple, familier et si étrange à la fois. Il semble que l'on ait pleine conscience de son *passage*, qui n'en demeure pas moins intangible. Bien qu'on emploie le terme « temps » à répétition, celui-ci ne dit rien de l'entité qu'il désigne. Mais qu'est-ce que le temps, finalement ? Comme le souligne une célèbre citation de Saint Augustin, c'est lorsqu'on commence à se questionner sur sa nature que l'on réalise son ignorance à son sujet (D'Hippone, 401). En d'autres mots, hors de notre conscience de l'évolution des événements qui nous donne une compréhension intuitive du temps, il est plutôt ardu de le définir. Le temps présente des problèmes plus complexes que les autres dimensions de l'Univers (les dimensions spatiales), d'une part par son unidirectionnalité (ou du moins l'impression qu'il nous en donne) et d'autre part par son intangibilité (Davies, 1974). Il suffit pour s'en convaincre de réaliser qu'on peut se déplacer dans toutes les directions à travers l'espace, mais pas dans le temps, c'est-à-dire qu'on ne peut pas retourner dans le passé. Qui plus est, nous ne contrôlons pas notre déplacement dans la dimension temporelle comme nous le faisons dans l'espace ; celui-ci va de l'avant sans que nous ne puissions rien y faire. Le temps est-il une propriété fondamentale de l'Univers ? Une propriété émergente ? Ou encore un pur produit de la perception humaine ?

Autant en arts qu'en sciences, on s'est interrogé sur le temps. Toute une gamme de disciplines académiques ont questionné et questionnent encore le temps, dans les différentes formes qu'il prend en se présentant à nous. La philosophie du temps, par exemple, est en soi une large branche de la philosophie au sein de laquelle sont investigués les problèmes ontologiques et épistémologiques du temps. On s'intéresse ainsi à sa nature et son statut de connaissance en abordant les problèmes conceptuels qui en émergent (Callender, 2011). En neurosciences et en psychologie, d'un autre côté, on s'intéresse plutôt à la *perception* du temps, ce que signifie sentir le temps qui passe, ce que le cerveau comprend et dit du temps ou encore pourquoi nous pouvons nous projeter mentalement dans l'avenir (Buonomano, 2017). Ces interrogations portent sur le temps *subjectif*. Une autre notion de temps prend racine dans notre expérience collective. Nous expérimentons le temps en tant qu'individus, mais aussi en tant qu'acteurs et actrices dans une dynamique de société, puisque des rythmes nous sont imposés à travers les mœurs, les institutions, les relations de pouvoirs et tout ce qui circonscrit de près ou de loin la réalité sociale. Notre temps est influencé par celui des autres et les différentes temporalités qui imprègnent nos occupations¹. Ces remarques concernent le temps *commun*, ou collectif, interrogé notamment en sociologie (Rosa, 2010) ainsi que dans les études culturelles et médiatiques (Sharma, 2014).

Le temps est aussi sans conteste un concept majeur en physique, avec l'espace, la matière et l'énergie. Une grande partie des théories qui composent le corpus théorique de la discipline sont des théories de la *structure* de l'espace-temps, c'est-à-dire qu'elles décrivent ce fond (l'espace-temps) sur ou à travers lequel la matière et l'énergie interagissent. La communauté physicienne tente de décrire le temps à travers des représentations qu'elle veut les plus objectives possible (Paty, 2001). Il est fascinant qu'au sein d'une même discipline, on peut être amené à concevoir le temps de différentes façons. Ceci s'applique tout particulièrement à la physique, où le temps admet plusieurs définitions. Qui plus est, ces différentes conceptualisations peuvent être associées à un éventail de représentations, certaines construites visuellement, d'autres mathématiquement, et d'autres encore dans le langage courant. Ce pluralisme — des compréhensions et surtout des représentations — est particulièrement intéressant dans la mesure où il permet la construction d'un corpus riche pour cette étude.

La façon dont sont mobilisées les images pour représenter les idées sur le temps objectif sera centrale : il est attendu que l'étude de ces images, parallèlement à celle de la compréhension du temps, permette d'éclaircir une partie du contexte de représentation des

1. Un bon exemple pour saisir l'essence de cette notion est l'impact d'une pandémie mondiale sur notre façon de vivre le quotidien. Confiné-e-s à la maison, privé-e-s des activités habituelles et confronté-e-s à l'incertitude des dénouements possibles, notre horaire est bouleversé et nos plans pour l'avenir tout autant. Est-on lundi ? Est-on samedi ? Cela change-t-il quoi que ce soit à l'heure actuelle ?

connaissances en physique. Quelle crédibilité attribue-t-on aux illustrations, diagrammes et autres dispositifs visuels pour transmettre les connaissances dans la discipline? Les images peuvent-elles servir d'arguments dans les inférences scientifiques? Les images scientifiques médiatisent le savoir d'une façon particulière et c'est précisément leur rôle dans l'articulation des connaissances, que j'investigue ici par l'entremise de l'étude des manuels scolaires.

Cette recherche prend place au croisement de deux sources d'interrogation : le temps objectif comme concept développé en physique, et la variété des images scientifiques. Elle est interdisciplinaire, dans la mesure où un corpus de connaissances propre au milieu de la physique y est analysé avec des outils provenant de celui de la communication. La prochaine section constitue un bref survol des contributions académiques qui façonnent les compréhensions contemporaines du concept de temps en physique (§ 1.1) et celles de l'image en tant que dispositif de représentation (§ 1.2). J'y présente également des notions de base de sémiotique concernant la représentation visuelle tout particulièrement (§ 1.3). Les objectifs et les enjeux qui sous-tendent cette recherche sont alors exposés à la lumière de ce contexte théorique (§ 2). J'explique ensuite la méthodologie de recherche-crédation qui oriente l'analyse du corpus d'images et de textes issu de manuels scolaires de physique (§ 3). Les deux méthodes d'analyse, la sémiotique et la lecture proche, mènent respectivement à une caractérisation des images du corpus ainsi qu'à une interprétation du discours textuel des auteurs² à propos de ces images. Ces interprétations sont, elles aussi, doubles : elles prennent toutes les deux la forme d'une discussion textuelle, mais aussi d'une image (§ 4). Finalement, je discute des résultats de ces analyses à travers la notion d'objectivité (§ 5) et expose une réflexion sur les limites de cette étude au niveau du corpus et de l'approche afin d'en dégager les critiques et prolongements possibles (§ 6).

2. Il s'agit bien d'auteurs, et non d'auteur-riche-s puisque les manuels à l'étude sont dans leur entièreté écrits par des hommes. Ces ouvrages ont été choisis sur la base qu'ils sont couramment utilisés dans le cursus universitaire nord-américain. Ce constat ne fera pas l'objet de réflexions dans ce mémoire mais mériterait d'être questionné.

Chapitre 1

REVUE DE LITTÉRATURE ET CADRE CONCEPTUEL

1.1. Les visages du temps : une histoire du concept de temps en physique

Le terme « temps » peut référer à une variété de notions différentes et il est utile d'en distinguer au moins trois : le temps commun, le temps subjectif et le temps objectif. Le *temps commun* correspond à l'usage courant qu'on en fait. Incarné par les heures, les minutes, les semaines ou encore les années, ce temps relativement concret et intuitif constitue une valeur de référence, une construction pragmatique et surtout notre façon commune de caractériser le passage des événements. C'est le temps qu'on ne s'impose pas de définir, car une définition serait forcément circulaire : c'est ce que nous indiquent les montres, les horloges, ou tout autre appareil mesurant... le temps. Évidemment, définir une entité via ses unités de mesure est toujours problématique, mais quand il est question du temps, il s'agit d'une réponse commune (Dowden, 2015). S'intéresser à cette notion, c'est cependant aussi s'intéresser à la société qui la construit, et aux médiateurs techniques et symboliques qui interviennent dans cette construction. Le *temps subjectif*, pour sa part, réfère plutôt à l'expérience personnelle. Il s'agit d'un phénomène biologique et psychologique complexe relié au fonctionnement de notre cerveau. Si parfois il semble que notre perception du temps soit décalée de la réalité (quand on expérimente le *slow motion effect*, par exemple), c'est parce qu'il est toujours compris en relation avec le temps commun (Buonomano, 2017). C'est précisément ce concept qui intéresse les neuroscientifiques. Finalement, le *temps objectif* est un concept développé à travers les théories de la physique. Il correspond au temps en tant qu'entité objective, c'est-à-dire comme un élément fondamental ou une propriété de l'univers, dont la réalité est indépendante de tout·e observateur·rice (Zeh, 2007).

Les physicien·ne·s s'accordent sur l'existence du temps subjectif mais ne s'y intéressent pas. Elles et ils cherchent plutôt à saisir le temps en dehors de cette subjectivité humaine et

en lui trouvant la meilleure *représentation* possible. Or il n’y a pas consensus sur ce point. La compréhension du temps, de même que ses représentations, ont évolué énormément au cours de l’histoire de la physique. Encore aujourd’hui, une variété de conceptualisations et de représentations différentes cohabitent au sein du corpus théorique de cette discipline. C’est le temps objectif, à travers ses multiples facettes, qui est l’objet de la présente étude. Cette sous-section constitue un bref survol des questionnements entourant le temps qui ont occupé les membres de la communauté physicienne, des débuts de la physique moderne à aujourd’hui.

Bien que l’étude géométrique préparait déjà le terrain pour l’approche quantitative au XIV^e siècle, c’est avec les travaux de Galilée (1564-1642) au XVIII^e siècle qu’émerge l’essence du concept de temps objectif (Paty, 1994). On y retrouve l’idée d’un temps paramètre, quantifiable, lié aux expériences – et ainsi au monde – par l’entremise des mathématiques. Il devient alors concevable, d’un point de vue mécaniste, de décrire les objets en mouvement comme une certaine quantité de matière évoluant dans le temps, c’est-à-dire de donner leur position dans l’espace en fonction du temps. La notion de temps objectif se démarque alors de celle de temps commun : il est une variable et un outil dans l’étude du mouvement des corps matériels (Le Ru, 2017). Cette compréhension du temps innove par la prétention de le rendre accessible à la portée humaine : le temps n’est plus seulement mesurable, il est manipulable à travers les équations.

Historiquement, le développement de la représentation mathématique du temps suit de près un gain en précision dans la mesure du temps. En effet, le travail de Galilée et ses contemporains sur le pendule permet notamment le passage des horloges à eau (les plus précises alors) aux horloges à oscillateurs, et favorise ainsi une mécanisation grandissante du temps commun. Parallèlement à l’émergence du temps objectif à travers les lois de la dynamique, l’horloge, à partir de la régularité et l’invariance des phénomènes physiques qui la construisent, matérialise donc de plus en plus efficacement le temps commun. Bien qu’elle dépasse la portée du présent travail, l’étude historique des technologies et des pratiques de la mesure du temps (métrologie du temps, chronométrie, etc.) offre une perspective sur ce contexte de construction du temps objectif. C’est dans cet ordre d’idées que Jimena Canales (2015) propose d’explorer les relations entre le développement des technologies de la communication au XIX^e siècle et la formulation de la Relativité restreinte, et que Peter Galison (2003) analyse celles entre la synchronisation des horloges et la définition de la simultanéité d’Einstein.

La formulation mathématique du temps paramètre se clarifie avec la mécanique de Newton (1643-1727), qui est la première apparition explicite de la variable « t ». Dans un esprit de continuité avec Galilée, Newton construit une théorie à travers laquelle les

observables sont décrits en référence au temps. Les postulats qu'il utilise comme fondations à cette mécanique ont une signification philosophique profonde qui n'a pas d'équivalent dans la physique de Galilée. En effet, Newton postule un temps et un espace *absolus*, dont les constituants fondamentaux peuvent être représentés par l'instant (t_0) et le point (x_0) respectivement – des quantités infinitésimales de précision infinie, desquelles sont dérivées la durée et la distance. Linéaire et régulier, le temps classique est un étalon de la vitesse et présuppose une horloge universelle : l'horloge *de* l'Univers (Weinert, 2013). Il existe également, dans la théorie du mouvement de Newton, un lien important entre l'espace et le temps. Considérés tous deux comme des dimensions, ils sont distincts et indépendants l'un de l'autre. Ils forment un cadre dans lequel peuvent se produire les phénomènes, qui sont néanmoins indépendants d'eux (Paty, 2001a). Newton s'est aussi intéressé au statut ontologique du temps, à ce qu'il est en dehors de la description que l'on puisse en faire. Cet intérêt n'est pas sans critique dans le milieu de la physique. Nombre de physicien-ne-s soutiennent notamment que le problème du temps (ou de n'importe quel autre objet physique) n'est pas de comprendre sa nature ontologique, mais de lui trouver une représentation adéquate – c'est-à-dire une qui permette de faire des prédictions vérifiables expérimentalement (Hawking et Penrose, 1996). Ainsi, dans le contexte de la physique, les représentations sont pensées comme des outils, ou des intermédiaires, pour *décrire* les phénomènes.

Bien que le rapprochement entre le temps et l'espace remonte au moins aux premiers essais de géométrisation du temps vers le XIV^e siècle, c'est avec la Relativité restreinte au début du XX^e siècle qu'il prend son sens le plus profond (Paty, 2001a). Dans le contexte de celle-ci, on ne peut plus considérer le temps et l'espace comme ayant une signification physique objective indépendante : il s'agit plutôt d'un ensemble que l'on peut représenter avec un espace-temps à quatre dimensions, construit par des éléments infinitésimaux d'espace-temps (ds). La distinction des temps objectif et commun est d'autant plus marquée avec cette nouvelle compréhension qu'amène la Relativité restreinte. En effet, les équations relativistes permettent de décrire certains phénomènes dus à cette équivalence entre temps et espace, comme la dilatation du temps et le ralentissement des horloges en mouvement. Qui plus est, la relativité de la simultanéité assumée dans cette théorie détruit l'idée que seul le présent existe. Le présent devient une notion relative à la personne au point d'observation, et les événements qui se produisent simultanément pour un sujet peuvent se produire à des instants différents pour un autre. Accepter qu'il ne puisse y avoir une telle chose qu'un présent unique, que le passé et le futur soient tout aussi réels que le présent, est contre-intuitif pour le sens commun, mais bien ancré dans la physique actuelle. Einstein (1879-1955) n'était qu'une des nombreuses personnes qui ont proposé et défendu cette idée, laquelle

s'incarne dans le concept d'Univers-bloc¹. Ce point de vue, qui porte en philosophie le titre d'*éternalisme*, s'oppose au *présentisme*, pour lequel seul le présent a une réalité objective (Dowden, 2015). En dehors de la physique relativiste, le débat qui oppose ces deux visions est loin d'avoir atteint l'état du consensus – il suffit, pour s'en convaincre, de jeter un œil à la littérature récente sur le sujet, particulièrement en philosophie du temps (Callender, 2017).

En proposant la théorie de la Relativité générale (RG) en 1915, Einstein – et possiblement son épouse, Mileva Einstein (Gagnon, 2020), bien que ceci soit sujet à controverse – met en relation l'espace-temps et la présence de matière. L'interdépendance qui s'était formée entre le temps et l'espace à travers la Relativité restreinte est ainsi étendue à la matière. Une généralisation est aussi faite dans la structure de l'espace-temps : l'espace euclidien *plat* mobilisé dans les autres théories n'est plus qu'une approximation, valide localement, de l'espace déformé par la matière invoqué en RG. L'espace-temps est alors défini comme une variété (M) quantifiée par une métrique². Cette période d'effervescence des idées en physique est aussi celle de la production d'une autre théorie révolutionnaire : la mécanique quantique. Cette dernière vise à expliquer plusieurs énigmes tenaces du monde microscopique (Born, 1955) telles que le rayonnement du corps noir ou encore l'effet photo-électrique. Bien qu'elle soit riche en sources de problèmes philosophiques (les interprétations possibles et le problème de la mesure étant des exemples bien connus), la mécanique quantique, contrairement à la RG, est construite sur l'idée d'une dynamique, soit celle de donner l'évolution des quantités *dans le temps*, à partir de lois et de conditions initiales. Elle n'amène donc pas de nouveautés majeures pour la conception du temps, par rapport à la mécanique de Newton. La théorie qui étend le formalisme de la mécanique quantique aux phénomènes relativistes, la théorie quantique des champs (QFT), réfère quant à elle au même concept de temps que celui de la Relativité restreinte. La QFT entretient des rapports nouveaux avec la causalité, à travers le théorème CPT³ et la localité des interactions élémentaires notamment, sans pour autant altérer la compréhension *classique* du temps objectif (Cohen-Tannoudji, 1994).

Les mécaniques classique et quantique attribuent au temps un caractère fondamental : il est considéré comme une entité à part entière, extérieure aux phénomènes. Dans le cas

1. L'Univers-bloc est l'idée que le présent, le passé et le futur ont tous une existence réelle.

2. La notion de variété généralise celle d'espace. Si une courbe (ligne, cercle, etc.) est une variété à une dimension, une surface (plan, sphère, etc.) est une variété à deux dimensions, on peut projeter, plus généralement, l'idée d'une variété de dimensions quelconques. Pour une très petite région de ces espaces, celle-ci doit s'apparenter à l'espace physique qui nous est commun. La métrique, elle, sert à décrire mathématiquement une géométrie quelconque. Une analogie utile pour ce concept est la projection de Mercator : c'est un outil pour calculer des distances sur un cylindre.

3. De façon simplifiée, le théorème CPT stipule que les équations qui décrivent les interactions des particules doivent être invariantes sous l'effet de la symétrie CPT. Cette symétrie combine trois opérations : la conjugaison de charge des particules (C), l'inversion des coordonnées spatiales ou la parité (P) et le renversement du sens du temps (T).

de la Relativité restreinte et la QFT, le temps n'est plus fondamental en ce sens qu'il est relatif à l'espace, mais cette nouvelle structure qu'est l'espace-temps est, elle, fondamentale. L'espace-temps est en soit un cadre dans lequel se déroulent les événements. Rien de tel n'est assumé dans la théorie géométrique de la RG et les modèles qui en découlent. L'espace-temps y est plutôt une entité dont les propriétés sont définies *par* les phénomènes physiques (Paty, 1994). Ceci a notamment fait resurgir le débat entre substantialistes et relationnistes⁴, à savoir si la théorie de la RG peut être associée à l'une ou l'autre de ces philosophies du temps. En effet, certain·e·s auteur·rice·s y ont vu la concrétisation d'une vision relationnelle, alors que d'autres trouvent le rapprochement injustifié (Pooley, 2008). John Earman (1989) propose que, quoiqu'enrichissante à différents niveaux pour la compréhension de l'espace et du temps, la discussion en termes de ces deux avenues est une mauvaise formulation du problème ontologique et qu'une nouvelle voie doit être pensée pour comprendre la notion de temps de la RG.

Les théories mentionnées jusqu'ici n'incorporent pas d'explication pour le cours du temps, cette asymétrie apparente dans la direction qu'il prend : elles sont toutes invariantes sous renversement (Albert, 2000). Ceci ne correspond évidemment pas à notre expérience de bien des phénomènes tels que la diffusion d'un gaz (qui passe toujours du milieu concentré au milieu moins concentré) ou encore le bris d'un objet (qui ne se reconstitue jamais spontanément). En effet, nous sommes constamment témoins de systèmes qui se comportent ainsi, mais jamais nous ne les voyons revenir à leur état initial de façon spontanée. C'est cette incohérence entre les théories et l'expérience du temps telle que nous la vivons qui est à l'origine du fameux problème de la *flèche du temps*⁵. Plus précisément, il s'agit ici de la flèche *thermodynamique* du temps. Il existe d'autres incarnations de la flèche du temps. Le modèle standard de la cosmologie en intègre une version : l'expansion de l'Univers suit un cours qui semble orienté dans un sens bien unique, ce qui est à l'origine de ce que l'on appelle la flèche du temps *cosmique*. Cette dernière serait en lien avec la flèche gravitationnelle, fondée sur l'impossibilité de sortir d'un trou noir une fois qu'on y est entré. Finalement, on appelle flèche *subjective* du temps le fait de se rappeler du passé et non de l'avenir (Prigogine, 1980).

4. Relationnisme et substantialisme sont deux réponses différentes à la question ontologique du temps objectif. Le relationnisme propose que le temps soit un ensemble de relations entre les événements. En d'autres mots, le temps serait dépendant du changement. Le substantialisme propose plutôt que le temps existe indépendamment du matériel physique et de ses événements qui s'y produisent (Dowden, 2015).

5. La flèche du temps, ou l'irréversibilité du temps, est une expression pour désigner le fait que le temps s'écoule toujours dans la même direction dans notre expérience du monde. Il constitue un des problèmes non résolus de la physique, comme elle ne rend pas compte de façon satisfaisante de ce phénomène dans ses théories.

Ludwig Boltzmann (1844-1906) a grandement contribué au problème de la flèche thermodynamique par l'introduction de la fonction d'état entropie (S) : une mesure du degré de désordre. La deuxième loi de la thermodynamique ($\Delta S \geq 0$) stipule que toute transformation réelle d'un système isolé s'effectue avec création d'entropie, alors qu'une transformation réversible ne la modifie pas. Intuitivement, il semble en découler que le temps doit être orienté dans le sens d'une entropie grandissante. Cette interprétation est cependant ancrée dans l'état des choses tel qu'on l'observe, et non dans la théorie même. En effet, il s'agit d'un constat phénoménologique. Pour justifier le passage de la deuxième loi à l'affirmation que le temps est défini comme le sens dans lequel l'entropie augmente, on doit poser d'abord que l'état initial des choses est celui d'un système d'entropie minimale. De façon générale, il ne semble actuellement pas possible d'expliquer le sens du temps sans recourir à une théorie des conditions initiales (Callender, 2004).

Finalement, la nature et les propriétés du temps étaient sources de débat au XVII^e siècle, alors qu'un seul cadre théorique (la mécanique de Newton) permettait de décrire efficacement les phénomènes physiques. Grâce aux avancées techniques et conceptuelles en physique, et au développement de la thermodynamique, la mécanique quantique et la RG, de nouvelles compréhensions du temps ont suivi. Les deux dernières théories sont d'ailleurs à la base de modèles extrêmement en phase avec les observations, c'est-à-dire fortement confirmées par l'expérience, chacune pour un régime spécifique. Néanmoins, selon plusieurs membres des communautés physicienne et philosophique, une physique cohérente doit expliquer la coexistence de ces différentes conceptions du temps, ce qui s'inscrit, entre autres, dans les tentatives actuelles d'unification de ces théories. Ceci est d'autant plus étonnant quand on réalise qu'on tente de résoudre ce problème depuis plus d'une cinquantaine d'années, les théories de la RG et QFT ayant été développées au début et à la moitié du XX^e siècle respectivement. Sans compter que la mécanique classique, qui garde sa pertinence à l'échelle d'énergie qu'est celle de la vie courante, est encore aujourd'hui un domaine de recherche important en physique. Elle est effectivement utile pour résoudre une gamme très importante de problèmes actuels (Taylor, 2005). En bref, cette histoire du temps en physique⁶ peut nous permettre de comprendre les différents questionnements que les physiciennes et physiciens se posent à son sujet ; ceux-ci s'arriment, entre autres, aux problèmes de la mesure, de la représentation et de l'ontologie. Cet aperçu historique permet aussi, plus spécifiquement, de comprendre comment se sont construites les différentes compréhensions de ce concept au sein de la discipline. On peut catégoriser

6. La très brève histoire du temps qui a été présentée ici ne met en vedette aucune physicienne, ce qui c'est tout-à-fait typique des histoires de la physique (Rosser, 1986). Il est clair que des femmes ont contribué à la clarification des problèmes du temps objectif et à sa construction, et que des explications sociologiques existent pour la présence minoritaire (ou quasi-invisible) de ces contributions dans la littérature. Encore une fois, il n'y aura pas de discussion sur ce constat au sein de ce mémoire.

ces compréhensions en fonction des différentes grandes théories : les temps classique, relatif, émergent et orienté. Chacun de ces temps peut être associé à une ou des images, les plus connues étant sûrement la flèche (Figure 2) (a) et l'Univers-bloc (Figure 2) (b), lequel imprègne de façon remarquable les représentations de l'inflation cosmique (Figure 2) (c) notamment.

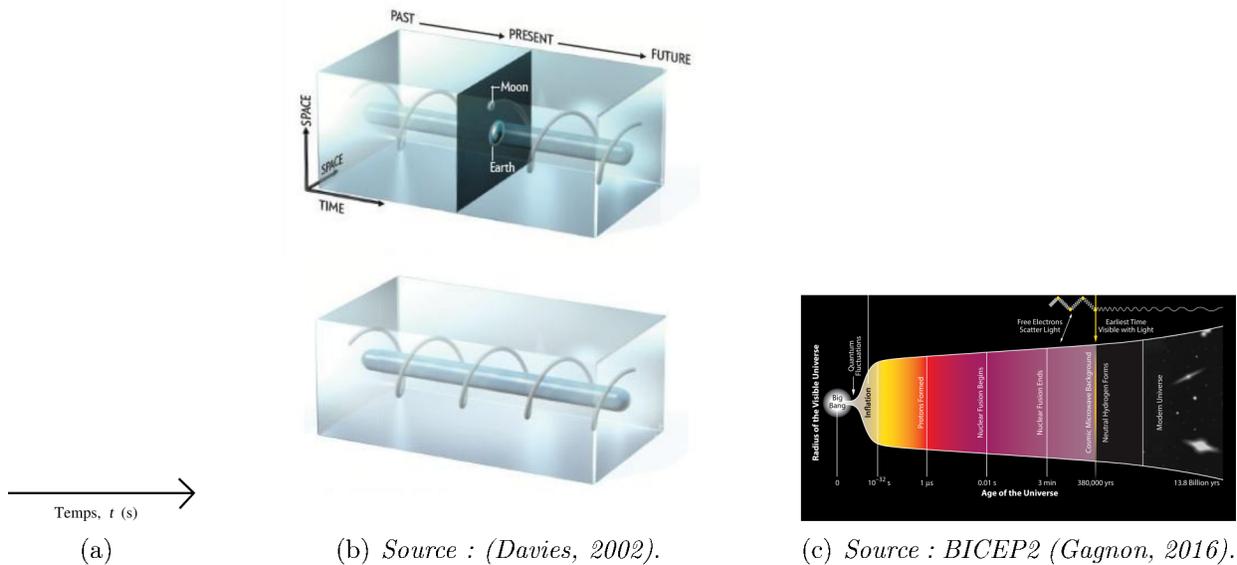


FIGURE 2. Des images qui représentent le temps : (a) la flèche, (b) l'Univers-bloc et (c) l'inflation cosmique.

1.2. La représentation des savoirs : culture visuelle et scientifiques

Parmi les différents sens qui permettent notre accès au monde, la vue est favorisée, pour ne pas dire surexploitée. Ceci est particulièrement le cas au sein des sociétés occidentales actuelles où la publicité, les réseaux sociaux et une partie importante des médias de masse utilisent l'image et la combinaison texte-image comme moyens de communication privilégiés. Regarder, voir et savoir s'y présentent à nous comme des notions « dangereusement liées » (Jenks, 1995, p. 1). Cette omniprésence et primauté du visuel dans les milieux de production et transmission du savoir, tout comme ceux de la vie courante, s'intègrent dans ce qu'il est aujourd'hui commun d'appeler la « culture visuelle » (Emmision et al., 2012, p. 21) du monde postmoderne. On parle parfois aussi d'« oculocentrisme » (Chandler et Munday, 2011) pour référer à ce biais perceptuel et épistémologique en faveur du visuel.

Beaucoup plus récente que celle des images scientifiques en soi, l'histoire de l'étude de ces images a commencé dans les années 1980 quand le regard s'est porté sur les pratiques scientifiques plus généralement (Anderson, 2009). Ainsi, la considération de la dimension sociale de la pratique scientifique et de son historique a rendu légitime l'étude des images produites dans ce milieu par les outils de la sociologie, de l'histoire, des études culturelles (Werner, 2015) et de l'histoire de l'art (Bigg, 2012). Il s'agit d'un thème toujours d'actualité, notamment dans les *Science and Technology Studies* (STS) (Coopmans et al., 2014), les études communicationnelles et médiatiques (Cubitt, 2014) et les *Visual Studies* (Anderson, 2009). Les travaux portant sur les images scientifiques constituent un ensemble extrêmement diversifié et beaucoup d'entre eux prennent place à la croisée des disciplines mentionnées précédemment — et de plusieurs autres. Le survol présenté ici est donc nécessairement « réducteur et sélectif » (Burri et Dumit, 2008, p. 298), mais permet de situer le sujet dans une partie considérable de son écosystème théorique.

Parmi les directions possibles, l'approche de la sémiotique visuelle est de penser les images comme les réalisations complexes d'un langage et de se pencher sur leur syntaxe et leur sémantique. On analyse alors la façon dont l'image structure l'information ou produit le sens : par hiérarchie, analogie et autres processus. La façon dont la couleur, la perspective, le cadrage et la composition créent les images peut aussi être à l'étude (Saouter, 2000). Plus généralement, la sémiologie et la sémiotique (deux théories du signe) renvoient à l'étude du processus de la *signification* et des *systèmes signifiants*. Dans le cadre de ce travail, j'utiliserai des outils conceptuels et méthodologiques de la sémiotique pour analyser les images du temps produites dans le milieu de la physique — elles seront donc pensées comme des représentations visuelles, ou *signes*. La prochaine section explicite les bases de l'approche en question. Il serait tout aussi pertinent, bien qu'il ne s'agisse pas de l'objet de cette étude, de s'intéresser aux capacités cognitives mobilisées pour interpréter le contenu des images, une approche plutôt propre aux sciences cognitives. Ou encore, on aurait pu questionner les *cultures visuelles scientifiques*, incarnées dans « le pouvoir des images pour informer et convaincre » (Mosley, 2007, p. 292). En sciences sociales, on pense aux images avant tout en termes de constructions, c'est-à-dire comme des artefacts⁷. Les conditions de production et de circulation de ces images, leur participation dans les relations de pouvoir et leur rôle au sein de différents groupes sociaux sont alors étudiés (Burri et Dumit, 2008).

Le rôle de l'image dans les négociations autour de la production du savoir a été étudié par les historien·ne·s et sociologues des sciences et des médias, notamment à travers des études de cas sur des images iconiques. C'est dans cette optique que Charlotte Bigg (2011) contextualise la visualisation du mouvement brownien réalisée par Jean Perrin au début du

7. Qui est ici synonyme de « construction humaine », plutôt qu'« effet indésirable », la deuxième expression correspondant plutôt à l'usage qui en est généralement fait dans les laboratoires de physique.

XX^e siècle, que Kelley Wilder (2011) explore les photographies de la radioactivité prises par Henri Becquerel à la fin du XIX^e siècle et que David Kaiser (2005) replace les diagrammes de Feynman au cœur de la physique américaine d'après-guerre. Dans ce même ordre d'idées, mais avec une perspective plus large, Peter Galison (1997) veut exposer les pratiques présumées par les traces de particules (*track images*) de la physique des hautes énergies. Dans l'œuvre majeure *Objectivité* (2007), Lorraine Daston et Peter Galison proposent de tisser méticuleusement les liens entre producteur·rice·s d'images, productions et vertus épistémiques grâce à une étude des atlas scientifiques du milieu du XIX^e siècle. Plus spécifiquement, la philosophe et l'historien soutiennent que différentes « vertus épistémiques » ont imprégné – et imprègnent encore – la pratique de production des images scientifiques dans la façon qu'on les crée, qu'on les utilise et qu'on les défend (2007, p. 53). On note une grande variété de genres d'image dans les sciences naturelles. Celle-ci s'arrime à un registre tout aussi vaste de méthodes d'imagerie. On peut penser aux instruments d'optique, aux logiciels graphiques, aux simulations numériques ou simplement au dessin. L'imagerie entretient des liens avec les différents outils d'observation et, ce faisant, avec la notion de *preuve*. Le concept d'observation a été exploré à cet effet et sa compréhension courante a été critiquée. D'une grande pertinence sur ces questions sont l'ouvrage collaboratif édité par Lorraine Daston et Elizabeth Lunbeck : *Histories of Scientific Observations* (2011) et l'histoire de la microscopie et son rapport avec l'œil proposée par Jutta Schickore (2007).

Des chercheur·e·s en communication et études médiatiques se sont intéressé·e·s au statut de l'image dans les différentes situations de communication et ont étudié leurs rôles dans différents genres discursifs tels que l'article de recherche et l'ouvrage de vulgarisation (Dondero, 2010a). La vulgarisation scientifique comme terrain pour investiguer les images scientifiques et leur rapport au savoir est d'ailleurs une stratégie couramment mobilisée (Babou, 1999; Casanova, 2011; Dondero 2009 et 2010b; Jacobi, 1984 et 1989; Nieman, 2000). Des chercheur·e·s ont même remis en question le statut de l'image comme catégorie théorique, ou du moins la nécessité de construire une théorie de l'image (Babou, 2008). Dondero et Fontanille (2014) suggèrent que les images se présentent comme des « dispositifs expérimentaux », des « instruments de preuve », et des « éléments d'argumentation », en laboratoire, logique mathématique et littérature de diffusion, respectivement. Maria Giulia Dondero (2009) propose quant à elle d'inventorier les statuts des images utilisées en astrophysique et en archéologie pour dater des phénomènes et des objets afin de comprendre comment ces disciplines représentent la stratification temporelle. L'approche sémiotique peut être combinée ou intégrée dans une étude de laboratoire pour comprendre l'évolution du statut épistémique d'images apparaissant dans un article scientifique (Allamel-Raffin, 2004; Bastide, 1985).

Un aspect des images scientifiques qui a été grandement exploré est la façon dont elles se distinguent des autres images. Cette approche prend racine dans la distinction traditionnelle entre sciences et arts, et nous ramène au problème philosophique ancestral de la démarcation (*demarcation problem*), soit celui de distinguer sciences et non-science. Cette dichotomie a été critiquée sur la base qu'elle n'a apporté qu'une maigre compréhension des images en question (Jones et Galison, 1999). Il en est de même pour l'opposition entre langage textuel et image, ou registres linguistique et pictural, qui est aussi à l'origine de beaucoup de réflexions (Babou, 2008 ; Lüthy et Smets, 2009). Il a été proposé que les images scientifiques devaient être comprises plus généralement comme des « arguments » (Hentschel, 2014, p. 51) et qu'il nous fallait développer une « épistémologie matérielle » de l'imagerie scientifique (Wise, 2006, p.82). J'adopterai ce point de vue.

Un thème central de mon travail de recherche est justement la tension quant à la valeur épistémique de l'image en physique. D'une part, une image peut constituer un élément de preuve, dans la mesure où elle est le produit d'une expérience empirique, et qu'on assume l'objectivité des observations. D'autre part, on tient à dissocier la *forme* des représentations de l'idée ou de la chose qu'elles représentent – une certaine subjectivité étant généralement associée au choix de la représentation. Autrement dit, la *réalité* d'une entité est plutôt conçue comme résidant dans sa structure générale et non la forme particulière qu'elle peut prendre. Cette dernière dichotomie rappelle la traditionnelle division entre matérialité et abstraction, entre expérimentation et théorie. Dans la pratique cependant, il est rarement possible de distinguer les deux réalités (Galindo, 2011). Elles se recoupent à de multiples niveaux : les expériences sont chargées de théorie (*theory-ladden*), et les théories démontrent leur valeur dans l'intensité de leur adéquation aux phénomènes naturels⁸ (Bogen, 2017). De la même façon, des graphiques, des photographies et d'autres sortes d'images sont utilisés comme arguments et comme preuves dans une multitude de contextes de la pratique (Quintard, 2018). Comprendre cette tension de l'image contribuerait, dans une perspective plus large, à comprendre la place de l'image dans la représentation du savoir en physique.

La Figure 3 résume visuellement cette dernière section, en plus de concrétiser la façon dont je conçoit le processus de revue de littérature, du moins pour un concept dont l'intérêt est partagé par une variété de champs disciplinaires. Ce processus est l'établissement d'un topo le plus exhaustif possible mais forcément jamais tout à fait complet — incomplétude représentée par les faces du prisme non mobilisées dans l'image — de contributions teintées d'approches méthodologiques distinctes. Dans le diagramme, quatre approches prennent place en tant que projections des faces d'un prisme. Différentes couleurs sont utilisées pour marquer davantage

8. Ces sujets sont explorés en profondeur dans les travaux de Kuhn (1996) et de Feyerabend (1959) notamment.

cette distinction. Les auteurs et autrices, symbolisé-e-s par leur nom dans un losange, sont positionné-e-s dans le diagramme selon que leurs travaux sur les images scientifiques s'inscrivent dans l'une ou l'autre des approches, ou encore dans une combinaison d'entre elles. Des citations sont mises en valeur par le biais de bulles, à la manière d'une bande dessinée. Finalement, des cercles gris au sein desquels est inscrit le nom de concepts souvent utilisés pour structurer les études se retrouvent dans les coins droit du haut et gauche du bas.

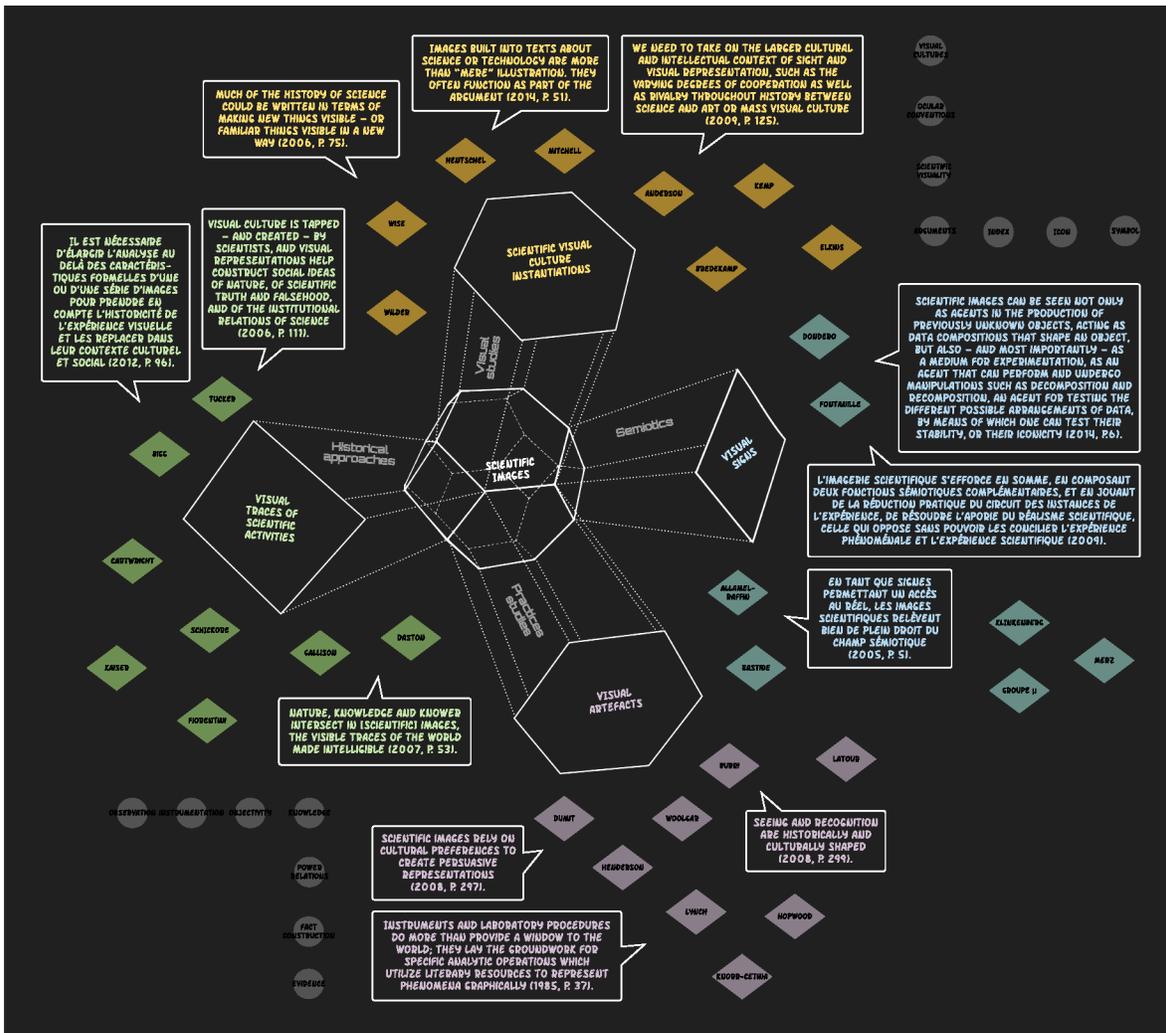


FIGURE 3. Diagramme représentant différentes approches comme autant de perspectives sur les images scientifiques (ma production). Cette pluralité dans la façon de s'intéresser aux images les amène à être comprises différemment. L'image est à la fois une métaphore visuelle de la notion de perspective disciplinaire et une carte de l'écosystème théorique des images scientifiques. L'image se trouve aussi dans l'Annexe A pour une meilleure lisibilité. Les citations sont dans leur langue originale.

1.3. La sémiotique de Peirce : une structure pour l'analyse d'images

Il n'y a aucun doute, la notion de représentation est fondamentale en physique — et dans les sciences en général. Sans tenter d'en diminuer la complexité ou la richesse, on peut dire que les connaissances scientifiques sont articulées, pas uniquement mais dans une mesure considérable, via des entités représentationnelles (pensons aux instruments de mesure et aux savoir-faire associés). C'est effectivement à travers des théories, des modèles, des images ou des équations que les sciences représentent une *réalité* dite objective. Cette situation donne lieu à une littérature académique riche au sein des disciplines qui s'intéressent aux sciences naturelles et leurs connaissances, et tout particulièrement celles qui les pense en termes de « pratiques sociale » et « productions » respectivement (Sismondo, 2008, p.13).

La discussion sur la représentation scientifique dans la tradition analytique de la philosophie des sciences a commencé au courant du XX^e siècle et porte essentiellement sur le lien qu'entretient la représentation avec son objet. On y aborde la relation entre les dispositifs de représentation et leurs « cibles » (Boesch, 2015, parag. 2), c'est-à-dire entre les « théories » et le « monde » (Suárez, 2009, p. 91). Le défi est alors celui de définir clairement les critères normatifs qui distingueraient une mauvaise d'une bonne représentation, c'est-à-dire qui refléterait *bien* son objet (Frigg et Nguyen, 2019). Les contributions à la clarification de ce problème questionnent l'isomorphisme des représentations vis-à-vis de leur représenté (French, 2003) ; elles s'attardent et critiquent la notion de ressemblance (Fraassen, 2008), celle de structure (Bartels, 2006) ou, plus pragmatiquement, celle d'adéquation empirique (Dukich, 2012). On tente aussi de caractériser la représentation scientifique, puisqu'elle semble fonctionner différemment de la représentation non-scientifique (Boesch, 2017). Il s'agit d'un sujet à controverse, et plusieurs proposent que les représentations scientifiques peuvent être considérées comme un cas particulier d'une notion plus générale de représentation (Callender et Cohen, 2006), au même titre que les représentations esthétiques (Downes, 2009), par exemple.

La critique évidente à cette circonscription du regard sur la relation objet-représenté est l'idée que les représentations sont en fait dépendantes des activités complexes dans lesquelles elles se situent pour être signifiantes (Rheinberger, 1994). Ainsi, des théoricien-ne-s s'intéressent à la représentation dans le contexte de la pratique scientifique, un sujet maintenant bien établi dans le champs des STS (Coopmans et al., 2014), celui des *History and Philosophy of Science* (HPS) (Suárez, 2009) et des *Visual (Cultural) Studies of Sciences* (Bigg, 2012).

Les avenues pour structurer l'analyse des représentations scientifiques sont multiples. En communication, le cadre sémiologique de Saussure se présente comme un outil potentiel pour cette tâche. Il admet une importance capitale au caractère symbolique de la représentation (ou plutôt du *signe*), ce qui le rend particulièrement indiqué pour l'analyse des systèmes de communication linguistiques. Il s'agit encore une fois de comprendre les représentations comme des entités doubles, composées d'un signifié et d'un signifiant, mais dont l'association relève primordialement de la convention, de l'arbitraire (Saussure, 1971). Une telle compréhension de la représentation scientifique n'est évidemment pas sans poser problème (Teller, 2008). Entre autres, l'image peut partager avec les objets qu'elle représente des attributs qui ne sont pas uniquement de l'ordre de la convention. La ressemblance entre une pomme et une illustration de pomme ne se retrouve pas entre le mot « pomme » et ce même objet. Le plan ontologique de la relation qui relie la structure interne d'un matériau à sa micrographie ne se retrouve pas dans la relation qu'elle entretient avec sa théorisation mathématique. Comprendre l'image comme une entité linguistique ne tiendrait donc pas pleinement compte de la richesse sémiotique des images.

La tradition sémiotique rivale, celle de Charles Sander Peirce, permet un regard plus large sur la représentation — aussi comprise comme un signe — en englobant l'ensemble des systèmes signifiants. Elle s'en distingue en s'attardant à la fois à la relation qui unit la représentation à son objet, mais aussi à celle qui la lie à son contexte : son lien avec le récepteur du message et celui entre le récepteur et l'objet lui-même sont tout aussi essentiels à la création de la signification de ladite représentation. Ainsi, Peirce conçoit les représentations comme participant à une relation triadique de laquelle peut émerger le sens. C'est une théorie du signe, et avant tout une philosophie de la connaissance (Babou, 1999). La sémiotique percéenne se prête particulièrement bien à l'étude des images puisqu'elle admet une place pour les relations de *ressemblance* et de *causalité* des représentations avec leur objet, ce qui lui a valu d'être utilisée dans de nombreuses études sur les images scientifiques⁹.

Chez Peirce, les trois éléments à la base de la production du sens, ou processus de sémiose, sont le **representamen** (le signe en soit), l'objet et l'interprétant : « A sign, or representamen, is something which stands to somebody for something in some respect or capacity »¹⁰ (Peirce, p. 228). L'**objet** est le sujet d'un representamen et un interprétant. Il peut s'agir d'une chose matérielle, d'un événement, d'une proposition, d'une entité fictive, ou quoi que ce soit de concevable. L'**interprétant**, concept clé de la théorie, est celui qui

9. Voir l'analyse du discours télévisuel à propos du cerveau par Babou (1999), celle des images produites en physique des matériaux par Allamel-Raffin (2006) et celle la figure de l'atome par Cazanova (2011) pour n'en citer que quelques-unes.

10. « Un signe, ou representamen, est quelque chose qui tient lieu pour quelqu'un-e de quelque chose sous un certain rapport ou à un certain titre » (ma traduction).

permet d'intégrer l'idée que la signification d'un signe passe justement par son *interprétation*. Il n'est pas synonyme de « personne interprétante », mais constitue plutôt le « signe mental résultant de la rencontre avec un signe » (Cobley et Jansz, 1997, p. 23), et peut être la « compréhension » du signe par le récepteur (Atkin, 2013, paragr. 3). Il est donc lui aussi un signe et mène à d'autres interprétants, s'insérant ainsi dans une chaîne sémiotique sans fin.

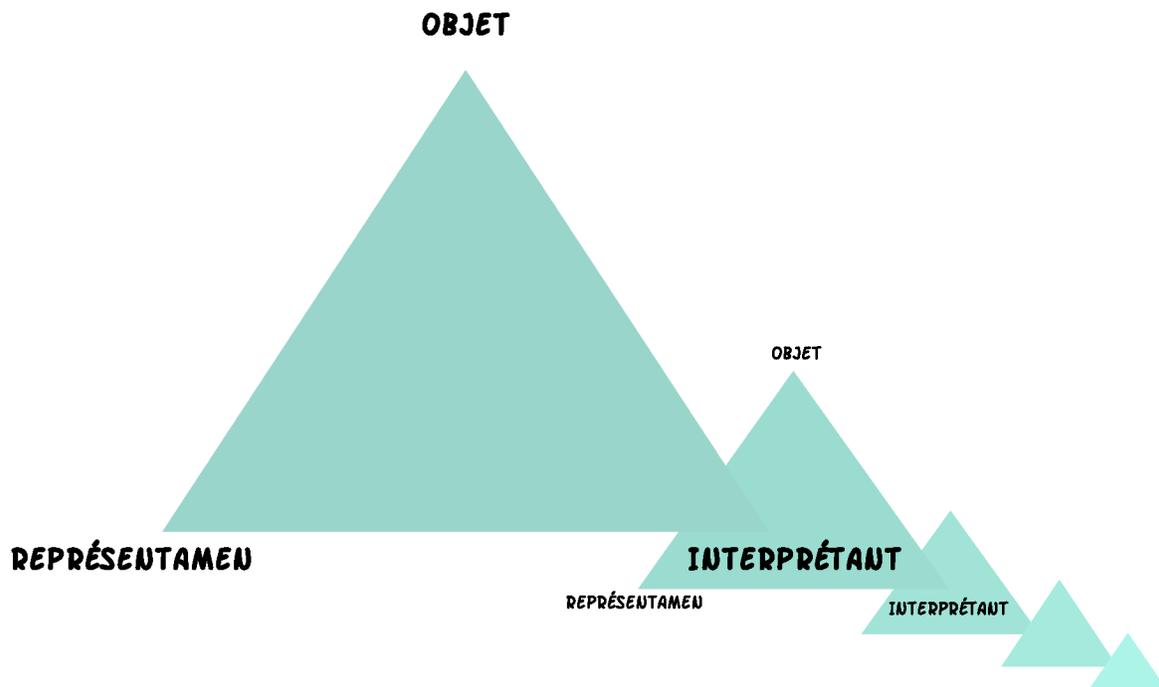


FIGURE 4. Représentation schématique de la sémiotique selon Peirce (ma production).

Selon la relation du signe avec lui-même, avec son objet, ou avec son interprétant (via l'objet), Peirce distingue trois autres trichotomies de typologies, respectivement : qualisigne – sinsigne – legisigne, indice – icône – symbole et rhème – dicent – argument. Définissons brièvement les concepts de la deuxième triade puisqu'ils seront utiles à l'analyse. L'**icône** renvoie à son objet par *similitude* avec lui. Il lui ressemble donc sous certains aspects — il partage avec lui une propriété, quelle qu'elle soit. Comme nous travaillerons avec des images, nous pouvons ici nous limiter à considérer la ressemblance *physique*. Un exemple typique est le dispositif de signalisation routière indiquant le risque d'une chute de pierres : on y retrouve une représentation simplifiée de pierres se décrochant d'une paroi. La définition de l'**indice** se rapproche de celle qu'on retrouve dans le langage courant. On peut penser à la relation de l'indice à son objet comme une connexion factuelle ou de causalité. La fumée pour le feu en est l'exemple classique. Le **symbole**, pour sa part, représente

son objet par habitude d'interprétation, ou norme de référence à son objet. Il tient de la convention, qu'elle soit assumée ou non. Les lettres de l'alphabet, par exemple, sont autant de symboles.

Peirce, dans son œuvre non terminée, aborde la représentation dans « un sens très large, qui peut être mieux expliqué par des exemples que par une définition »¹¹ (Peirce, 1867, p. 292) (ma traduction). Dans cet ordre d'idées, utilisons nous aussi un exemple pour alléger l'explication, soit une capture d'écran (Figure 5).

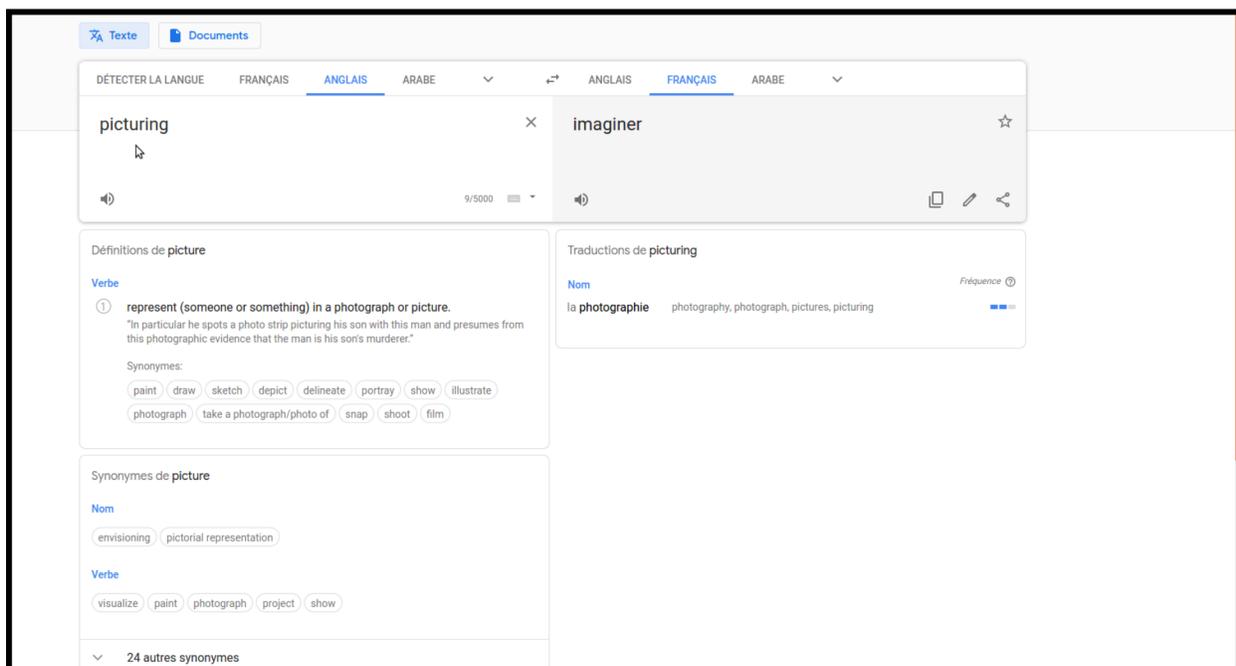


FIGURE 5. Capture d'écran d'un ordinateur présentant un logiciel de traduction en ligne pour traduire pour le terme « picturing » de l'anglais vers le français (ma production).

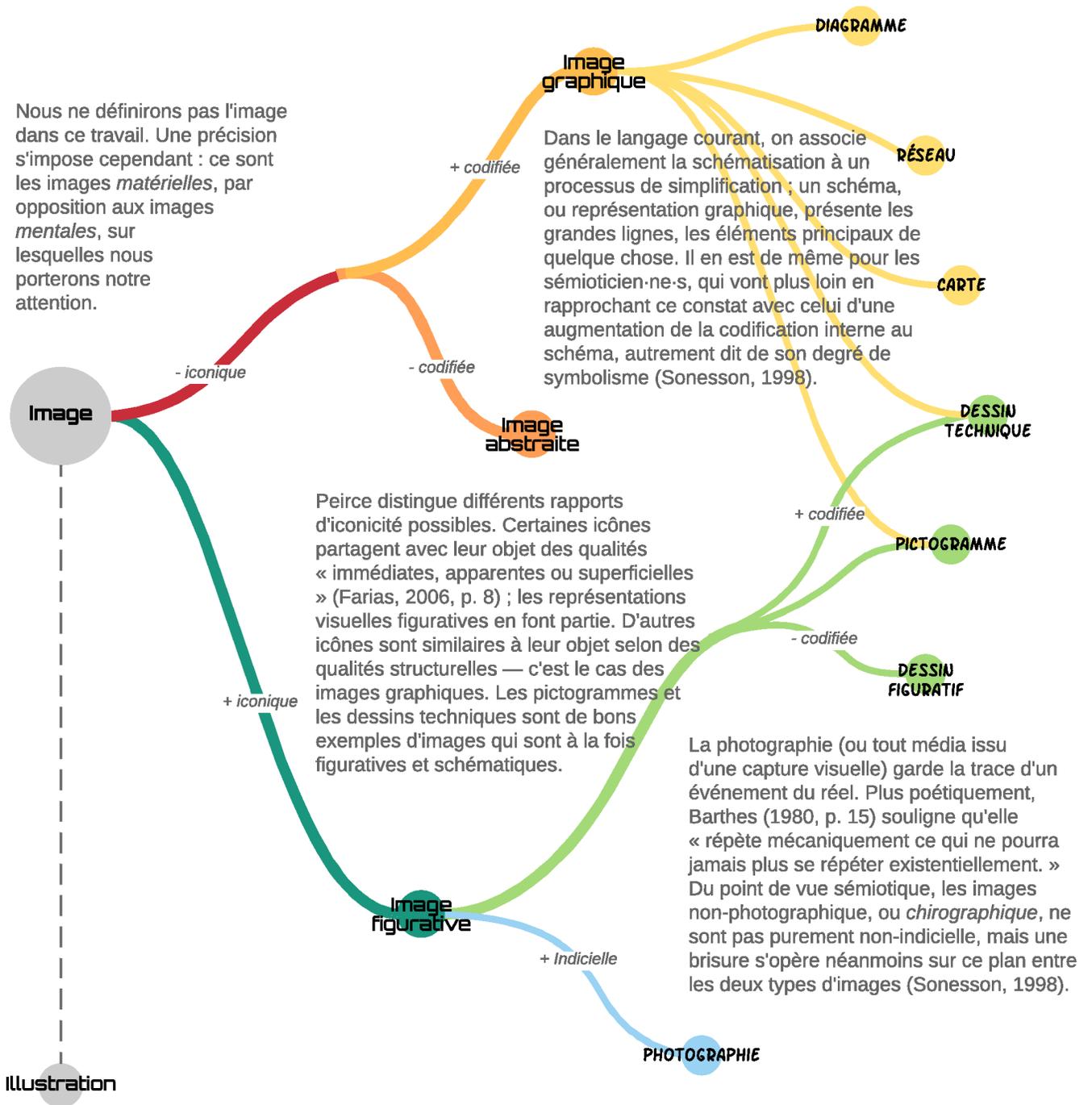
On peut constater rapidement, sans même l'aide du titre, qu'on se trouve face à une capture d'écran. En effet, l'œil habitué aux outils numériques identifie certains éléments visuels typiques tels que la barre de défilement à l'extrême droite ou le curseur dans le coin gauche du haut. De façon plus générale, la taille du texte relativement à celle du cadre, la présence de pictogrammes, la qualité de l'information visuelle (sa résolution) et les dimensions de l'image en sont d'autres indicateurs : on reconnaît le *style* d'une page web classique. Les mots « français », « anglais » et « arabe » sont utiles à l'interprétation, mais leur disposition et leur forme — la couleur tout particulièrement ici, puisqu'elle indique une sélection — l'est d'autant plus : on comprend qu'il s'agit d'un logiciel de traduction en ligne et qu'il est en mode anglais vers français avant même d'avoir lu « *picturing* » et

11. « a very extended sense, which can be explained by instances better than by a definition ».

« *imaginer* ». Ce sont les modalités du langage visuel qui permettent de reconnaître (ou d'accepter) qu'il s'agit d'une capture d'écran, et non, par exemple, d'une reproduction d'une page imprimée ou d'une capture d'écran télévisuelle.

Comme toute image photographique, la capture d'écran est une *trace* de quelque chose. Ici, l'image indique qu'à un certain moment, la traduction du mot « *picturing* » vers son alternative dans la langue française a été effectuée. C'est un signe indiciel de l'événement en question. Si on regarde maintenant à plus petite échelle, on constate que plusieurs icônes participent à la composition de cette image. En effet, les pictogrammes de haut-parleurs, de clavier, de document ou de crayon, entre autres, ressemblent visuellement aux objets non-virtuels qu'ils représentent. L'action à laquelle ils renvoient, cependant, est liée à ces représentations de façon symbolique : le haut-parleur peut être associé au son et représente l'écoute ; le crayon est un outil d'écriture et symbolise l'édition.

Il est plus utile de voir les notions d'icône, symbole et indice comme des propriétés ou caractères compatibles et continus (à la manière d'un spectre) plutôt que des types discrets et distincts de signes. C'est très rarement, sinon jamais, le cas qu'une représentation soit une instance pure de l'une ou l'autre de celles-ci. Une image est plus ou moins symbolique, plus ou moins iconique et plus ou moins indicielle. Sur la base des concepts abordés précédemment, une variété de termes associés à l'image peuvent maintenant être clarifiés. C'est précisément ce qui est entrepris par l'entremise de la Figure 6.



Le terme illustration, un terme générique qui remplace parfois celui d'image dans le langage courant, renvoie à sa fonction au sein d'un texte. En effet, l'illustration *illustre* ce qui est raconté dans le texte ; elle vise à le rendre plus clair, ou encore, plus attrayant. Dans ce mémoire, par exemple, les images ne sont généralement pas de simples illustrations, puisqu'elles contiennent de l'information qui ne se retrouve pas, au préalable, dans le reste du texte. Bien qu'une partie de cette information supplémentaire puisse se retrouver dans l'image sous forme textuelle, une autre partie réside précisément dans la *structure* de l'image. L'image est ensuite expliquée par le texte, mais ce n'est pas simplement l'image qui illustre le texte.

FIGURE 6. Petit lexique visuel des termes couramment associés à l'image (ma production).

Chapitre 2

PROBLÉMATIQUE

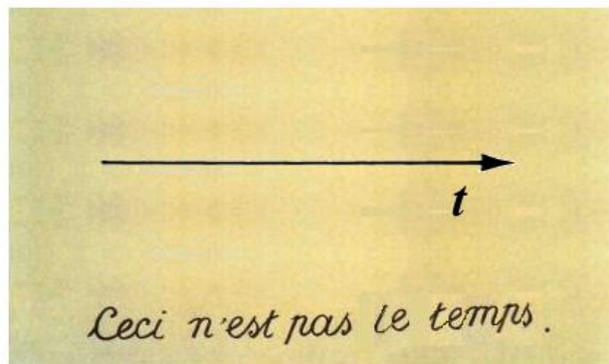


FIGURE 7. *Ceci n'est pas le temps* [image numérique] (ma production). Cette image est un détournement de l'oeuvre très célèbre *La Trahison des images* (1929) de René Magritte.

La réflexion sur les sciences en tant que pratiques sociales a beaucoup évolué depuis la parution de *La structure des révolutions scientifiques* de Thomas Kuhn en 1962, ouvrage qui, paradoxalement, a rendu paradigmatique l'aspect contextuel des savoirs scientifiques. Des historien·ne·s, sociologues, philosophe·sse·s, ethnographes et sémioticien·ne·s se sont intéressé·e·s et s'intéressent encore aujourd'hui aux pratiques scientifiques (méthodologies, processus de reconnaissance et de validation par les pairs, culture organisationnelle, etc.), aux productions (représentations, discours, publications, instrumentation, etc.) ainsi qu'aux producteur·rice·s (image et éthique des scientifiques). Ces éléments entretiennent des liens étroits entre eux et sont parfois indissociables (Daston et Galison, 2007). Les contributions qui suivent constituent des exemples classiques de ce genre d'étude. Elles diffèrent sur une variété d'aspects, mais partagent toutes une sensibilité pour la dimension sociale des sciences.

Karin Knorr-Cetina s'est intéressée à la façon dont les « sélections » récurrentes effectuées par les scientifiques, qu'elle désigne comme « raisonneurs pragmatiques », structurent le processus de « fabrication » (1981, p. 3) des faits scientifiques, puis aux distinctions entre les différentes cultures épistémiques (1999) qui caractérisent les disciplines scientifiques. Sandra Harding (1991) a critiqué l'objectivité scientifique en identifiant le caractère genré de certaines pratiques en science et a développé le concept d'objectivité forte (*strong objectivity*) pour envisager une épistémologie féministe. En tant que pratique axée sur la production du savoir, la physique n'échappe pas à cette dimension sociale ; elle investit le monde avec une perspective qui lui est propre. La valorisation d'une forme de pragmatisme (Pickering, 1989), d'esthétisme (Pickering, 1984), le souci de la répliquabilité ou encore l'expérimentation pour ancrer le savoir dans *le monde réel* (Franklin et Perovic, 2016) ne sont que quelques exemples d'idéaux, ou « vertus épistémiques » (Daston et Galison, 2017, p. 58), qui structurent la pratique en question.

La notion de représentation, absolument centrale en physique, mais aussi dans les autres sciences naturelles (pour ne pas dire également en art ou en communication), se présente comme un thème des plus pertinents pour interroger le corpus de connaissance de la discipline. Comme abordé précédemment, les constructions de la physique sont des théories, modèles et modélisations qui s'inscrivent dans des processus de médiations picturales, linguistiques et mathématiques qui portent sur les phénomènes naturels. On les utilise autant pour décrire, que pour expliquer, et potentiellement prédire. La tension qui existe en physique concernant la valeur épistémique du visuel est justement un thème de choix pour comprendre comment cette discipline représente son savoir. J'aborde ici cette tension par l'entremise de l'étude d'un concept fondamental en physique, soit le temps objectif. À travers l'analyse des représentations visuelles du temps objectif on se demandera : comment les images représentent-elles le temps comme on le comprend en physique ? Les images scientifiques mobilisent des registres visuels variés et peuvent ainsi être associées à différents genres visuels, en plus de présenter des différences significatives au niveau de leur apparence (plus ou moins réaliste, plus ou moins schématique, etc.), leurs moyens de production et leur contenu. D'un point de vue communicationnel, la variété des termes employés pour parler des images est aussi intéressante que celle des images elle-même. Les noms employés pour catégoriser ces images, les qualificatifs utilisés pour les décrire et, plus généralement, le discours associé au visuel, fait ici l'objet d'une attention particulière et fait partie de ce que je référerai par la suite comme étant le « texte ».

Afin de circonscrire cette étude, j'ai donc ciblé un seul concept, celui du temps. Comme l'espace et la matière, le temps a une valeur particulière en physique. La physique a comme objectif principal de comprendre la nature qui l'entoure en proposant des représentations

les plus *simples* et objectives possibles. Les concepts d'espace, de temps, de matière et d'énergie sont les concepts fondamentaux à la base de ces théories. Plus important encore pour le présent projet : les caractères contesté et abstrait du temps le rendent particulièrement intéressant dans le cadre d'une étude des images. D'une part, son côté *contesté*, incarné par la pluralité de ses conceptualisations au cours de l'histoire et qui cohabitent encore au sein de la physique contemporaine, offre un large spectre de représentations à analyser. Qui plus est, son immatérialité en fait un sujet de choix dans la mesure où je m'intéresse aux façons dont le visuel *matérialise* le savoir. Le temps n'est pas seulement abstrait, il entretient une relation particulière avec les images puisque celles-ci sont pensées comme étant *atemporelles*. Elles exploitent en effet principalement l'espace, c'est-à-dire les dimensions spatiales (deux ou trois) pour représenter des idées ou des objets (Saouter, 2000).

La présente étude se situe à l'intersection de deux disciplines, et surtout, de deux visions du monde. J'ai abordé précédemment le fait que certaines disciplines académiques présupposent un certain constructivisme épistémologique, alors qu'en physique et dans les sciences naturelles plus généralement, on se positionne davantage pour un réalisme, ou positivisme des connaissances. Sans postuler sur l'existence ou non d'une réalité indépendante des représentations produites (et ainsi trancher entre l'une ou l'autre des épistémologies), je considère que l'étude des productions scientifiques comme celles d'une entreprise sociale influencée, sans être strictement déterminée, par son contexte sociohistorique est d'une grande pertinence. Ceci n'empêche pas cependant de soutenir l'idée que les sciences puissent produire de l'information tout à fait fiable sur le monde empirique. Ainsi, il est important ici de distinguer les termes « objectivité » et « rationalité » : dire que l'objectivité scientifique est une construction sociale ne signifie pas que la pratique n'est pas rationnelle (Knorr-Cetina, 2003). Finalement, cette recherche a simplement comme visée de lever une partie du voile qui couvre les mécanismes de représentation du savoir en physique, ainsi que d'explorer les méthodologies possibles pour mieux les comprendre.

Chapitre 3

MÉTHODOLOGIE

Pour répondre à ces questions et explorer comment les images contribuent à la représentation du savoir dans les dispositifs de médiation que sont les manuels de physique, j'ai combiné deux approches méthodologiques : une analyse d'images et de textes ainsi qu'une démarche de recherche-crédation (RC). Dans un premier temps, j'ai analysé le contenu et la forme d'un corpus composé d'une sélection d'images et de textes pour répondre à deux questions sur les images, soit de quels *types* s'agit-il et quelles *fonctions* remplissent-elles. Dans un deuxième temps, j'ai entrepris un travail de visualisation pour explorer les thèmes émergents de l'analyse. Cette deuxième partie s'intègre dans une démarche de RC ou, plus précisément, de « création en tant que recherche » (*creation as research*) selon Chapman et Sawchuk (2012, p. 19). Les grandes étapes qui ont permis de mener à terme ce projet font l'objet des sous-sections suivantes.

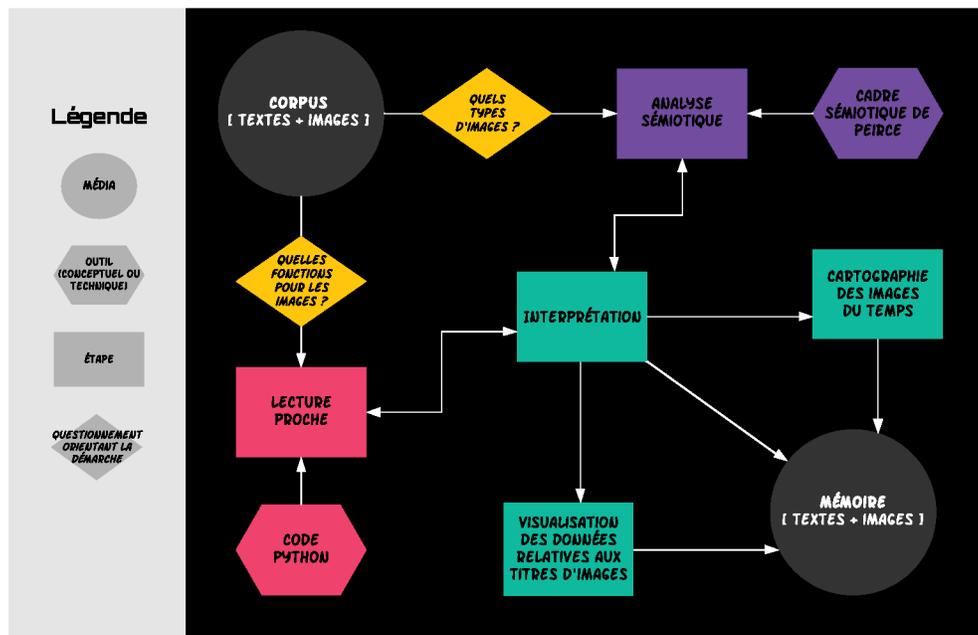


FIGURE 8. Schéma du processus méthodologique (ma production).

3.1. Définition du corpus pour l'analyse

Comme il a été abordé dans la section 2.1, il existe différentes compréhensions du temps en physique. Les mécaniques classique et quantique, les Relativités restreinte et générale, la QFT et la thermodynamique incarnent toutes des compréhensions particulières pour ce concept. Parallèlement, elles offrent des représentations diverses. On peut trouver des manuels de référence pour chacune de ces théories – ouvrages qu'il serait convenu d'appeler « paradigmes de construction » (Masterman, 1970, p. 65). Les manuels sélectionnés sont énumérés dans le Tableau 1 et, pour simplifier la lecture de ce mémoire, sont appelés par le nom du premier auteur dans le reste de ce travail. Goldstein, Sakurai, Taylor, Bjorken, Misner, Callen et Shroeder seront donc à l'étude. Ces manuels sont valorisés par la communauté physicienne, qui considère qu'ils contiennent les éléments essentiels pour une bonne compréhension de la théorie et qu'ils les présentent *bien*¹. À tout le moins, ils sauront former la relève en leur fournissant « des bases pratiques et épistémiques de la recherche future » (Anderson et Dietrich, 2012, p. 3).

3.2. Analyse du corpus

J'ai analysé le contenu et la forme d'un corpus d'images et de textes issus des huit manuels classiques de physique sélectionnés. Plus précisément, ce corpus est constitué de 323 images sur le temps, de leur titre respectif et d'une cinquantaine de passages de textes référant à ces images ou aux images en général (des passages de textes et certaines images du corpus se trouvent dans l'Annexe B). J'ai d'abord analysé sémiotiquement puis classé les images du temps répertoriées selon la catégorisation des signes peircéenne, en portant une attention particulière à leur rapport à l'objet représenté. Les concepts d'indice, d'icône et de symbole (développés dans la section 2.3) ont joué le rôle d'opérateurs dans la formulation d'une réflexion sur les modalités de représentation de ces images. Une lecture proche des titres et des passages de texte référant aux images a ensuite permis de comprendre la place, la valeur et les fonctions de celles-ci, à travers les relations qu'elles entretiennent avec le texte notamment. Pour ce faire, j'ai interrogé le vocabulaire utilisé par les auteurs pour nommer, décrire et expliquer la pertinence de leurs images au sein du manuel.

Une analyse sémiotique implique que j'ai considéré les images comme des *signes visuels*, et que j'ai tenté de comprendre *comment* elles signifient. Les manuels à l'étude participent à une situation de communication spécifique : la transmission des savoirs issus d'une discipline scientifique vers sa relève. Ce faisant, leur contenu est hautement formalisé. En effet, ce contenu est fondé sur des lois et repose sur des conventions de la discipline, ce qui

1. Cette hypothèse n'est pas basée sur une étude de l'appréciation des utilisateur·rice·s, mais sur le simple constat de l'omniprésence de ces manuels dans les syllabus universitaires occidentaux. Il ne vise en aucun cas à refléter l'opinion des enseignant·e·s de physique et encore moins celui des étudiant·e·s.

Temps classique	Mécanique classique	Classical Mechanics (Goldstein, 2001)
	Mécanique quantique	Modern Quantum Mechanics (Sakurai, 1994)
Temps relatif	Relativité restreinte	Spacetime physics (Taylor et Wheeler, 1992)
	Théorie quantique des champs	Relativistic Quantum Mechanics (Bjorken et Drell, 1964)
Temps émergent	Relativité générale	Gravitation (Misner, Thorne et Wheeler, 1973) Gravity (Hartle, 2003)
Temps orienté	Thermodynamique	Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics (Callen, 1985) An Introduction to Thermal Physics (Schroeder, 2000)

TABLE 1. Liste des manuels de physique sélectionnés

correspond à la définition de légisigne. Il est reçu comme un ensemble de *signes de loi* au sens percéen, ce qui correspond à la définition d'argument. Au stade de leur apparition dans les manuels, les images à l'étude peuvent donc être qualifiées de légisignes et d'arguments. Ce qui suit porte sur la façon dont les manuels présentent les images à travers le texte, celui-ci intervenant non seulement dans la relation de l'image à son objet mais aussi dans celle de l'image à son interprétant. Cependant, pour comprendre les images au-delà du contexte de transmission des savoirs, et comprendre notamment le processus qui les amène à *devenir* preuves ou arguments — car ces statuts évoluent — on ne peut se limiter à l'étude des manuels en soi. On trouvera plutôt des éléments nécessaires à cette analyse dans les pratiques de fabrication et de publication de ces images². Toutefois, cette investigation qui permettrait de saisir les relations qu'entretiennent les représentations avec elles-mêmes ainsi qu'à leur interprétant dépasse la portée de cette étude, qui s'adresse à des sciences en

2. Voir à cet effet les travaux de Catherine Allamel-Raffin (2006) ou ceux de Maria Dondero (2016).

train de se faire (« *science in the making* ») plutôt que déjà faite (« *ready made science* ») (Latour, 1987, p. 4). Dans cette partie, je me suis donc concentrée uniquement sur la deuxième et plus connue des trichotomies de Peirce : la relation des images à leur objet. Il s'agit du régime de validité dans lequel peuvent s'inscrire les thèses soutenues dans ce travail.

Pour comprendre les *fonctions* des images au sein des manuels, j'ai procédé à une comparaison image-texte. Pour ce faire, le corpus de textes et d'images a fait l'objet d'une lecture proche (*close reading*) (De Castilla, 2017), orientée par un questionnement sur la place de l'image relativement au texte. Comment parle-t-on des images à travers le texte ? Y a-t-il des termes récurrents pour qualifier ces images ? L'image est-elle redondante au texte ou complémentaire à celui-ci ? Les fonctions de l'image dont il est question ici sont à distinguer des procédés sémiotiques via lesquels l'image représente son objet. Ces derniers, intimement liés à ce qu'on a appelé ici « type » de représentation, ont fait l'objet de la sous-section précédente (§ 1.3). Ici nous voulons plutôt réfléchir à la façon dont on comprend et mobilise ces images comme signes, et c'est la troisième trichotomie de Pierce — la relation entre la représentation et l'interprétant — qui est la plus pertinente pour l'analyse (bien que nous ne prétendons pas en explorer toute l'étendue). Ceci transparait notamment dans les *rôles* qu'on accorde, ou *dit* accorder, aux images dans le support d'enseignement. Dans cette partie du travail, l'attention est donc dirigée vers le discours textuel sur l'image plutôt que sur l'image elle-même. Concrètement, je regarde par exemple si l'image soutient un argument précis, simplifie un concept ou encore facilite un calcul.

Considérant le nombre relativement élevé des éléments constituant le corpus, l'automatisation de certaines étapes d'analyse s'est avérée très utile, voire nécessaire. La caractérisation des titres d'images, en particulier, a été facilitée par un court programme Python que j'ai développé pour ce travail (voir l'Annexe C pour le code en question). Plus précisément, ce dernier évalue, à partir de l'information textuelle donnée (fichiers textes contenant une liste de titres) : le nombre de titres sélectionnés pour chaque manuel, leur taille (en nombre de caractères) et surtout, la présence ou non de certains vocables de l'image tels que « *chart* », « *graph* », « *plot* » ou encore « *schema* ». La recherche de mots clés est d'autant plus utile que la taille de ces 323 titres descriptifs peut aller jusqu'à 295 mots. Certains titres d'images réfèrent à l'image elle-même (en tant que photographie, diagramme ou dessin, par exemple), en plus de ce qu'elle représente. D'autres n'abordent que l'objet représenté par l'image, sans aucune référence à la représentation en soi. Le code a permis de quantifier le ratio d'images dont le titre aborde la forme de la représentation comparativement à celles qui sont présentées directement comme étant leur objet. Dans le premier cas, au moins un vocable de l'image a été mobilisé dans le titre, alors que dans le deuxième cas aucun n'est présent. Le code identifie également les

images pour lesquelles des qualificatifs visuels redondants ou contradictoires ont été attribués.

3.3. Visualisation

Le travail d'interprétation des résultats d'analyse des images du corpus et leurs textes accompagnateurs inclut une approche créative, ce que Chapman et Sawchuk (2012, p. 19) qualifient de « création en tant que recherche » dans leur texte fondateur. Plus précisément :

« Il s'agit de comprendre les technologies/médias/pratiques dont nous discutons en tant que spécialistes de la communication (par exemple) en déployant réellement ces phénomènes et en les poussant dans des directions créatives. Il s'agit d'une forme d'exploration dirigée à travers des processus créatifs qui incluent l'expérimentation, mais aussi l'analyse, la critique et un engagement profond avec la théorie et les questions de méthode. (2012, p. 19, ma traduction) »

Pour suivre la logique de ce travail, j'ai conçu du matériel visuel à partir de l'information émergente de l'analyse, et a permis, ce faisant, une analyse plus profonde de celle-ci. Ces productions constituent la « composante esthétique expérimentale » (Chapman et Sawchuk, 2012, p. 6) du projet. Elles organisent, synthétisent ou mettent en lumière les éléments centraux qui ont émergé de l'analyse sémiotique des images et de la lecture proche des textes afin de réaliser un portrait organisé et créatif de l'intervention des différents types et différentes fonctions des images dans la représentation du savoir sur le temps en physique. Il s'agit donc d'une deuxième forme d'exploration des modalités visuelles, celle-ci à travers une pratique qui se veut créative. Un argument central dans ce travail est que le visuel produit le savoir d'une façon qui lui est propre, donc différemment que le fait le langage textuel, par exemple. Entre autres, les images peuvent être utilisées pour communiquer de manière plus holistique : alors que les mots suivent un trajet linéaire, le visuel se présente comme un tout, simultanément, « sur le plan relationnel et non séquentiel » (Sousanis, 2015, p. 58). La production d'images pour penser les types et les fonctions des images du temps se présente ainsi comme une méthode tout indiquée pour exprimer – et incarner – cet argument. Si un des objectifs de cette recherche est de mieux comprendre les images à travers leurs relations avec les mots, la visualisation de cette dynamique relationnelle de manière non-linéaire permet une mise en valeur des avantages de l'image sur le plan représentationnel.

L'engagement dans une forme d'expression plus poétique et évocatrice que celle qui caractérise la recherche académique traditionnelle, qui se présente à elle comme une « intervention épistémologique » (Chapman et Sawchuk, 2012, p. 6) critique, est une dimension importante

du projet. C'est dans cette mesure qu'il s'inscrit dans une démarche de RC. Je questionnerai avant tout les représentations du savoir issues d'une discipline scientifique, mais aussi, par la forme de ce travail notamment, celle du discours argumentatif associé au genre académique traditionnel plus généralement : il s'agit d'« un engagement avec la question ontologique de ce qui constitue la recherche afin de faire de la place pour du matériel créatif et des résultats de recherche axés sur les processus » (Chapman et Sawchuk, 2015, p. 49). Le processus en question est ici le travail de représentation : il est à l'étude et il est mobilisé dans la recherche.

L'analyse sémiotique des images du corpus a permis de caractériser le lien qui unit ces représentations à leur objet. Ce sont ces renseignements obtenus qui m'ont guidé pour créer un ordre au sein de ce large ensemble d'images, soit celui des images du temps objectif des manuels de physique. Ceci s'est ainsi traduit en un travail de catégorisation³. Sur la base des résultats de l'analyse sémiotique, j'ai donc construit des catégories pour organiser ces images, catégories qui n'existaient pas au préalable puisque l'attention ne s'était pas portée sur elles auparavant, du moins pas en tant qu'un ensemble qui pouvait être interrogé par les outils de la sémiotique visuelle. Dans cet ordre d'idée, l'image conçue pour bien rendre compte de ce travail de classification est une carte : « un réseau graphique ordonné » (Bertin, 1983, p. 285).

L'image produite en parallèle à la lecture proche des textes prend racine dans une tentative de visualisation des données, assumée comme un acte d'interprétation et non de simple présentation. Elle réfère à une partie des constats construits mais aussi des résultats intermédiaires, afin de mettre en valeur non seulement l'aboutissement de l'analyse mais le processus de recherche lui-même. Il ne sera pas question ici de la valeur de l'esthétisme dans la représentation visuelle des données et de son effet sur la perception de celles-ci⁴. On s'intéresse plutôt à ce que l'image peut apporter, comparativement à d'autres formes de représentation de l'information.

3.4. Prolongement possible : exposition

Les créations produites dans le cadre de ce projet de RC ouvrent la porte à un tout autre travail, celui de leur diffusion. Afin d'intégrer certains autres de mes intérêts tels que celui de la vulgarisation scientifique, l'objectif ultime de cette recherche serait une exposition sur ces

3. Le travail de catégorisation, selon Geoffrey C. Bowker et Susan Leigh Star (2000), constitue en la création d'un ensemble de boîtes (métaphoriques ou littérales) à l'intérieur desquelles les choses peuvent être mises pour faire un travail bureaucratique ou de production de connaissances. Le système de classification idéal aura les propriétés suivantes : 1) les principes de classification sont cohérents et uniques, 2) les catégories s'excluent mutuellement, et 3) le système est complet.

4. Se référer à *Data visualization as creative art practice* (Li, 2018) pour un bref survol de cet enjeu dans la littérature ou "*Facts*" – *and Representational Acts* (Kyndrup, 2018) pour une réflexion critique de la notion de « valeur de l'esthétique » dans le contexte de la représentation scientifique.

créations et le contexte de leur production. Cette exposition permettrait notamment la création d'un espace de dialogue entre le milieu scientifique et des milieux non-scientifique. Les images se prêtent particulièrement bien à l'exercice, celles-ci possédant le potentiel d'améliorer la « compréhension empathique » et la « généralisabilité », en plus d'être plus accessibles que la plupart des discours académiques (Weber, 2012, p.7). Une idée importante derrière l'exposition serait d'amener l'auditoire à se questionner sur la nature des sciences : si les sciences sont des pratiques sociales et que leurs productions — ici des images de concepts et de théories — sont des artefacts, alors pourquoi ne pas présenter ces productions comme le résultat de pratiques créatives ?

Chapitre 4

ANALYSE ET RÉSULTATS

4.1. Les types d'images

Les images à l'étude réfèrent toutes au temps objectif, mais le font plus ou moins directement. En effet, certaines d'entre elles portent sur (1) le temps spécifiquement, (2) une de ses caractéristiques ou encore (3) sur un ou plusieurs concepts autres, en laissant transparaître néanmoins une certaine compréhension du temps. En ce sens, les représentations visuelles qui évoquent le temps de la façon la plus **directe** sont les diagrammes d'espace-temps *vide*, c'est-à-dire qui présentent le diagramme pour lui-même et non ce qui peut se passer à *l'intérieur* de ce diagramme, qu'on retrouve uniquement en Relativité¹. En contraste, beaucoup d'images en physique incluent un élément identifiable comme étant le temps objectif, sans que celui-ci y joue le rôle principal; ce sont des représentations visuelles **indirectes**. Pensons à tous les graphiques à deux ou trois axes dont l'un d'entre eux correspond au temps et qui présentent la dynamique d'une variable quelconque. Dans ces images, un élément visuel représente effectivement le temps, mais l'image vise plutôt à montrer l'évolution d'une ou plusieurs autres quantités *dans le temps*. D'autres images sont empreintes d'une compréhension du temps, sans qu'il puisse y être identifiable précisément via un élément visuel explicite. C'est le cas des images appartenant aux types « situation temporelle », « trace » et « trajectoire » (Tableau 2). Le titre attribué à l'image peut aider à cerner l'objet qu'on a représenté dans l'espace pictural (EP)², mais comme nous verrons

1. La notion de temps est omniprésente dans les autres théories de la physique, mais aucune section des manuels à l'étude qui les traitent ne porte spécifiquement sur ce sujet. En effet, le problème du temps est généralement relégué à la philosophie, puisqu'il ne pourrait être résolu grâce aux outils de la physique. Bien que ce concept soit absolument central en thermodynamique, par exemple, et ceci transparaît dès la deuxième page de Schroeder (2000) où on définit la température (concept de base de la théorie) via son rapport au temps, on propose de prendre le temps tel qu'on le conçoit intuitivement et d'en faire un usage pragmatique uniquement.

2. L'espace pictural, ou espace de la représentation, est l'espace *réel* alloué à l'image. Il se situe dans les limites définies par un cadre, visuellement explicites ou non — pensons par exemple aux bordures de la toile pour la peinture ou aux cases d'une bande dessinée. Il s'oppose à l'espace diégétique, ou espace représenté, qui correspond plutôt au « continuum spatial nécessaire à l'accomplissement complet des (...) événements qui constituent le récit » (Saouter, 2000, p. 163).

par la suite, il n'est pas toujours suffisant. Évidemment, la polysémie de l'image³ peut occasionner différentes interprétations sur ce point et je me suis fiée en partie à ma propre expertise⁴ pour statuer quelles images, ou éléments d'image, portent sur le temps ou ses caractères.

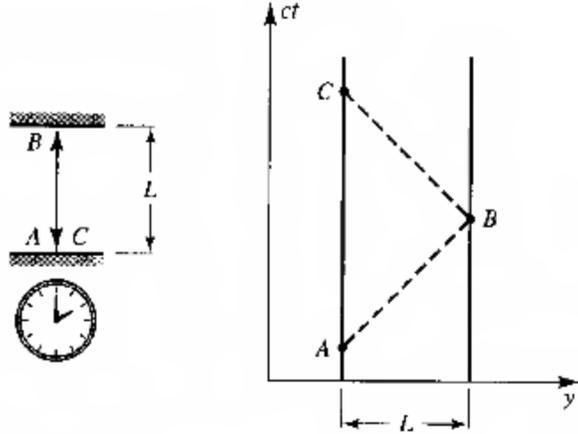
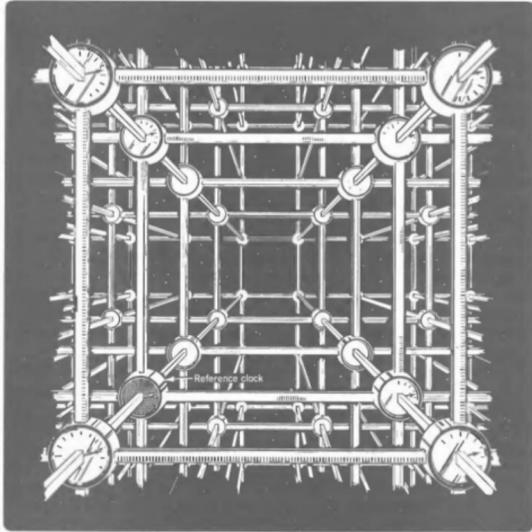
Le Tableau 2 fait l'inventaire des types d'images répertoriées en opérant une classification basée sur la relation plus ou moins directe de celles-ci avec le temps objectif. Ce tableau est le résultat d'une lecture attentive de l'ensemble des images du corpus, guidée par le questionnement : quel lien à faire avec le temps ? Six types d'images y sont identifiés, selon le **lien qu'elles entretiennent avec le temps**, et la **façon dont elles procèdent** (sémiotiquement) pour ce faire.

Pour mieux comprendre la Figure 9 et les descriptions des catégories proposées tout particulièrement, effectuons quelques clarifications terminologiques supplémentaires. Que veut-on dire par lien « implicite » avec le temps ? Simplement que ce dernier ne peut pas être associé à un élément visuel clairement identifiable dans l'image. Ce n'est pas la lettre « t », une flèche ou un symbole de ce genre qui permet de faire le lien entre elle et le temps. Autrement dit, le temps n'est pas représenté de façon *visuellement* explicite. Ensuite, qu'entend-on par figure « abstraite » ? On veut dire ici que la convention bien implantée voulant qu'une image corresponde à un instant donné (pensons à l'image photographique ici) n'est pas respectée. En effet, les images dont les plans constituant l'EP ne correspondent pas tous à des dimensions d'espace intègrent plusieurs temporalités, en arrimant par exemple le temps de lecture de l'image au temps de l'événement représenté.

3. Cette polysémie est tout de même moindre dans les diagrammes — le genre d'image le plus utilisé dans les manuels de physique — que dans les images moins formalisées comme les peintures par exemple (Bertin, 1983).

4. Les manuels à l'analyse font pour la plupart partie d'un cursus au baccalauréat en physique, formation que j'ai complétée avant d'entreprendre cette maîtrise individualisée en communication et physique.

Tableau X : Les types d'images répertoriées selon leur relation au temps.

TYPE D'IMAGE	DESCRIPTION ET EXEMPLES	IMAGES TIRÉES DES MANUELS
<p>Le pictogramme</p> <p><i>Image figurative stylisée et simplifiée</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Explicite - Figurative - Concrète 	<p>Les images d'horloges, de cadrans ou encore de sabliers représentent la <i>mesure</i> du temps objectif, ou plus justement de la durée. L'horloge étant l'outil par excellence pour effectuer cette tâche, les pictogrammes d'horloges sont omniprésents dans les manuels de Relativité. Les pictogrammes se présentent rarement seuls : ce sont plutôt des éléments d'images. Ils indiquent généralement un moment et/ou un endroit où la prise de mesure d'un intervalle de temps a été effectuée.</p> <p>La Figure 4.6 de Hartle contient, de gauche à droite, un schéma de montage pour une expérience fictive mettant en jeu une impulsion lumineuse et le diagramme d'espace-temps associé. Le montage est constitué de deux miroirs parallèles entre lesquels l'impulsion lumineuse rebondit, et une horloge qui permet de mesurer l'intervalle de temps entre le départ de celle-ci au point A et son retour au point C.</p> <p>La Figure 2-6 de Taylor présente l'espace-temps comme un réseau où chaque coordonnée peut être associée à un instant précis. Le quadrillage représentant le réseau est alors ponctué d'horloges, celles-ci nous apprenant que la mesure du temps nous indiquerait une valeur différente pour chaque « couche » du réseau.</p>	 <p><i>Source : Figure 4.6 de Hartle (2003, p. 111).</i></p>  <p><i>Source : Figure 2-6 de Taylor (1992, p. 37).</i></p>

La situation temporelle

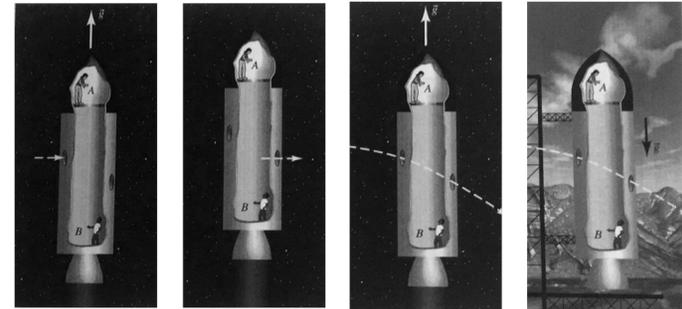
Image figurative relatant des événements de façon narrative

- Implicite
- Figurative
- Concrète

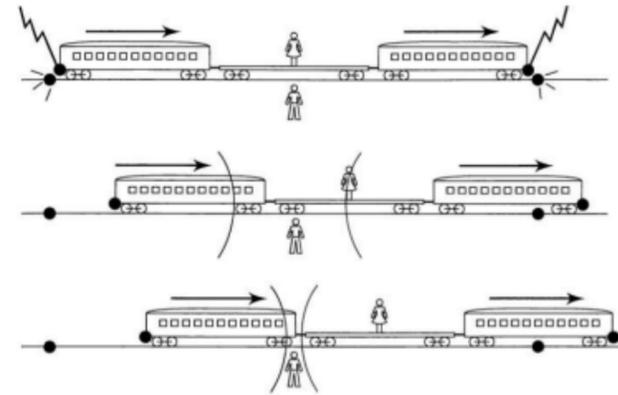
Les situations temporelles évoquent le temps sans qu'un élément visuel spécifique ne puisse y être associé. Elles illustrent, par une séquence d'images, une **situation lors de laquelle un effet ou un caractère du temps est notable**. L'image fait figurer une idée, un phénomène, en plus des entités matérielles qu'elle met en scène. Elle fonctionne comme une **explication narrative**.

La Figure 6.5 de Hartle montre un laboratoire-fusée traversé par un rayon lumineux. Il est, dans les trois premières *cases*, en accélération vers le haut dans le vide et, dans la dernière, au repos dans un champ gravitationnel uniforme. Cette situation temporelle illustre le principe d'équivalence, qui implique que la même observation doit être faite dans les deux scénarios, et plus précisément ici que la gravité attire la lumière. Ce principe a de conséquences profondes sur la définition du temps et de l'espace dans le contexte de la RG.

La Figure 3.1 de Taylor illustre, par la mise en situation de deux individus et d'un train en mouvement, une instance de la relativité de la simultanéité.



Source: Figure 6.5 de Hartle (2003, p. 114).



Source : Figure 3-1 de Taylor (1992, p. 63).

La trace

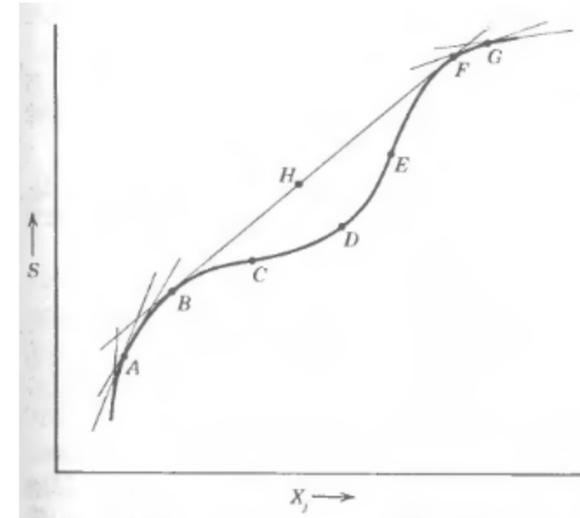
Graphique
traçant l'évolution
d'un phénomène

- Implicite
- Diagrammatique
- Abstraite

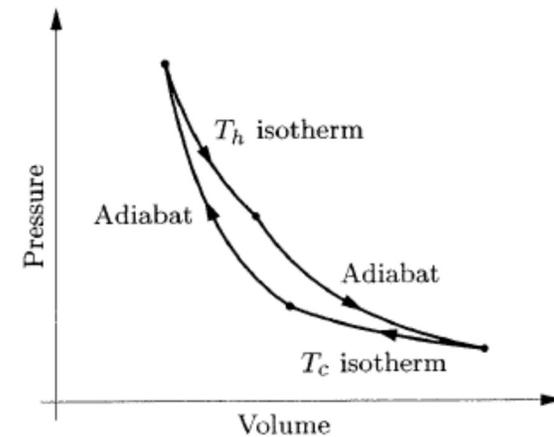
Les images de type « traces » évoquent aussi le temps sans qu'un élément visuel spécifique ne puisse y être associé. Elles présentent **le changement d'une quantité d'un état à un autre**. Une notion de temps est alors implicite; on doit suivre le tracé de la courbe pour *voir* le passage du temps se produire. Soit une hypothétique image *statique*, c'est-à-dire une capture visuelle unique où l'état d'un système y est présenté à un instant *précis*. On pourrait concevoir la trace comme une folioscopie (superposition rapide de captures visuelles) à partir de multiples images statiques. Autrement dit, la trace peut être comprise comme impliquant la **projection mentale de la dimension temporelle sur l'EP**.

La Figure 8.2 de Callen présente la fonction entropie d'un système thermodynamique, dans un contexte de recherche des conditions d'équilibre statique de ce système. L'équilibre statique est obtenu quand la dérivée seconde est négative, ce qui se traduit géométriquement par une courbe concave.

La Figure 4.3 de Schroeder indique la pression d'un système thermodynamique en fonction de son volume et trace ainsi l'évolution d'une transformation de ce système dans ces différentes conditions de pression et de volume.



Source : Figure 8.2 de Callen (1985, p. 205).



Source : Figure 4.3 de Schroeder (2000, p. 126).

La trajectoire

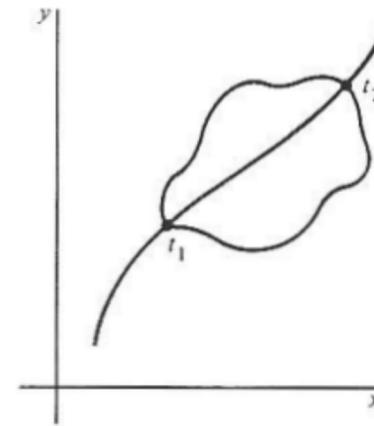
Graphique
traçant l'évolution
de la position
d'un objet dans
l'espace

- Implicite
- Diagrammatique
- Concrète

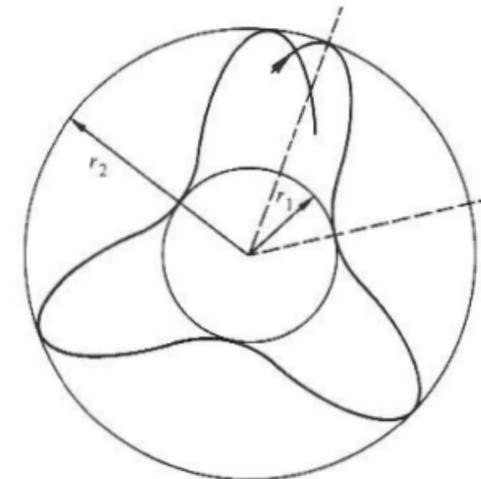
Sous-ensemble de la trace, la trajectoire inclut les images qui marquent le **changement de position** d'un objet dans l'espace. Le temps y est encore une fois **implicite**. Ces images sont plus intuitives que les autres traces, car l'EP représente l'espace physique. Comme la mécanique classique est une théorie du mouvement des corps dans l'espace, on retrouve un grand nombre de trajectoires dans les manuels qui la couvrent.

La figure 2.1 de Goldstein présente la trajectoire d'une particule ponctuelle en mettant en évidence deux points de cette trajectoire, qui correspondent à des instants distincts (t_1 et t_2).^{*} Cette image sert à illustrer le principe d'Hamilton (une sorte de principe de moindre action) qui permet d'évaluer par quel chemin, parmi tous les chemins possibles, le système se déplacera de sa position au temps t_1 à sa position au temps t_2 .^{*}

La Figure 3.7 de Goldstein trace l'évolution de la position dans l'espace d'un objet en orbite, comme si cet objet laissait une succession d'empreintes sur son chemin.



Source : Figure 2.1 de Goldstein (2001, p. 35).



Source : Figure 3.7 de Goldstein (2001, p. 80).

^{*} Dans le cadre de la mécanique classique, les trajectoires sont souvent tracées dans l'*espace de configuration*, lequel n'a pas nécessairement de lien avec l'espace physique en trois dimensions. Le chemin du mouvement dans cet espace n'aura donc pas nécessairement de ressemblance avec le chemin dans l'espace d'une particule réelle puisque chaque point du chemin en question représente la configuration complète du système pour un instant donné. On se limitera ici à la notion d'espace physique.

L'évolution

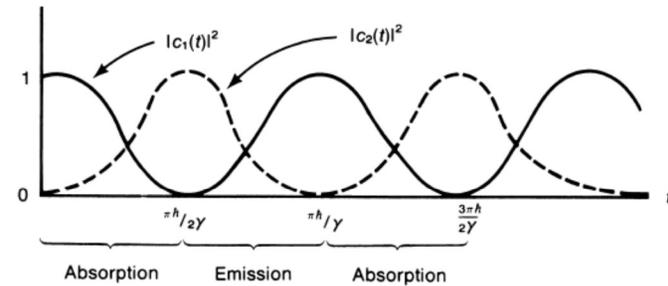
Graphique traçant l'évolution temporelle d'une quantité

- Explicite
- Diagrammatique
- Abstraite

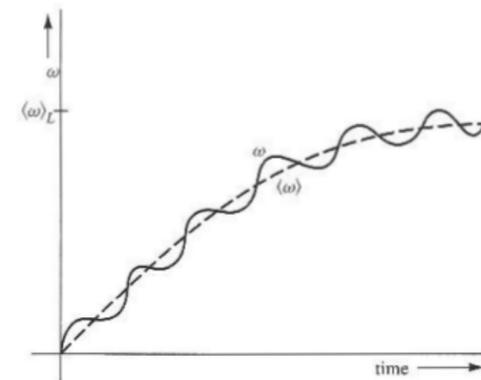
L'image de type « évolution » présente aussi le temps de façon indirecte, puisqu'on tente de montrer l'**évolution de quelque chose** et non l'évolution en soi. Le concept de temps y est cependant explicite, puisqu'il est incarné dans un élément visuel : l'**axe et la lettre t** (ou même le mot complet « temps », comme dans la Figure 6.7 de Goldstein). L'image est abstraite, car possiblement aucune dimension de l'EP n'est utilisée pour représenter l'espace physique : on peut s'intéresser à l'évolution de n'importe quelle autre quantité que la position dans l'espace.

La Figure 5.4 de Sakurai est la solution au problème d'un système à deux états avec un potentiel oscillant dépendant du temps. Le système transite entre deux états et son comportement fluctue entre absorption et émission. $|c_1(t)|^2$ et $|c_2(t)|^2$, les probabilités d'être dans l'état 1 et 2 respectivement, sont présentées en fonction du temps, quand le système est en résonance.

Le diagramme qui constitue la figure 6.7 de Goldstein montre la dépendance temporelle de la vitesse angulaire (ω) d'un pendule (pour un moment de force appliqué supérieur au moment de force critique).



Source : Figure 5.4 de Sakurai (1994, p. 321).



Source : Figure 6.7 de Goldstein (2001, p. 268).

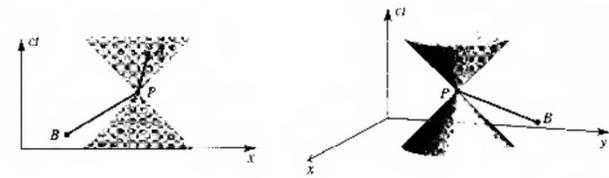
L'évolution espace-temps

Graphique traçant la variation temporelle de la position d'un objet dans l'espace

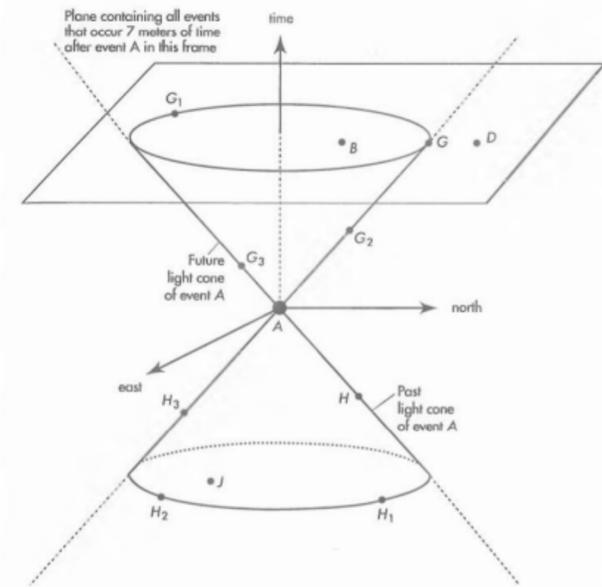
- Explicite
- Diagrammatique
- Plutôt abstraite

Sous-ensemble de l'évolution, l'évolution espace-temps** indique **un parcours dans l'espace-temps** et contient des éléments visuels explicites pour le temps : l'axe et la lettre **t**. Elle peut être moins intuitive que l'image de type « trace », car une dimension de l'EP (un plan de la page) est utilisée pour représenter le temps. En ce sens, elle s'éloigne du sens commun, qui associe une image à un instant et un endroit***. En effet, on peut comprendre l'évolution espace-temps comme étant bâti via une stratégie d'échange d'une dimension de temps pour une dimension d'espace. Au lieu d'utiliser le mécanisme de la projection mentale comme le fait l'image d'évolution, on identifie clairement que chaque strate de l'espace dans une direction correspond à un moment, et la longueur dans cette direction correspond maintenant à la durée.

Le cône de lumière construit dans les Figures 4.9 de Hartle et 6.4 de Taylor permet de distinguer les événements passés, futurs et inaccessibles d'un événement quelconque sur lequel il est centré. Le temps y incarne l'axe vertical. Comme on s'intéresse à la structure de l'espace-temps via ces images, on peut les qualifier de « directes ».



Source : Figure 4.9 de Hartle (2003, p. 59).



Source : Figure 6.4 de Taylor (1992, p. 181).

** Cette catégorie n'a pas été nommée « diagramme espace-temps » de façon volontaire puisque cette appellation est, en physique, synonyme de diagramme de Minkowski (la représentation de l'espace-temps qui donne justement lieu aux cônes de lumière, que l'on voit dans les images associées à cette catégorie), lequel n'est pas l'unique représentation visuelle dont il est question ici. Cette catégorie inclut plutôt tout diagramme dont l'un des axes représente l'espace physique et l'autre, le temps.

*** Ce sens commun est lié entre autres à notre expérience des photographies et de l'art figuratif qui établissent une équivalence entre une image et un moment spécifique (McCloud, 2007).

Une fois le Tableau 2 construit, trois formes de distinctions — concret/abstrait, explicite/implicite et graphique/figuratif — ont ressortis comme étant les outils de caractérisation nécessaires pour organiser les images du corpus. Autrement dit, un ordre a pu être établi au sein des images du temps. Il est devenu évident, au regard de ce constat, que le tableau n'est pas la forme la plus évocatrice pour témoigner de la richesse sémiotique de ces images. Une carte est plus adaptée à la situation : elle permet une vue d'ensemble sur les différents types en mettant à l'avant-plan leurs caractères distinctifs. Des descriptions détaillées ont été fournies dans le Tableau 2, c'est pourquoi l'image produite a été allégée de telles précisions — une image a plutôt été utilisée pour symboliser chaque catégorie. La cartographie se présente donc comme une option de représentation complémentaire au tableau. À cet effet, la Figure 9 est une carte qui situe les quatre types et deux sous-types d'images proposés selon trois formes de distinctions (elle se retrouve dans l'Annexe A en plus gros format).

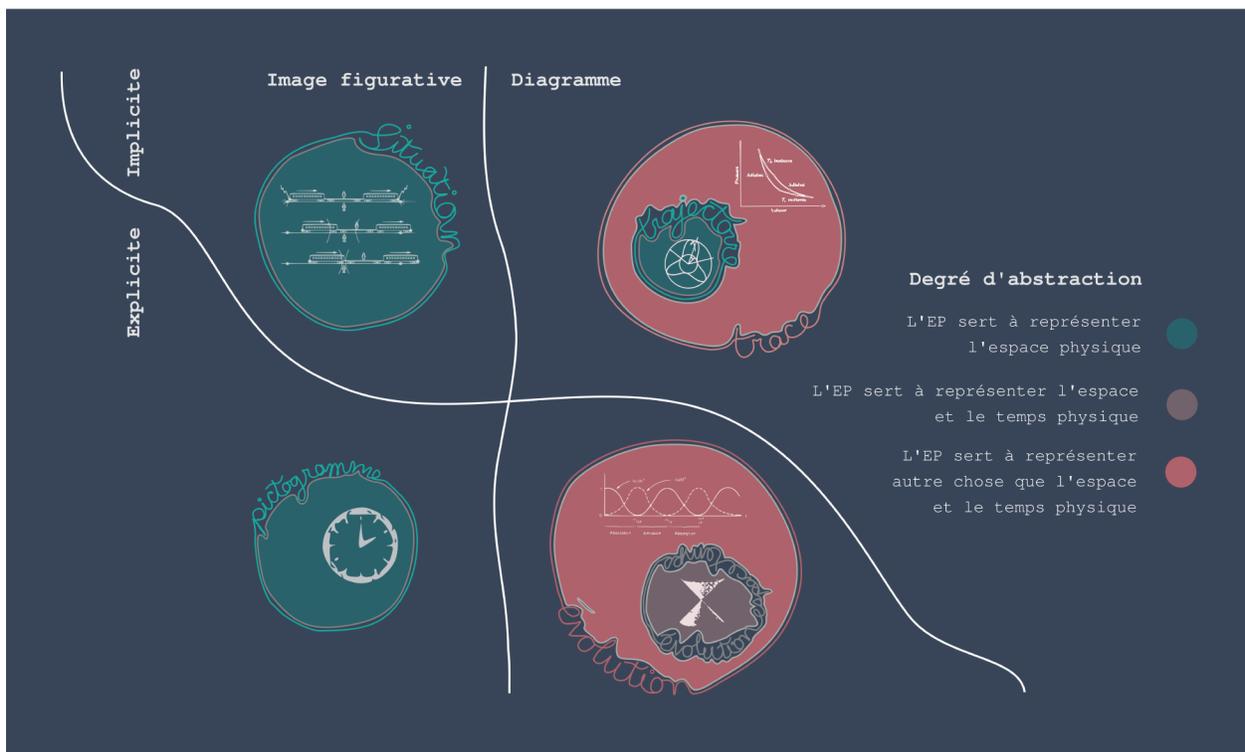


FIGURE 9. Carte des images du temps objectif issues de manuels de physique (ma production).

Les six types d'image proposés sont incarnés par des bulles asymétriques dans la Figure 9. Deux bulles se retrouvent à l'intérieur d'une autre bulle, car ce sont des sous-ensembles de ces autres catégories (Figure 10). Les quatre grandes bulles réfèrent à : la situation, la trace, le pictogramme et l'évolution. La trace inclut la bulle trajectoire et la bulle évolution inclut l'évolution espace-temps.



FIGURE 10. Gros plan sur les sous-catégories d’images « trajectoire » et « évolution espace-temps ».

Le nom des catégories d’images, dans un style manuscrit, participe à la délimitation de ces ensembles en prenant la place d’un segment du cercle qui les représente. Un exemple d’image pour chaque type a été placé dans les bulles. Les bulles sont positionnées dans un EP abstrait (où les plans de l’image ne peuvent pas être associés à des dimensions d’espace physique), selon qu’il s’agisse d’images figuratives ou diagrammatiques et selon qu’elles intègrent le temps objectif de façon implicite ou explicite. La première distinction se fait sur le plan horizontal et la seconde, sur le plan vertical. Des traits irrégulièrement sinueux et sans flèches aux extrémités ont été utilisés pour marquer une opposition avec les diagrammes bien droits et orientés des manuels de physique. La caractérisation proposée est qualitative et expérimentale, et c’est précisément ce que l’on veut laisser transparaître par l’absence de droiture. Les outils de caractérisation (soit les trois formes de distinctions développées précédemment) ne sont pas les indicateurs du degré d’adéquation des représentations du temps, mais des outils pour témoigner d’une richesse sémiotique dans la variété des images. Ils permettent d’instaurer un ordre au sein de celles-ci, mais pas une hiérarchie, et c’est ce que l’absence de flèche (et conséquemment de sens pour les axes) veut refléter. Au lieu de passer par un troisième plan (ou dimension de l’EP) pour instaurer une gradation du niveau d’abstraction des images, j’ai mobilisé une « variable rétinienne » (Bertin, 1983, p. 285), soit ici la couleur. La légende figurant dans la partie droite de l’image permet de comprendre le code de couleurs associé à cette gradation.

Confrontons maintenant les catégories proposées à celles de Peirce pour les relations représentation-représenté afin d’exposer plus clairement les mécanismes de représentation exécutés par les images du corpus. Dans le cadre de la sémiotique percéenne, les images

participent à une relation triadique qui construit la signification d'un signe donné (voir section 1.3 pour plus de détails sur la théorie). Les éléments clés de cette triade au regard de l'analyse proposée ici sont le représentamen et l'objet — l'image et le temps, respectivement. Peirce distingue trois types de relation que le représentamen peut entretenir avec son objet : iconique, indicielle et symbolique.

L'icône. Comme les images de livres sont des images immobiles — elles nécessitent deux dimensions de l'espace physique (matérialisée par la page) pour exister — peuvent-elles entretenir une relation de *ressemblance* avec leur sujet, ici le temps ? Une première difficulté est qu'on s'intéresse à un concept intangible et non un objet matériel. On doit donc se concentrer sur la notion de *temps objectif*, qui est précisément la compréhension du temps dans le contexte de la physique. Considérant qu'en physique, on définit le temps comme une dimension au même titre que l'espace (à un signe près), on peut voir une relation d'iconicité quand une dimension d'espace est mobilisée pour représenter le temps. En ce sens, tous les diagrammes de type « évolution » peuvent être compris comme des icônes. Aussi, bien qu'elles ne recourent pas au temps pour exister (contrairement à la musique, par exemple), elles y recourent minimalement pour être interprétées. Mais le temps de la lecture est le temps de l'expérience humaine, et non celui de la physique. Il y a des parallèles à faire entre les deux, évidemment : on pourrait chronométrer la durée d'exposition à l'image, et tenter d'effectuer un rapprochement avec la notion de temps mesuré, une facette du temps objectif. Mais rien ne nous dit que ce temps de lecture, qui vient de s'écouler, a quelque chose à voir avec celui du phénomène représenté dans l'image. L'image de type « évolution », qui fait appel précisément au temps de lecture pour être interprétée, peut ainsi être considérée comme iconique. Les « situations temporelles », pour leur part, fonctionnent avec une iconicité plus évidente : elles sont des figurations d'objets, et entretiennent donc avec ces objets des similarités dans le registre du visuel. Cependant, elles représentent des situations pertinentes pour comprendre des caractères du temps objectif, et non le temps lui-même, ce qui leur confère un statut d'images *indirectes* du temps.

L'indice. La notion même d'indice est associée à une certaine temporalité. En effet, l'indice montre une relation de cause à effet entre l'objet et la représentation. La notion de causalité, elle, réfère directement au temps. Les images mobilisées pour représenter le temps en physique ne peuvent être indicielles car elles sont faites de toute pièce par l'auteur. Ce ne sont pas des photographies (il y en a dans les manuels de physique, mais pas pour aborder le temps), ou n'importe quelle autre inscription agissant comme la trace de quelque chose. Alors que l'icône se rattache à l'objet par ressemblance, « un indice sera rattaché à un objet existentiellement en étant un effet, comme la fumée est un effet du feu et signifie par là l'existence d'un feu à l'endroit où celui-ci apparaît » (Tiercelin, 1993, p. 67). La souche de

bois, par exemple, peut être comprise comme l'indice de l'existence d'une durée. Dans cette mesure, qu'est-ce qui n'inscrit pas le temps ? Encore une fois, la subtilité ici est de voir quels signes sont les indices du temps *objectif*. Comme les théories de la physique (excluons ici les théories de l'inflation cosmique ou toute entreprise visant à comprendre les premiers instants de l'univers) ne portent pas sur des durées particulières, des laps de temps bien définis, mais bien le temps au sens d'une entité ou propriété de l'univers, il semble inutile d'en chercher une inscription. On s'intéresse aux *généralités* du temps, c'est-à-dire ce qui est invariant au regard du temps — ce qui peut paraître paradoxal si on pense le temps comme définissant l'ordre des choses.

Le symbole. « [U]n symbole est rattaché à son objet par une règle qui a pour effet de dire qu'il 'doit' être interprété comme signifiant cet objet » (Tiercelin, 1993, p. 67). Dans cet ordre d'idées, on peut affirmer que la lettre « t », ou le mot « temps », fonctionne dans les images du corpus de façon symbolique. L'axe apparaît à la fois comme un icône et un symbole. En effet, l'axe est composé de deux parties : la droite, et la flèche. La droite donne la direction et la flèche, le sens. La droite incarne la dimension temporelle en associant à chaque point de l'espace spatial (de la page) un instant, ce qui correspond à une relation d'iconicité, comme discuté précédemment. La flèche elle, est conventionnelle. Elle indique le sens de l'évolution via une règle bien établie : elle pointe dans le sens de l'augmentation de la quantité. Comme ces éléments visuels se retrouvent généralement dans les images de type « évolution », on peut dire qu'elles fonctionnent, au moins en partie, de façon symbolique. De la même façon, les pictogrammes d'horloge fonctionnent symboliquement pour indiquer la mesure des durées.

4.2. Les fonctions des images

Les identifiants de l'image et le vocabulaire du visuel

Dans les manuels, les auteurs discutent de leurs images avec de l'information textuelle : à travers les titres de figures et dans le texte directement. Bien qu'un vaste registre de termes soit alors invoqué pour identifier ces images, on peut constater qu'il n'y a pas de cohérence dans le système de nomenclature dans lequel ils s'inscrivent, s'il en est un. En effet, les identifiants recherchés dans les titres par le programme Python tels que « *chart* », « *diagram* », « *graph* », « *illustration* », « *picture* », « *plot* », « *schema* » et « *visualisation* », ne correspondent pas à des ensembles d'objets bien définis. On peut rapidement faire ce constat en comparant les entités ainsi qualifiées. Ces *catégories* d'images sont, pour le moins, imprécises. Il y a parfois des redondances dans les qualificatifs utilisés pour caractériser la figure (par exemple : « *schematic diagram* »), ce qui rend la catégorie d'autant plus floue. Qui plus est, les termes « *schematically* », « *graphically* » et « *pictorially* » sont utilisés de

façon totalement interchangeable. Les deux derniers termes ont pourtant des significations différentes dans le cadre de la sémiotique (comme traité dans la section 1.3), mais aussi, généralement, dans le langage courant. Les termes choisis vont d'ailleurs souvent à l'encontre du sens commun qui leur sont attribués — celui du dictionnaire, notamment. Il n'est pas rare, par exemple, que ce qu'il est d'usage d'appeler « dessin » soit qualifié de « picture » (Taylor et Wheeler, 1992, p. 280), alors que ce qu'on appelle normalement « schéma » soit également appelé « picture » (Misner et al., 1973, p. 109). Ce n'est pas seulement qu'il n'y a pas consensus chez les auteurs, mais qu'à l'intérieur d'un même ouvrage, les noms donnés aux images ne respectent pas un système de nomenclature donné. Un exemple provenant de Sakurai (1994, p. 321) est la Figure 5.4 qui, dans le titre, est successivement appelée « *plot* » puis « *graph* ». L'appellation « *plot* » est habituellement réservée à des graphiques de données (valeurs numériques) alors qu'il s'agit ici d'un graphique de fonctions mathématiques. Un autre exemple pertinent à cet égard : une même image se retrouve dans deux manuels (voir Figure 6). La première phrase des titres, qui porte sur l'objet de la représentation (« *the worldlines that fill up spacetime* ») et une allégorie utilisée pour l'illustrer (« *crossing straws in a barn full of hay* »), est identique chez les deux auteurs. L'association des différents éléments constituant l'image à leur objet respectif est aussi faite de la même façon, à quelques qualificatifs négligeables près. Par contre, quand vient le temps de traiter l'image, il y a divergence. Le début de la dernière phrase, lequel mentionne de quel type d'image il s'agit, diffère : Misner (1973, p. 6) qualifie la représentation de « *diagram* » alors que Taylor (1992, p. 161) l'associe à une « *map* ».

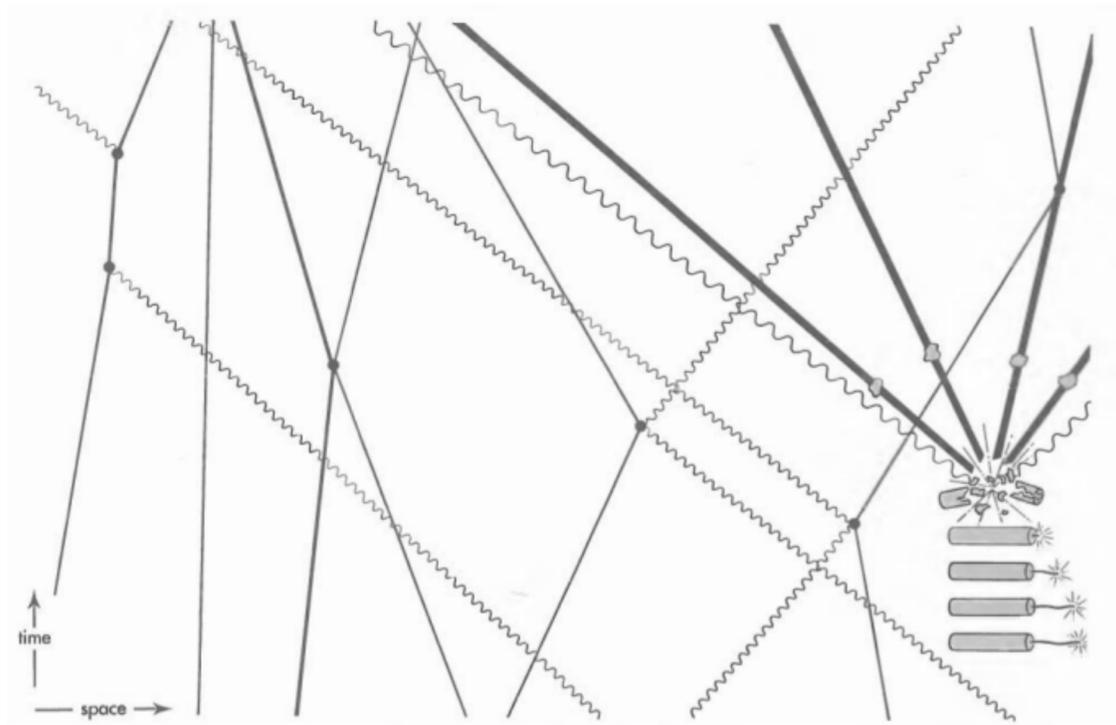


FIGURE 11. *Schéma de lignes d'univers remplissant l'espace-temps.* Cette même image apparaît dans deux manuels à l'étude : Misner (1973) et Taylor (1992).

Titre 1 :

Figure 1.2 The crossing of straws in a barn full of hay is a symbol for the world lines that fill up spacetime. By their crossings and bends, these world lines mark events with a uniqueness beyond all need of coordinate systems or coordinates. Typical events symbolized in the diagram, from left to right (black dots), are : absorption of a photon ; reemission of a photon ; collision between a particle and a particle ; collision between a photon and a particle ; another collision between a photon and a particle ; explosion of a firecracker ; and collision of a particle from outside with one of the fragments of that firecracker. Source : Figure 1.2 de Misner (1973, p. 6).

Titre 2 :

Figure 5-13 The crossing of straws in a barn full of hay is a symbol for the worldlines that fill up spacetime. By their crossings and jogs, these worldlines mark events with a uniqueness beyond all need of reference frames. Straight worldlines track particles with mass ; wiggly worldlines trace photons. Typical events symbolized in the map (black dots) from left to right : absorption of a photon ; reemission of a photon ; collision between a particle and a particle ; collision between a photon and another particle ; another collision between a photon and a particle ; explosion of a firecracker ; collision of a particle from outside with one of the fragments of that firecracker. Source : Figure 5-13 de Taylor (1992, p. 161).

Malgré cette diversité de noms pour les images, celles-ci sont toutes identifiées (pour celles qui le sont, soit la majorité) comme des « Figures ». En effet, comme le veut la convention de présentation des images dans les textes scientifiques (APA, 1952) — convention respectée dans le cadre de ce travail, d’ailleurs —, celles-ci sont munies d’un titre, commençant par « Figure », suivi d’un numéro lié à son ordre d’apparition dans la publication, puis de sa description. On verra que cette dernière prescription, contrairement aux deux premières, n’est pas toujours respectée dans les manuels de physique. C’est grâce à ces normes que l’on peut référer efficacement à la « Figure 2 », par exemple. Ceci étant, on présente un diagramme comme on présente une photographie : ce sont des *figures* au même titre. Deux types d’outils visuels de représentation sont identifiés dans cette logique, soit le tableau et toute autre illustration qui n’est pas un tableau (APA, 1952). Dans certains ouvrages, quand un·e auteur·rice choisit de présenter une image et un tableau comme un ensemble d’objets, le nom pour la combinaison devient le générique « figure ». On pourrait penser que ce terme vient simplement prendre la place de celui d’« image », mais ceci irait à l’encontre du fait que les images d’un manuel ne sont pas toutes titrées. Il pourrait alors remplacer celui de « représentation visuelle », mais les tableaux présentés seuls sont eux aussi des dispositifs visuels et ne sont pas considérés comme des figures. Les images apparaissant dans les sections principales des manuels, soit la majorité d’entre elles, sont qualifiées de « figures » ; ce sont celles qui apparaissent dans les sections « *exercices* » ou les « *boxes* » qui sont souvent dépourvues de titre. Les images étant nombreuses, leur recensement dans une liste de figures, à la manière d’un index, pourrait alors être envisagé comme une pratique naturelle ; pourtant, un seul des huit manuels à l’étude en admet une.

Une variété de termes associés au sens de la vue est aussi employée pour parler de phénomènes abstraits qui n’ont pas de lien avec les images telles qu’on les a comprises jusqu’ici. On utilise les expressions « *to visualize* » au sens de *se faire une idée mentale* et « *image* » au sens d’image *mentale*, ou de figure de style, par exemple. Il s’agit cette fois-ci d’une pratique courante dans le langage commun, et, comme mentionné en introduction, la physique n’échappe pas à l’oculocentrisme qui caractérise les disciplines productrices de savoirs et plus généralement la culture occidentale moderne. Dans un extrait de Schroeder (2000, p. 69), par exemple, on peut lire : « *I like to picture it as in Figure 2.9.* » Bien qu’on puisse rapidement interpréter cette phrase comme « *Figure 2.9 picture [something]* », le « *as* » vient changer le sens de la phrase : ce qui est dit est plutôt que l’auteur se représente *mentalement* le phénomène de la même façon que l’image représente ledit phénomène. Un autre exemple du même auteur : « *Still, the phonon picture provides a beautiful accurate description of the low-energy excitations of a crystal* » (Schroeder, 2000, p. 382-383). On ne parle pas ici d’une image de phonons au sens de l’image matérielle, mais plutôt de l’idée générale du phonon, incarnée précisément par sa représentation mathématique. Aussi : « *Does*

it mean (...) ? It turns out that this picture runs into difficulty » (Sakurai, 1994, p. 5-6). Ici, « *picture* » réfère à une compréhension, ou interprétation, d'un phénomène. « *To visualize this pictorially, we consider a space-time plane, as shown in Figure 2.2* » (Sakurai, 1994, p. 116-117). Si l'auteur précise « pictorialement », c'est parce que visualiser ne signifie pas seulement « rendre visuel » au sens de l'image concrète, mais veut aussi dire « se faire une image mentale ». L'utilisation marquée de termes associés au visuel pour parler d'autres choses que d'images concrètes ne fait qu'accentuer l'ambiguïté du discours sur les images qu'on retrouve dans les manuels de physique.

Les fonctions attribuées aux images

De nombreux passages de textes (au-delà des titres) abordent l'utilité des images au sein de ces dispositifs d'apprentissage. Selon les auteurs, les images peuvent : permettre une « méthode visuelle pour manipuler des concepts physiques » (Sakurai, 1994, p. 211), être « instructive » (Sakurai, 1994, p. 419), fournir un « dispositif mental » (*mental device*) pour se rappeler les relations d'une certaine forme (Callen, 1985, p. 182) ou, plus évasivement, « rendre évident » (Callen, 1985, p. 204). Des mentions d'utilités davantage liées aux propriétés caractéristiques de l'image sont aussi faites. Ainsi, celles-ci peuvent : « illustrer un point » (Sakurai, 1994, p. 125), « illustrer une conséquence d'une théorie » (Sakurai, 1994, p. 223-224) et « symboliser un phénomène typique » (Taylor et Wheeler, 1992, p.161). L'image est présentée dans ces contextes comme étant utile, pratique. Son caractère utilitaire est renforcé dans des passages de texte par l'utilisation marquée du terme « illustrer » ; il s'agit effectivement d'illustrations, puisque ces images viennent supporter un argument développé dans et par le texte.

D'un ordre moins pédagogique et plus directement lié aux savoirs qu'elle représente, les auteurs notent d'autres fonctions de l'image : montrer ce qui est « effectivement observé »⁵ (Sakurai, 1994, p. 4 et p. 129), « montrer l'existence d'un phénomène physique » (Sakurai, 1994, p. 470), « confirmer la validité d'une équation » (Sakurai, 1994, p. 470), « démontrer un théorème » (Callen, 1985, p.70), ou « donner une interprétation physique » (Sakurai, 1994, p. 303 et 390). Dans ces cas, les images ne peuvent être comprises comme de simples « illustrations ».

Rapports entre textes et images

Selon les auteurs, l'image effectue donc une variété de fonctions au sein de leurs manuels. Mais est-ce vraiment l'image qui effectue les actions qu'on lui attribue? Tout d'abord,

5. Étrangement dans ces exemples, il ne s'agit pas de photographies, ni même de graphiques de données originaux (ou « *plot* »), mais d'un schéma de montage ainsi que d'une reproduction simplifiée d'un graphique de données.

il faut faire attention puisque, comme abordé précédemment, les auteurs ne distinguent pas clairement l'objet représenté et sa représentation dans leur discours, ce qui peut être trompeur. Par exemple, il est ambigu, quand Sakurai (1994, p. 419) mentionne que la Figure 7.12 est « instructive, » s'il entend que c'est l'image, plutôt que l'exemple en soi, présenté via l'image, qui est instructive. Dans ce même ordre d'idées, l'image est parfois identifiée comme étant un élément intermédiaire dans l'argumentaire. Par exemple, l'image « illustre » souvent la formule mathématique qui elle, on peut déduire, prouve (Misner et al., 1973, p. 506). Cette relation hiérarchique au point de vue épistémique, elle, est inscrite dans le texte.

On peut aussi constater que le texte joue un rôle important quand vient le temps d'interpréter l'image. Notamment, des éléments textuels apparaissent au sein des images elles-mêmes. Des mots et des lettres viennent ainsi remplacer des éléments qui pourraient être davantage iconiques, ou encore s'ajoutent à des éléments de ce genre pour en préciser la signification. Dans le dernier cas, on assiste souvent à une forme de redondance car l'élément iconique en question est suffisant et clair pour être compris comme tel. Cette fixation du sens par le texte se produit aussi à un autre niveau : comme l'image est polysémique et pourrait tromper, on vient réduire les interprétations possibles grâce au titre⁶. Les titres font d'ailleurs parfois apparaître une temporalité qui n'est pas inhérente à l'image. Par exemple, la Figure 2.5 de Goldstein (2001, p. 49) est identifiée par son titre comme « *a hoop rolling down an inclined plane* », mais rien *de l'image* ne montre que l'objet est en mouvement, mis à part le sens commun qui connaît les effets de la gravité (voir la Figure 12). L'objet pourrait être maintenu immobile par une force invisible sur l'image (colle, clou, etc.). Après la lecture du titre, le sens commun se joint à la convention de lecture de la gauche vers la droite et nous amène à comprendre la dynamique de l'objet représenté. Il y a alors usage de la complémentarité du texte et de l'image pour créer la signification de la représentation. La Figure 3.2 de Golstein (2001, p. 73) présente une situation semblable : si on ne sait pas que la variable θ varie avec t , alors on ne peut pas interpréter que l'image est une trajectoire (voir la Figure 12). Le titre nous indique que c'est le cas, par l'association qu'on peut maintenant faire entre $d\theta$ et dt . Finalement, on peut constater une certaine subordination du langage visuel au code de l'écrit, qui peut être décrite comme ceci :

«Souvent, le titre ou la légende [d'une même photographie utilisée dans différents quotidiens] varient. On remarque ainsi que l'adjonction du texte à l'image modifie l'interprétation selon que l'élément de texte favorise un rapprochement avec tel ou tel autre élément présent ou non dans l'image.

6. Ce constat est aussi celui de Myers (1995, p. 98) suite à l'analyse d'un manuel de biologie : « Les références textuelles et les légendes contraignent nos lectures en essayant de nous amener à choisir l'une des nombreuses interprétations possibles [de l'image]. ».

(...) [L]a stratégie d'arrimage du texte et de l'image pousse plus souvent qu'autrement le destinataire à chercher une équivalence visuelle à l'image mentale évoquée par la compréhension de l'élément textuel incarné dans la légende. (Bastien, 2006, p. 2)»

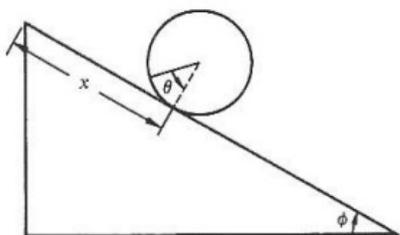


FIGURE 2.5 A hoop rolling down an inclined plane.

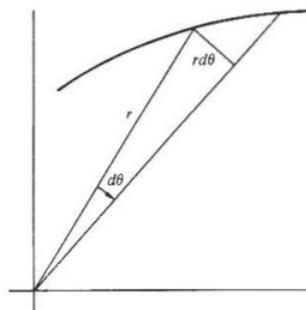


FIGURE 3.2 The area swept out by the radius vector in a time dt .

FIGURE 12. Deux images diagrammatiques tirées de Goldstein (2001) afin d'illustrer la subordination de l'image au code de l'écrit.

Visualisation des données

Dès le premier survol du corpus, il a été possible d'identifier les « points chauds » à investiguer : variété des identifiants pour les images et de leurs rôles au sein des ouvrages, redondance de certaines images et longueurs variables des titres. Suite à une analyse plus approfondie des éléments textuels d'intérêt et des images auxquelles ils réfèrent, analyse dirigée notamment par le code de caractérisation des titres, j'ai fait plusieurs constats. D'abord que le discours des auteurs à propos de l'image est ambigu, puis que les images mobilisées dans leur ouvrage sont présentées en majorité comme des dispositifs utilitaires malgré qu'elles opèrent différentes fonctions et finalement qu'une subordination du langage textuel peut être observée. Encore une fois dans l'idée d'explorer le visuel dans un angle plus pratique, j'ai réalisé une image pour repenser les étapes de cette partie du projet. Plus précisément, une réflexion sur le processus d'analyse et d'interprétation du corpus qui a permis de passer de celui-ci à des propositions de qualification du discours de ses auteurs ainsi que sur le potentiel créatif des données émergentes a donné lieu à la Figure 13 (consulter l'Annexe A pour une version en gros plan).

Chaque manuel est associé à un tableau de quatre colonnes dans la figure. La première attribue simplement un numéro à chaque ligne, qui elle correspond à un titre — le dernier nombre de cette colonne nous donne donc le nombre total de titres à l'étude pour chaque manuel. La deuxième colonne donne une ou des lettres, pour les titres qui

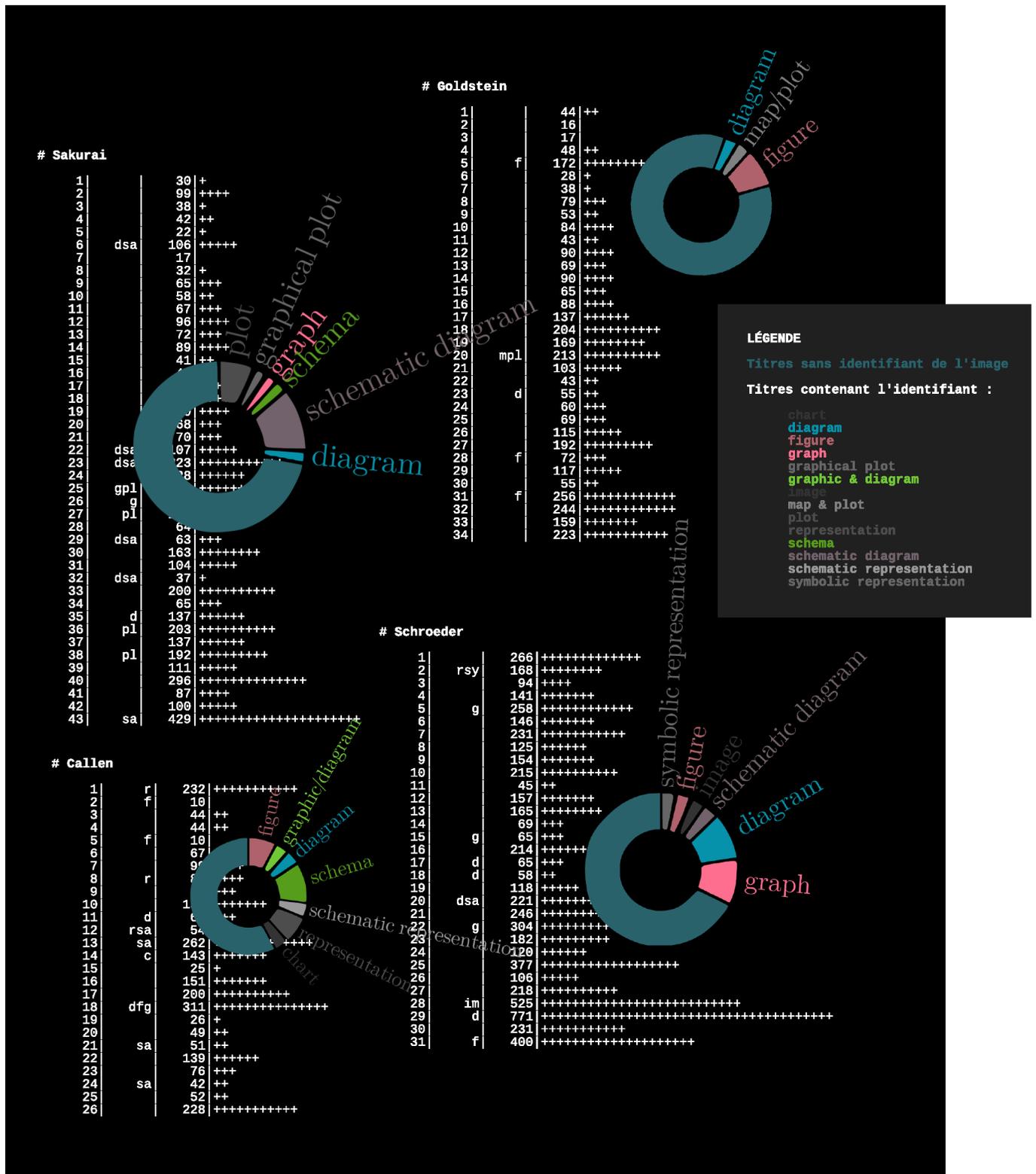


FIGURE 13. Visualisation de données issues de deux différentes étapes d'analyse de la partie textuelle du corpus (ma production).

contiennent des identifiants de l'image (« r » signifie « représentation », par exemple). La troisième colonne indique le nombre de caractères du titre, et permet donc d'en évaluer la longueur. Cette donnée, présentée sous forme numérique, est difficile à interpréter : la dernière colonne vient mobiliser l'espace pour la rendre plus accessible. En effet, la succession de « + » est une *traduction* de l'information précédente. Plus précisément, le nombre de « + » est proportionnel au nombre qui la précède dans la ligne du tableau. Les diagrammes circulaires sont superposés aux tableaux en tant que deuxième couche d'analyse – le processus d'analyse est une série d'étapes. Ils montrent aussi la variété et la redondance des termes employés par les auteurs – c'est l'émergence du constat de l'ambiguïté du discours. Le fait de présenter les diagrammes pour chaque ouvrage simultanément permet de constater rapidement qu'il n'y a pas de tendance au sein de leur ensemble.

La forme de l'information visuelle est aussi importante que le contenu pour pouvoir comprendre l'image. D'abord, on peut induire par le style de l'information textuelle présentée en blanc (organisation spatiale, police de caractère, présence du symbole « # », etc.) que la programmation a fait partie du processus d'évaluation du corpus à l'étude. Ce choix de présenter les données telles qu'elles sont produites par le programme est motivé par l'idée de donner une impression de leur caractère « brut » (ou qu'elles sont issues d'un niveau d'interprétation moins élevé), afin de référer via celles-ci à une étape préliminaire de l'analyse. La présence des diagrammes circulaires au-dessus du texte indique que le message de cette image ne peut se trouver uniquement dans son contenu textuel puisque certains éléments sont cachés volontairement. L'intention ici était de montrer l'évolution du processus d'analyse et non simplement d'en exposer les résultats et mettre en valeur le potentiel épistémique de l'image, qui, tout comme l'image scientifique, ne peut être pensée comme un simple outil de présentation :

« Les images scientifiques sont des instruments de réflexion. En tant que tels, elles doivent être comprises à la fois comme des productions et des productrices de connaissances. (...) [Il existe une] relation complexe entre le phénomène, les données et la représentation qui produit d'innombrables formes hybrides entre l'imagerie indicielle, symbolique et iconique. (Samuel, 2018, p. 66, ma traduction) »

Chapitre 5

DISCUSSION

La confusion terminologique dans le discours sur l'image dans la communauté physicienne, qui indique une absence de questionnement à l'égard de ce mode de représentation, est mentionnée entre autres dans la thèse de Catherine Allamel-Raffin (2004). En effet, la chercheuse remarque, à travers une ethnographie de laboratoire en physique des matériaux et en astrophysique, que les expérimentalistes ne s'entendent pas sur ce qu'il convient d'appeler « image ». Ce manque de clarté dans le langage n'est cependant pas exclusivement réservé à l'image — les termes « modèles » et « représentations », par exemple, sont interchangeable dans le vocabulaire des physicien·ne·s. Concernant ces deux derniers termes, on peut faire ce constat notamment dans le manuel de Schroeder (2000, p. 358).

On peut remarquer sans surprise que la modalité de représentation privilégiée est l'équation mathématique, où les composantes ainsi que la structure fonctionnent de façon conventionnelle. Le symbole, dont le sens a été fixé par convention, est ainsi le signe le plus valorisé dans ce contexte : c'est celui qui se présente comme le plus approprié pour représenter le savoir *objectif* de la physique. Que la convention soit fixée par le biais d'un consensus social — celui de la communauté scientifique — apparaît comme dissocié du problème de l'objectivité du savoir représenté (puisque l'objectivité des équations n'est jamais remise en question). Pourtant, des parallèles peuvent être établis entre cette valorisation du symbole et le concept d'« objectivité structurale » de Daston et Galison (2007). L'objectivité structurale est cette idée que seule la structure générale, et non la forme particulière d'une entité, a une réalité objective. Cette perspective tend à dévaluer l'image ou, du moins, à considérer qu'elle ne peut constituer une représentation objective du monde. Selon Daston et Galison, cette idée est encore présente dans le milieu de la physique contemporaine, tout particulièrement en physique mathématique.

On peut reconnaître également que les auteurs de manuels ont, du moins partiellement, conscience de la polysémie de l'image, incarnée notamment par ses autres registres que

sont l'iconicité et l'indicialité. Pour y remédier, ils fixent la signification de leurs images par le texte, que l'on considère davantage objectif, ou mieux encore, via l'équation. Cette hiérarchie de l'objectivité des modes de représentation ne peut être qu'associée au degré de conventionnalité des celles-ci — encore une fois, le symbole est la représentation ultime. Bien que les physicien·ne·s soient parfois critiqué·e·s de soutenir un « réalisme naïf » dans leur approche à la représentation (Paty, 2001b, p. 2), la littérature récente sur la pratique est plus nuancée et tend plutôt à montrer qu'ils et elles sont conscient·e·s du caractère représentationnel de leur corpus de connaissances, sans toutefois toujours être en mesure de sortir des paradigmes dans lesquels il se construit (Jurdant, 2012).

Paradoxalement, on aborde aussi l'image comme un dispositif de présentation de données, et non comme une interprétation de celles-ci. Par exemple, bien qu'il soit évident pour le lecteur ou la lectrice que les images ne sont pas à l'échelle, cette mention apparaît sur nombre d'entre elles. Ce souci d'ordre de grandeur trahit une attente que l'on a de l'image, ou plutôt des représentations scientifiques — qu'elles soient réalistes. Le vocabulaire employé pour parler de ces images est aussi par moment celui de l'objectivité : « visualisation », « présentation », « description ». Les figures sont alors considérées comme des « éléments d'affichage » (« *display items* ») (Springer, (s. d.), paragr. 1). On les pense comme de simples présentations d'un savoir objectif et non comme des interprétations. Ceci est à l'image de la compréhension physicienne des représentations scientifiques : des descriptions du monde, ou des « image[s] de la réalité » (Einstein et Infeld, 1983, p. 43). Les images présentent ce que les théories et les idées, elles, *représentent*.

Finalement, le statut de l'image se négocie entre un médium de représentation dévalorisé et un dispositif de présentation de données objectif, et cette tension s'inscrit dans différentes traditions de la pensée concernant la notion de représentation. Comme mentionné précédemment, la communauté physicienne semble consciente qu'elle produit et utilise des représentations, mais ses discours au sein des manuels laisse entendre une compréhension primaire de celles-ci comme des outils pour accéder à la connaissance. Les représentations sont comprises comme arbitraires, conventionnelles, mais utiles : elles donnent accès aux données objectives, aux connaissances sur le monde. D'ailleurs, les physicien·ne·s distinguent la représentation au sens mathématique et au sens « courant », mais jugent généralement impertinent tout autre usage du terme (que celui mathématique) pour aborder les productions scientifiques. Aussi, la réflexion sur la représentation se limite au lien représentation-représenté (comme dans la tradition analytique de la philosophie).

Chapitre 6

LIMITES

6.1. Plasticité et iconicité pour approfondir l'analyse du corpus

Le corpus a été analysé notamment grâce au cadre théorique de la sémiotique de Peirce, qui admet l'image comme un signe et porte une attention particulière à sa place dans un système triadique de création de la signification. L'image, cependant, a cette particularité d'intégrer une « double couche » pour signifier : le registre plastique¹ s'arrime au plan iconique (Saouter, 2000). Afin d'en explorer davantage la richesse communicationnelle, le corpus pourrait faire l'objet d'une étude ultérieure axée autant sur la plasticité que l'iconicité des images, ainsi que l'articulation de ces deux conditions de production du sens. Plus précisément, la récurrence de certains éléments de composition, la couleur, la perspective et le cadrage de ces images sont à investiguer. Quelques pistes de réflexions sont proposées ici pour poursuivre dans cette avenue.

Au regard de la plasticité, l'absence de couleur et l'omniprésence des flèches comme éléments de composition sont deux constats qui mériteraient d'être approfondis. D'abord, les manuels de physique à l'étude constituent une « littérature grise » (Jacobi, 1985). Ensuite, la flèche est le symbole pour les vecteurs ; il s'agit du symbole par excellence pour représenter la distance et les autres quantités qui y sont reliées via le temps (vitesse, accélération, quantité de mouvement, etc.), mais aussi toutes les autres quantités orientées dans l'espace (champs magnétique, électrique, spin, etc.). Non seulement sert-elle à représenter des quantités orientées dans l'espace, mais elle sert aussi à représenter le temps, comme nous l'avons vu précédemment. La flèche ondulée est aussi le symbole pour la radiation, puisqu'on représente la radiation par l'onde et que celle-ci est orientée dans l'espace. En plus de sa fonction de représentation de quantités physique, la flèche peut aussi servir d'indicateur

1. La plasticité concerne la perception visuelle, et se manifeste par les conditions formelles qui rendent possible la reconnaissance même des représentations visuelles (Saouter, 2000). La couleur, la texture, la disposition des éléments dans l'image sont des exemples de variables du registre plastique. C'est la « dialectique entre les plans plastique et iconique [qui] donne accès au plan de l'interprétation » (p. 13).

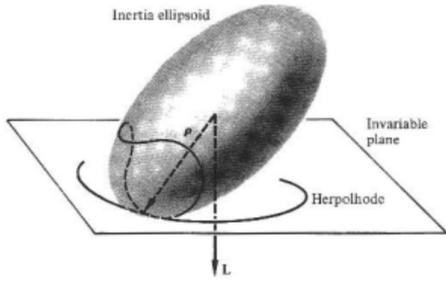
pour le sens de la lecture. Bien que l'œil physicien s'y soit accoutumé, l'omniprésence des flèches, qui va parfois jusqu'à rendre l'image cacophonique, est frappante.

Le corpus s'est révélé diversifié au niveau du registre de l'iconicité. Des images sont en deux dimensions, d'autres en trois. Certaines peuvent être qualifiées de « réalistes », ou vraisemblables, d'autres sont purement abstraites. On observe, au sein d'un même manuel, des mélanges de styles : la superposition d'images réalistes pour représenter des volumes dans l'espace spatial et de traits pour les vecteurs est courante (voir par exemple la Figure 14a). Une temporalité bien définie contraint la disposition des éléments composant l'image : le sens de l'évolution temporelle est *toujours* de gauche à droite et, si nécessaire, de haut en bas (voir par exemple la Figure 14b). À cet égard, une seule exception au sein des huit manuels a été trouvée : il s'agit de la Figure 14c. Dans le titre de cette image, on prend tout de même le soin d'indiquer que le sens du jet est de droite à gauche, car ce n'est pas conventionnel. On ajoute parfois des « avant / après » sous les images, ou même une ou des flèches (voir la Figure 14d) pour le sens de la lecture, mais pas toujours. Cette convention parfois implicite est copiée sur celle de la lecture en Occident. La convention agit parfois seule : le titre n'indique pas le sens de la lecture (il indique parfois qu'il y a une certaine dynamique dans l'élément présenté), mais c'est la convention qui dicte l'ordre dans lequel on doit considérer les différents éléments pour pouvoir interpréter l'image. Parfois la chronologie est indiquée par 1, 2, 3... ou a, b, c... (voir par exemple la Figure 14e) Cette dialectique de l'« articulation spatio-temporelle » (Saouter, 2000, p. 153) est mobilisée entre autres pour présenter une décomposition du mouvement (voir la Figure 14f).

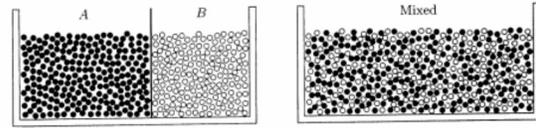
6.2. Les limites du corpus

Le corpus constitue un ensemble jugé représentatif du matériel de formation de la relève en physique nord-américaine. Pour caractériser la représentation des connaissances via les images de manuels en physique plus généralement, un regard sur le matériel d'enseignement issu d'autres localisations géographiques doit être envisagé.

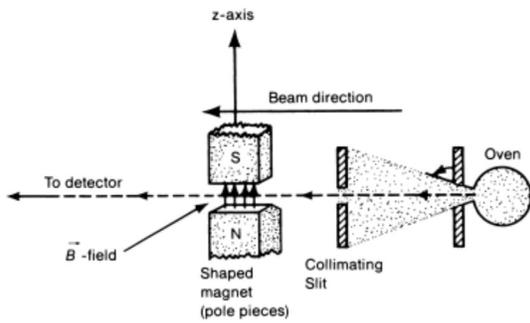
De plus, dans le cadre de ce travail, j'ai choisi d'analyser des manuels écrits en anglais puisque même dans les universités francophones nord-américaines c'est à ceux-ci que l'on réfère. Cela occasionne des difficultés telles que l'impossibilité de traduire certains termes puisqu'il n'existe pas d'équivalents, ou encore parce que l'équivalent dans la deuxième langue n'est pas défini exactement de la même façon. C'est pour cette raison notamment que j'ai décidé de ne pas traduire certains termes tels que « *picture* » ou « *graph* ». Dans l'analyse de texte, cette donnée est non-négligeable. D'ailleurs, assumer que « la langue de la science est l'anglais » est peut-être réaliste dans le contexte de cette étude mais amène



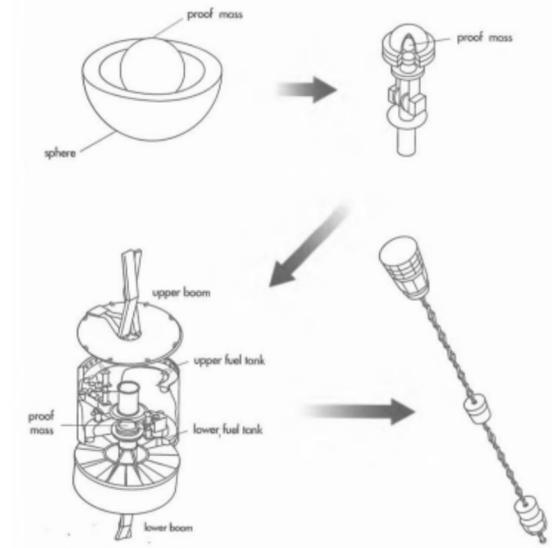
(a) Source : Figure 5.4 de Goldstein (2001, p. 202)



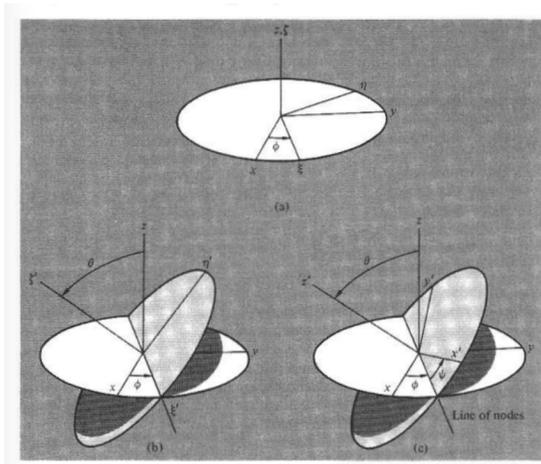
(b) Source : Figure 5.24 de Schroeder (2000, p. 187)



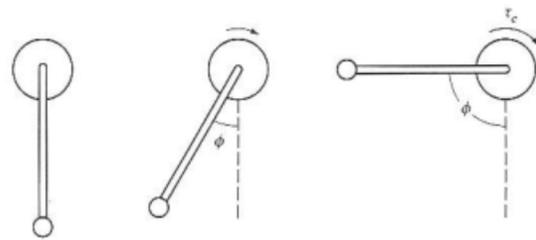
(c) Source : Figure 1.1 de Sakurai (1994, p. 3)



(d) Source : Figure 9-2 de Taylor (1992, p. 277)



(e) Source : Figure 4.7 de Goldstein (2001, p. 152)

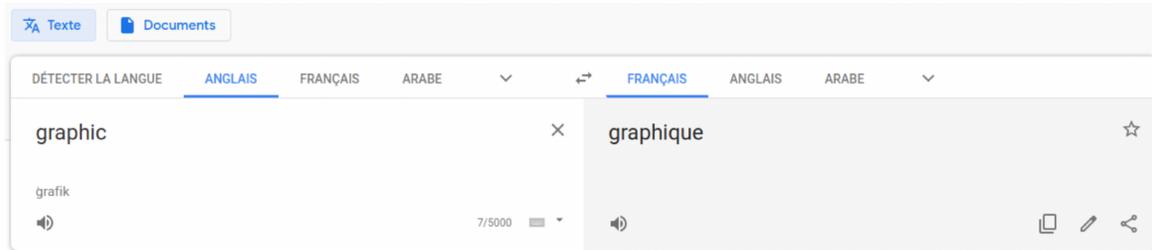


(f) Source : Figure 6.6 de Goldstein (2001, p. 265)

FIGURE 14. Une sélection d'images issues des manuels sélectionnés pour aborder leur richesse iconique.

une vaste gamme de problèmes systémiques au niveau des inégalités et de l'inclusion dans les milieux scientifiques². Il serait intéressant de voir comment le flou définitionnel, ou l'inconsistance dans le vocabulaire associé aux images, se répercute (ou non) dans d'autres langues, notamment le français, comparativement à l'anglais.

1. Traduction



2. Recherche d'images

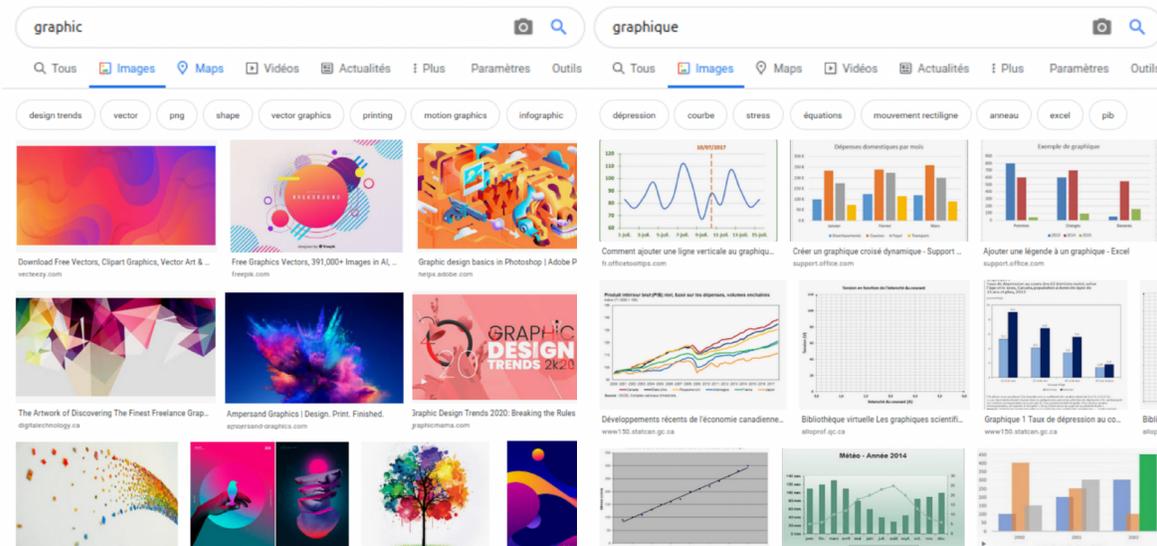


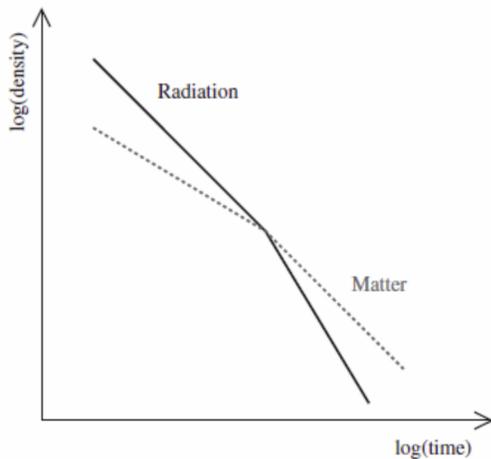
FIGURE 15. Capture d'écran en deux temps : traduction du terme « graphic » de l'anglais vers le français via un logiciel de traduction en ligne et recherche d'images pour les termes « graphic » et « graphique » via un moteur de recherche populaire (ma production). On peut constater que même si la traduction sous-entend que les deux termes ont la même signification, les images obtenues dans les deux cas ne suivent pas les mêmes tendances — celles de gauche semblent référer à la pratique du design graphique alors que celles de droite sont des diagrammes (à bandes pour la majorité).

2. Voir les travaux de Larivière (2019), Hamel (2013), Gajo et al., (2013) ou encore Lüdi (2015) pour différentes perspectives sur ces enjeux.

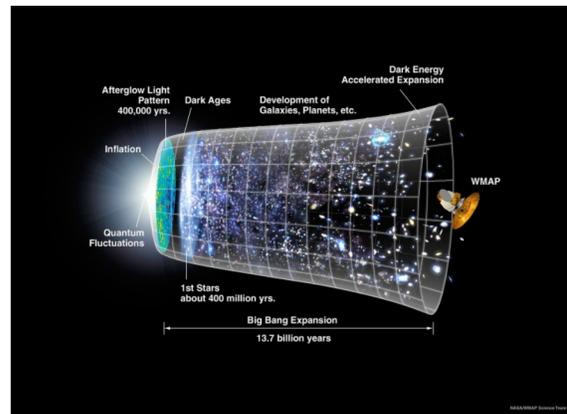
6.3. Pour confronter davantage les conclusions

Certaines des observations faites pour les manuels de physique semblent pouvoir s'appliquer à leurs équivalents dans d'autres disciplines scientifiques. Afin de bien cerner l'unicité des manuels de physique, une analyse comparative serait indiquée. Appliquer les outils d'analyse à un autre corpus permettrait par la même occasion d'en tester davantage les limites.

Également, comparer les résultats avec d'autres instances de communication en physique serait une autre stratégie pour confronter ces observations. En effet, il a été affirmé déjà que le processus de représentation s'intègre dans un contexte de communication scientifique plus large, qui est celui de la transmission du savoir. À première vue, il semblerait que le matériel visuel mobilisé lors de la conférence scientifique, une autre instance de transmission du savoir, est considérablement différent pour aborder un sujet donné. Par exemple, l'Univers-bloc, introduit à la section 1.3, prend une forme radicalement différente selon qu'il est présenté dans un manuel de physique ou dans une conférence départementale ou organisationnelle.



(a) Source : Liddle (2015).



(b) Source : NASA (2006).

FIGURE 16. Deux représentations possibles pour l'Univers-bloc.

6.4. Limite de la méthodologie

Comme mentionné à plusieurs reprises dans ce travail, l'étude des images en isolation par rapport à leur contexte de fabrication ne permet pas de rendre compte d'une partie importante des procédés qui leur permettent de *signifier*. Ici, l'étude des images a été

concentrée sur leurs statuts stabilisés lors de leur apparition dans les manuels. Il a été soulevé cependant que la représentation est, au-delà des productions matérielles qu'elle engendre, une pratique. L'analyse des textes du corpus a apporté des pistes de réflexion sur le discours des auteurs et une étude de terrain pourrait venir les renforcer (ou du moins les confronter). Ce qui est entendu ici par « observations de terrain » est l'interrogation directe des auteurs et autrices au moment et sur les lieux de la confection de ces manuels.

Dans ce même ordre d'idées, on pourrait investiguer directement le discours sur l'image qui existe du milieu scientifique via une ethnographie telle que celle entreprise par Catherine Allamel-Raffin (2004). Dans cette recherche, la chercheuse s'intéresse notamment à l'évolution des fonctions des images produites dans un laboratoire de recherche en physique des matériaux, de leur production à leur publication. Igor Babou (2008, p. 38) note que, bien qu'il ne l'ait pas fait lui-même, « la constitution d'un tel corpus [étayant la récurrence] des idées de sens commun sur l'image serait cependant fort instructive. »

6.5. Des questions qui demeurent

Le concept de temps en physique et la question des images scientifiques sont des sujets de taille et ont un potentiel de réflexion qui dépasse largement les aspirations de ce mémoire. Ainsi, plusieurs questions les concernant ont été formulées mais n'ont reçu que de brefs éléments de réponse. En particulier, l'idée de l'équation mathématique comme forme de représentation privilégiée dans les manuels de physique pose des difficultés importantes qui auraient pu être approfondies davantage. Plus généralement, la considération des mathématiques comme fondement de la physique aurait certainement été utile pour une comparaison plus poussée avec les autres modes de représentation utilisés pour représenter les savoirs de la discipline. Cette même considération viendrait notamment enrichir la discussion autour de la compréhension des images diagrammatiques en physique. Bien qu'une brève introduction à la sémiotique de l'image ait été présentée au début de ce mémoire, rien de tel n'a été effectué pour le cas de la représentation mathématique. Comme plusieurs autres, cette trame prometteuse aurait pu être à l'origine d'une nouvelle étude. Les contraintes de temps et de ressources sont la seule justification au choix de ne pas explorer certaines pistes comme celle-ci.

Une discussion sur l'évolution historique du concept de temps en physique a été entamée au début de ce mémoire afin d'introduire le concept en question et quelques grandes idées de la discipline. Cette partie mériterait d'être revisitée à la lueur des résultats de l'analyse. Plus précisément, les multiples facettes du temps objectifs (c'est-à-dire les temps classique, relatif, émergent et orienté) pourraient être rapprochées aux nouvelles catégories d'images

du temps proposées (soit le pictogramme, la situation temporelle, la trace, la trajectoire, l'évolution et l'évolution espace-temps), ainsi qu'aux constats sur le discours sur l'image des auteurs. Y a-t-il des parallèles à faire entre les notions « physiques » de temps et celles qui ont émergées de l'étude de ses représentations ? Y a-t-il des liens, ou encore des incompatibilités ? Les ponts à faire ici ne sont pas évidents, même après cette étude, et il faudra à nouveau un travail de décortilage minutieux. Cette avenue m'apparaît néanmoins le prolongement naturel et nécessaire de cette recherche.

Chapitre 7

CONCLUSION

Le projet de RC cristallisé par ce mémoire est une exploration de la place et du fonctionnement de l'image dans la représentation des savoirs en physique. Il s'agit donc d'une entreprise interdisciplinaire, issue de questionnements croisés sur les modalités de signification propres à l'image et les savoirs appartenant à la discipline — ceux portant sur le concept de temps objectif tout particulièrement. À cet effet, je me suis penchée sur les images du temps que l'on peut retrouver dans un ensemble de huit manuels : j'ai analysé leur contenu sémiotique et effectué une lecture proche de textes y référant (titres et passages de texte). Le temps, par la pluralité de ses compréhensions et, conséquemment, de ses représentations en physique, mais aussi par sa relation particulière aux images que l'on assume *atemporelles*, s'est présenté comme un sujet de choix pour cette étude. Ma démarche a admis une dimension créative : du matériel visuel a été réalisé pour explorer les thèmes émergents de l'analyse. Une cartographie des images du temps a permis de mettre en valeur la richesse sémiotique de ces images et la pertinence de certains critères du langage visuel (degré d'abstraction, d'iconicité, caractère implicite versus explicite) pour les ordonner. Une visualisation a ensuite abordé l'ambiguïté du discours des auteurs, la subordination du langage textuel ainsi que la négociation du statut de l'image entre modalité de représentation dévaluée et dispositif de présentation objectif. Les images produites sont pleinement assumées comme des interprétations et ne visent pas à étaler les résultats de l'analyse, mais à en prolonger la réflexion. Qui plus est, elles ne sont pas de simples illustrations puisqu'elles participent activement à la construction de l'argumentaire tissé tout au long de ce mémoire.

Ce projet est aussi une exploration des méthodologies possibles pour investiguer les artefacts de la physique avec une perspective communicationnelle. Dans cet ordre d'idées, les efforts ont été concentrés davantage sur le processus de recherche en soi que sur la finalité de l'exercice. J'ai accordé une grande place à l'expérimentation dans mon travail, et deux facettes de ma posture de chercheuse ont contribué à cette attitude. La première est le



FIGURE 17. *Formulation de la question de recherche ou comment tricoter son sujet de maîtrise [photographie traitée] (ma production). La photographie présente l'étalement de bouts de papier sur lesquels on peut lire des phrases interrogatives et les dates de leur rédaction. Un fil de laine les relie maladroitement — ce fil symbolise le cheminement non linéaire et ponctué d'embûches (les nœuds) du processus de construction de la question de recherche de ce mémoire. Alors qu'en physique, le projet de maîtrise se présente traditionnellement sous la forme d'une énigme statique donnée à l'étudiant qui doit la résoudre (Kuhn, 1996), la question à l'origine de projet, comme celle de biens des projets en sciences sociales et humaines, s'est présentée plutôt comme un objet dynamique, développé *au fil du temps*.*

fait d'avoir été en apprentissage de perspectives académiques nouvelles (en communication) tout au long du projet. La deuxième est le fait d'avoir été préalablement formée dans une discipline au sein de laquelle la composante expérimentale est cruciale (la physique). J'ai tenté de comprendre et interpréter mon corpus à l'aide de différentes loupes, sans savoir où cela allait me mener. La méthodologie bricolée sur mesure qui en résulte donne au projet son caractère expérimental saillant.

Le temps objectif et ses images se sont avérés de riches sources de questionnements et nous ont finalement menés vers des réflexions intéressantes, en lien avec la notion d'objectivité notamment. Quelques pistes ont été proposées pour apprécier la richesse sémiotique des représentations en question et leur compréhension en physique à travers le discours des auteurs de manuels. Néanmoins, une variété de problèmes les concernant ne sauraient être adressée de façon satisfaisante dans le cadre d'un unique projet de maîtrise. Alors que la visée modeste était ici d'éclairer une partie des mécanismes de représentation des images du temps objectif dans les manuels de physique, un prolongement de cette recherche pour mettre en parallèle les catégories d'images proposées (le pictogramme, la situation temporelle, la trace, la trajectoire, l'évolution et l'évolution espace-temps) et les multiples facettes du concept de temps objectif (temps classique, relatif, émergent et orienté) s'impose.

Finalement, ce projet original s'est construit, déconstruit et reconstruit à maintes reprises en cours de route. La formulation même de sa problématique a nécessité un travail de négociation considérable, et ne s'est stabilisée qu'à la toute fin. Un défi de ce projet est de le rendre intelligible pour des membres de la communauté universitaire appartenant à la fois au milieu de la communication et à celui de la physique. Les enjeux de cette intelligibilité ne relèvent pas uniquement du langage formel : ces milieux sont autant tributaires de leur langage que de leur(s) épistémologie(s), leurs traditions de pensées, et, finalement, leurs façons d'interroger le monde.

Références

- American Psychological Association [APA]. (2009). *Publication Manual of the American Psychological Association*. 6ème édition. Sections 5.01-5.30. p 125–167.
- Albert, D. (2000). *Time and chance*. Cambridge : Harvard University Press.
- Allamel-Raffin, C. (2004). *La production et les fonctions des images dans un laboratoire de physique des matériaux et en astrophysique* [thèse de doctorat, Université Louis Pasteur]. <http://sciences-medias.ens-lyon.fr/scs/IMG/pdf/raffin-1.pdf>
- Allamel-Raffin, C. (2006). La doctrine d'un philosophe expérimentaliste au service d'une science particulière : les images produites en physique des matériaux à la lumière de la sémiotique peircienne. *Visio*, 9, 159–174.
- Anderson, N. (2009). Eye and Image: Looking at a Visual Studies of Science. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 39(1), 115–125. <https://doi.org/10.1525/hsns.2009.39.1.115>
- Anderson, N. et Dietrich, M. R. (dir.). (2012). *The Educated Eye Visual Culture and Pedagogy in the Life Sciences*. Dartmouth College Press.
- Atkin, A. (2013). Peirce's Theory of Signs. Dans Edward N. Zalta (dir.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2013/entries/peirce-semiotics>
- Babou, I. (1999). *Science, télévision et rationalité : analyse du discours télévisuel à propos du cerveau* [thèse de doctorat, Université Paris-Diderot]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00007469>
- Babou, I. (2008). De l'image comme catégorie à une approche communicationnelle globale. *Communication & langage*, 157, 37–48.
- Bartels, A. (2006). Defending the Structural Concept of Representation. *Theoria*, 55, 7–19.
- Barthes, R. (1980). *La chambre claire : Note sur la photographie*. Paris : Seuil.
- Bastide, F. (1985). Iconographie des textes scientifiques: Principes d'analyse. *Culture technique*, 14, 133–151.
- Bastien, F. (2006). *Plasticité, iconicité, paratexte : une analyse de la relation texte-image* [mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/2060/>
- Bertin, J. (1983). *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*. Californie : Esri Press.

- Bigg, C. (2011). A visual history of Jean Perrin's Brownian Motion Curves. Dans Daston, L. et Lunbeck, E. (dir.), *Histories of Scientific Observation* (p. 156-179). Chicago : The University of Chicago Press.
- Bigg, C. (2012). Les études visuelles des sciences : regards croisés sur les images scientifiques. *Histoire de l'art*, 70, 95–101.
- Bjorken J. et Drell, S. (1964). *Relativistic Quantum Mechanics*. New York : McGraw-Hill Inc.
- Boesch, B. (2015). Scientific Representation. Dans *Internet Encyclopedia of Philosophy*.
<https://www.iep.utm.edu/sci-repr/>
- Boesch, B. (2017). There Is a Special Problem of Scientific Representation. *Philosophy of Science*, 84, 970–981.
- Bogen, J. (2017). Theory and Observation in Science. Dans Edward N. Zalta (dir.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/science-theory-observation/>
- Boidy, M. (2017). « I Hate Visual Culture » : L'essor polémique des *Visual Studies* et les politiques disciplinaires du visible. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 11(3), 303–319.
<https://doi.org/10.3917/rac.036.0303>
- Born, M. (1955). L'interprétation statistique de la mécanique quantique. *Le journal de physique et le radium*. 16(10), 737–743.
- Bowker, G. C. et Leigh Star, S. (2000). *Sorting Things Out: Classification and its Consequences*. Cambridge : The MIT Press.
- Buonomano, D. (2017). *Your Brain Is a Time Machine: The Neuroscience and Physics of Time*. New York : W. W. Norton & Company Editions.
- Burri, R. et Dumit, J. (2008). Social Studies of Scientific Imaging and Visualization. Dans Hackett, E. J., Amsterdamska, O., Lynch M. et Wajcman, J. (dir.), *The Handbook of Science and Technology Studies* (3ème ed., p. 297-317). Cambridge : The MIT Press.
- Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an Introduction to Themostatistics*. New York : John Wiley & Sons.
- Callender, C. (2004). Measures, Explanations and the Past: Should 'Special' Initial Conditions be Explained? *British Society for the Philosophy of Science 2004*, 55, 195–217.
- Callender, C. (dir.). (2011). *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*. New York : The Oxford University Press.
- Callender, C. (2017). *What makes time special?* New York : The Oxford University Press.
- Callender, C. et Cohen. J. (2006). There Is No Special Problem About Scientific Representation. *Theoria*, 55, 67-85.

- Canales, J. (2015). The Media of Relativity : Einstein and Telecommunications Technologies. *Technology and Culture*, 56(3), 610–645.
- Casanova, H., L. (2011). La figure de l'atome, paradigme de la vulgarisation scientifique [mémoire de maîtrise, Université de Montréal]. Papyrus. <http://hdl.handle.net/1866/6133>
- Chandler, D. et Munday, R. (2011). Ocularcentrism. Dans *A Dictionary of Media and Communication*.
<http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803100245338>
- Chapman, O. B. et Sawchuk, K. (2012). Research-Creation: Intervention, Analysis and « Family Resemblances ». *Canadian Journal of Communication*, 37(1), 5–26.
<https://doi.org/10.22230/cjc.2012v37n1a2489>
- Chapman, O. et Sawchuk, K. (2015). Creation-as-Research: Critical Making in Complex Environments. *RACAR : Revue d'art Canadienne*, 40(1), 49–52.
<https://doi.org/10.7202/1032753ar>
- Cobley, P. et Jansz, L. (1997). *Introducing Semiotics*. Cambridge : Totem Books.
- Cohen-Tannoudji, G. (1994). Le temps des processus élémentaires. Dans Spiro, M. et Klein E. (dir.), *Le temps et sa flèche* (p. 93-130). Paris : Flammarion.
- Coopmans, C., Vertesi, J., Lynch, M., et Woolgar S. (dir.). (2014). *Representation in Scientific Practice Revisited*. Cambridge : The MIT Press.
- Cubitt, S. (2014). *The Practice of Light: A Genealogy of Visual Technologies from Prints to Pixels*. Cambridge : The MIT Press.
- Daston, L. et Gallison, P. (2007). *Objectivity*. New York : Zone Books.
- Daston, L. et Lunbeck, E. (dir.). (2001). *Histories of Scientific Observation*. Chicago : The University of Chicago Press.
- Davies, P. (1974). *Physics of Time asymmetry*. London : Surrey University Press.
- Davies, P. (2002). That mysterious flow. *Scientific American*, 287(3), 40-47.
<https://doi.org/10.1038/scientificamerican0206-6sp>
- De Breteuil, É. (1759). *Exposition abrégée du système du monde*. Introduction et chapitre 1 du livre; édition revue par Alexis Clairaut; imprimeurs Dessaint-Saillant et Lambert (1759); réédition Jacques Gabay (1990).
- De Castilla, C. (2017). Close Reading. Dans Allen, M. (dir.), *The SAGE Encyclopedia of Communication Research Methods*. <http://methods.sagepub.com/reference/the-sage-encyclopedia-of-communication-research-methods/i2533.xml>

- D'Hippone, A. (401). Les Confessions. Livre 11, Chapitres 14.
- Dondero, M. G. (2009). La stratification temporelle dans l'image scientifique. *Protée*, 37(3), 33–44. <https://doi.org/10.7202/038803ar>
- Dondero, M. G. (2010)a. Rhétorique des figures visuelles et argumentation par images dans le discours scientifique. *Protée*, 38(1), 41–53. <https://doi.org/10.7202/039701ar>
- Dondero, M. G. (2010)b. Sémiotique de l'image scientifique. *Signata*, 1(4), 111–175. <https://doi.org/10.4000/signata.291>
- Dondero, M. G. (2016). Pour une rhétorique sémiotique de l'image en sciences biologiques. *Argumentation et Analyse du Discours*, 16, 1–20. <https://doi.org/10.4000/aad.2169>
- Dondero, M. G. et Fontanille, J. (2014). *The Semiotic Challenge of Scientific Image: A Test Case for Visual Meaning* (Traduit par Julie Tabler). Ottawa : Legas Publishing. <http://hdl.handle.net/2268/170306>
- Dowden, B. (2015). Time. Dans *Internet Encyclopedia of Philosophy*. <https://www.iep.utm.edu/time/#SH14a>
- Downes, S. M. (2009). Models, Pictures, and Unified Accounts of Representation: Lessons from Aesthetics for Philosophy of Science. *Perspectives on Science*, 17(4), 417–428.
- Drucker, J. (2014). *Graphesis : Visual Forms of Knowledge Production*. Cambridge : Harvard University Press.
- Dukich, J. M. (2012). Two types of empirical adequacy: a partial structures approach. *Synthese*, 190(14), 2801–2820.
- Earman, J. (1989). *World Enough and Space-Time*. Cambridge : The MIT Press.
- Einstein, A. et Infeld, L. (1983). *L'évolution des idées en physique* (traduit de l'anglais par Maurice Solovine). Paris : Flammarion.
- Emmision, M., Smith P. et Mayall, M. (2012). *Researching the visual* (2ème ed.). London : SAGE Publications.
- Feyerabend, P. (1959). An Attempt at a Realistic Interpretation of Experience. Dans Feyerabend, P. (dir.), *Realism, Rationalism, and Scientific Method* (Philosophical Papers I, p. 17-36), Cambridge : Cambridge University Press.
- Fontanille, J. (2009). Les systèmes d'imagerie scientifique. Questions sémiotiques. *Rivista online dell' Associazione Italiana Studi Semiotici*. https://www.unilim.fr/pages_perso/jacques.fontanille/textes-pdf/Aimageriescientifique.pdf

- Franklin, A. et Perovic, S. (2016). Experiment in Physics. Dans Edward N. Zalta (dir.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
<https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/physics-experiment/>
- French, S. (2003). A model-theoretic account of representation. *Philosophy of Science*, 70, 1472–1483.
- Frigg, R. et Nguyen, J. (2019). Scientific Representation. Dans Edward N. Zalta (dir.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
<https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/scientific-representation/>
- Gagnon, P. (2016). *Who Cares about Particle Physics ? Making Sense of the Higgs Boson, the Large Hadron Collider and CERN*. Oxford : Oxford University Press.
- Gagnon, P. (2020). The Forgotten Life of Mileva Maric Einstein. *arXiv*, History and Philosophy of Physics. <https://arxiv.org/abs/2002.08888>
- Gajo, L., Grobet, A., Serra, C., Steffen, G., Müller, G. & Berthoud, A. (2013). Plurilingualisms and knowledge construction in higher education. Dans Berthoud, A., Grin, F. et Georges L. *Exploring the Dynamics of Multilingualism: The DYLAN project* (p. 279-298). Amsterdam : John Benjamins Publishing B. V.
- Galindo, L. I. R. (2011). *The Sociology of Theoretical Physics* [thèse de doctorat : Cardiff University School of Social Sciences]. Orca. <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/15106>
- Galison, P. (1997). *Image and Logic : A Material Culture of Microphysics*. Chicago : The University of Chicago Press.
- Galison, P. (2003). *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time*. New York : W. W. Norton Company.
- Goldstein, H., Safko, J. et Poole, C. (2001). *Classical Mechanics* (3ème ed.). Éditions Addison-Wesley.
- Hamel, R. E. (2013). L'anglais, langue unique pour les sciences? Le rôle des modèles plurilingues dans la recherche, la communication scientifique et l'enseignement supérieur. *Synergies Europe*, 8, 53–66.
- Harding, S. (1991). *Whose Science ? Whose Knowledge ? Thinking from women's lives*. New York : Cornell University Press.
- Hartle, J. B. (2003). *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco : Addison Wesley.
- Hawking, S. (1988). *A Brief History of Time*. New York : Bantam Books.

- Hawking, S. et Penrose, R. (1996). *The Nature of Space and Time*. Princeton : Princeton University press.
- Hentschel, K. (2014). *Visual Cultures in Science and Technology: A Comparative History*. Oxford : Oxford University Press.
- Jacobi, D. (1984). Figures et figurabilité de la science dans des revues de vulgarisation. *Langages*, 75, 23–42.
- Jacobi, D. (1985). La visualisation des concepts dans la vulgarisation scientifique. *Culture technique*, 14, 153–63. <http://hdl.handle.net/2042/31698>
- Jacobi, D., et Schiele, B. (1989). Scientific Imagery and Popularized Imagery: Differences and Similarities in the Photographic Portraits of Scientists. *Social Studies of Science*, 19(4), 731–753. <https://doi.org/10.1177/030631289019004014>
- Jenks, C. (dir). (1995). *The Centrality of the Eye in Western Culture*. London : Routledge.
- Jones, C. et Galison, P. (1998). *Picturing Science, Producing Art*. New York : Routledge.
- Jurdant, B. (2012). *Communication scientifique et réflexivité*. Espaces réflexifs [carnet de recherche]. <http://reflexivites.hypotheses.org/695>
- Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams*. Chicago : University of Chicago Press.
- Knorr-Cetina, K. (1981). *The Manufacture of Knowledge*. New York : Pergamon Press.
- Knorr-Cetina, K. (2003). *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*. Cambridge : Harvard University Press.
- Kuhn, T. S. (1996 [1962]). *The Structure of Scientific Revolutions* (3ème ed.). Chicago : The University of Chicago Press.
- Kyndrup, M. (2018). « Facts » – and Representational Acts. Dans Philipsen, L. et Schmidt Kjærgaard, R. (dir.), *The Aesthetics of Scientific Data Representation: More than pretty pictures* (p. 123-132). New York : Routledge.
- Larivière, V. (2019). Le français, langue seconde ? De l'évolution des lieux et langues de publication des chercheurs au Québec, en France et en Allemagne. *Recherches sociographiques*, 59(3), 339–363. <https://doi.org/10.7202/1058718ar>
- Latour, B. (1987). *Science in Action: How to follow scientists and engineers through society*. Cambridge : Harvard University Press.
- Le Ru, V. (2017). La construction scientifique du temps. *Fabula*. <http://www.fabula.org/colloques/document4697.php>

- Lessard, M. et Zaccour, S. (2017)a. *Dictionnaire critique du sexisme linguistique*. Montréal : Éditions Somme toute.
- Lessard, M. et Zaccour, S. (2017)b. *Grammaire non sexiste de la langue française : Le masculin ne l'emporte plus !* Paris : M éditeur.
- Liddle, A. (2015). *An Introduction to Modern Cosmology* (3ème ed.). Wiley.
- Lüdi, G. (2015). Monolingualism and multilingualism in the construction and dissemination of scientific knowledge. Dans Ulrike J. et Kramsch C. J., *The Multilingual Challenge: Cross-Disciplinary Perspectives* (p. 213-238). Berlin : de Gruyter.
- Lüthy, C. et Smets, A. (2009). Words, Lines, Diagrams, Images: Towards a History of Scientific Imagery. *Early Science and Medicine*, 14, 398–439.
<https://doi.org/10.1163/157338209X425632>
- Lynch, M. (1985). Discipline and the Material Form of Images: An Analysis of Scientific Visibility. *Social Studies of Science*, 15(1), 37–66.
- Masterman, M. (1970). The Nature of a Paradigm. *Criticism and the Growth of Knowledge*, 4, 59–89.
- McCloud, S. (2007). *L'art invisible* (traduction de Dominique Petitfaux). Ligugé : Éditions Delcourt.
- Misner, C., Thorne, K. et Wheeler, J. (1973). *Gravitation*. San Francisco : W. H. Freeman and Company.
- Mosley, A. (2007). Objects, texts and images in the history of science. *Studies in History and Philosophy of Science*, 38, 289–302.
- Myers, G. (1995). Words and Pictures in a Biology Textbook. *The Journal of TESOL France* 2, 113–126. https://www.tesol-france.org/uploaded_files/files/TESOL%20V2N2%20C7%20Words%20and%20Pictures.pdf
- NASA, WMAP Science Team. (2006). Inflating the Universe [image en ligne]. Nasasearch, Astronomy Picture of the Day. <https://apod.nasa.gov/apod/ap060323.html>
- Nieman, A. (2000). *The Popularisation of Physics: Boundaries of Authority and the Visual Culture of Science* [thèse de doctorat : University of the West of England].
<http://library.uwe.ac.uk/cgi-bin/uwe/permalink/ckey/a1234212>
- Paty, M. (1994). Sur l'histoire du problème du temps : Le temps physique et les phénomènes. Dans Spiro, M. et Klein E. (dir.), *Le temp et sa flèche* (p. 21-58). Parie : Flammarion.
- Paty, M. (2001)a. Réflexions sur le concept de temps. *Revista de Filosofía*, 25, 53-92.
- Paty, M. (2001)b. Les concepts de la physique : contenus rationnels et constructions dans l'histoire. *Principia*, (5)1-2, 209–240.

- Peirce, C. S. (1867). Five Hundred and Eighty-Second Meeting. May 14, 1867. Monthly Meeting; On a New List of Categories. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 7, 287–298. <https://www.jstor.org/stable/20179567>
- Peirce, C. S. (s. d.). *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Edité par Hartshorne, C., Weiss, P. et Burks, A. W. (dir.), 8. Cambridge (Massachusetts) : Belknap.
- Pickering, A. (1984). *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*. Chicago : The University of Chicago Press.
- Pickering, A. (1989). Pragmatism in Particle Physics: Scientific and Military Interests in the Post-war United States. Dans James, F. (dir.), *The Development of the Laboratory: Essays on the Place of Experiments in Industrial Civilization* (p. 174-183). London : Macmillan Press.
- Pooley, O. (2008). Space and Time. Dans S. Psillos et M. Curd (dir.), *The Routledge Companion to Philosophy Of Science*. New York : Routledge.
- Prigogine, I. (1980). *From Being to Becoming*. New York : W. H. Freeman and Company.
- Qi, L. (2018). Data visualization as creative art practice. *Visual Communication*, 17(3), 299–312. <https://doi.org/10.1177/1470357218768202>
- Quintard, C. (2018). Voir pour savoir. *Les Grands Dossiers des Sciences Humaines*, 52(9), 15. <https://www.cairn.info/magazine-les-grands-dossiers-des-sciences-humaines-2018-9-page-15.htm>
- Rheinberger, H.-J. (1994). Representation in scientific practice. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 25(4), 647–654. [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(94\)90054-x](https://doi.org/10.1016/0039-3681(94)90054-x)
- Rosa, H. (2010). *Accélération: Une critique sociale du temps* (traduit par Didier Renault). Paris : La Découverte.
- Rosser, S. V. (1986). *Teaching Science and Health From A Feminist Perspective: A Practical Guide*. Pergamon.
- Sakurai, J. J. (1994). *Modern Quantum Mechanics*. California : Addison-Wesley Publishing Company.
- Samuel, N. (2018). The Epistemics of Data Representation : How to Transform Data into Knowledge. Dans Philipsen, L. et Schmidt Kjærgaard, R. (dir.), *The Aesthetics of Scientific Data Representation: More than pretty pictures*. New York : Routledge.
- Saouter, C. (2000). *Le langage visuel*. Montréal : Éditions XYZ.
- Saussure, F. (1978). *Cours de linguistique générale*. Paris : Payot.

- Schickore, J. (2007). *The Microscope and the Eye: A History of Reflections, 1740-1870*. Chicago : University of Chicago Press.
- Schroeder, D. (2000). *An Introduction to Thermal Physics*. Addison-Wesley Longman.
- Sharma, S. (2014). *In the Meantime: Temporality and Cultural Politics*. Duke University Press.
- Sismondo, S. (2008). Science and Technology Studies and an Engaged Program. Dans Hackett, E. J., Amsterdamska, O., Lynch M. et Wajcman, J. (dir.), *The Handbook of Science and Technology Studies* (3ème ed., p. 13-31). Cambridge : The MIT Press.
- Sonesson, G. (1998). Aniconic visual signs. Dans Bouissac, P. (dir.), *Encyclopedia of semiotics*. New York et Oxford: Oxford University Press.
- Sonesson, G. (1998). Chirography. Dans Bouissac, P. (dir.), *Encyclopedia of semiotics*. New York et Oxford: Oxford University Press.
- Sousanis, N. (2015). *Unflattening*. Boston : Harvard University Press.
- Springer. (s. d.) Figures and tables. Writing a journal manuscript. <https://www.springer.com/gp/authors-editors/authorandreviewertutorials/writing-a-journal-manuscript/figures-and-tables/10285530>
- Suárez, M. (2009). Scientific Representation. *Blackwell's Philosophy Compass*, 5(1), 91-101. <https://doi.org/10.1111/j.1747-9991.2009.00261.x>
- Taylor, E. et Wheeler, J. (1992). *Spacetime physics: Introduction to Special Relativity* (2ème ed.). New York : W. H. Freeman and Company.
- Taylor, J. R. (2005). *Classical Mechanics*. California : University Science Books.
- Teller, P. (2008). Scientific Representation. Dans Psillos S. et Curd, M. (dir.), *The Routledge Companion to Philosophy of Science*. New York : Routledge.
- Tiercelin, C. (1993). *C. S. Peirce et le pragmatisme*. Paris : Presses universitaires de France.
- Van Fraassen, B. C. (2006). Representation: The Problem for Structuralism. *Philosophy of Science*, 73, 536–547.
- Viennot, E. (2014). *Non, le masculin ne l'emporte pas sur le féminin! Petite histoire des résistances de la langue française*. Donnemarie-Dontilly : Les Éditions iXe.
- Weber, S. (2012). Visual Images in Research. Dans Knowles, G. et Cole, A. (dir.), *Handbook of the Arts in Qualitative Research: Perspectives, Methodologies, Examples, and Issues*. Thousand Oaks : SAGE Publications.

Weinert, F. (2013). *The March of time, Evolving Conceptions of Time in the Light of Scientific Discoveries*. Heidelberg : Springer.

Werner, G. (2015). The Technical Image: A History of Styles in Scientific Imagery. Dans Bredekamp, H., Dunkel, V. et Schneider, B. (dir.), *The Technical Image*. Chicago : The University of Chicago Press.

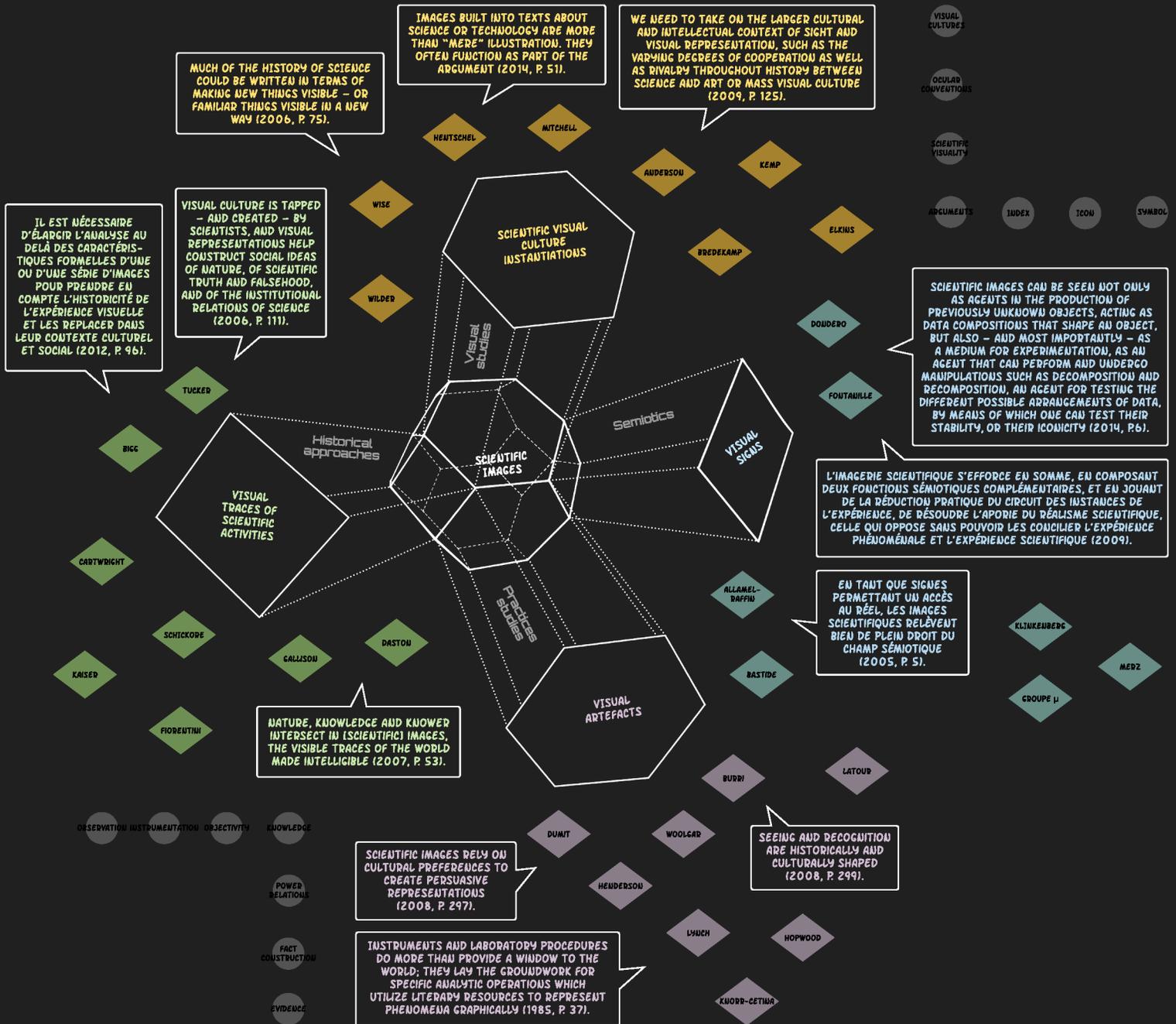
Wilder, K. (2011). Visualizing Radiation: The Photographs of Henri Becquerel. Dans Daston, L. et Lunbeck, E. (dir.), *Histories of Scientific Observation*. Chicago : The University of Chicago Press.

Wise, N. (2006). Making Visible. *Isis*, 97(1), 75–82. <https://doi.org/10.1086/501101>

Zeh, H. D. (2007). *The Physical Basis of the Direction of Time* (5ème éd.). Heidelberg : Springer.

Annexe A

Images agrandies pour une meilleure lisibilité. Contient respectivement les Figures 3, 9 et 12.

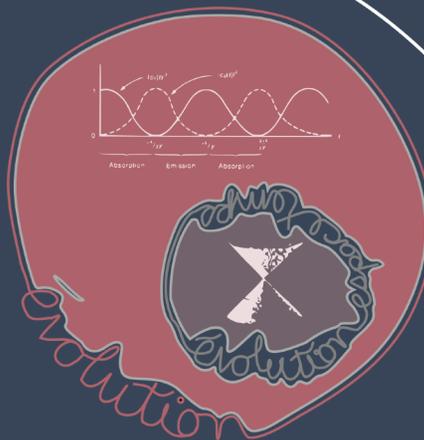
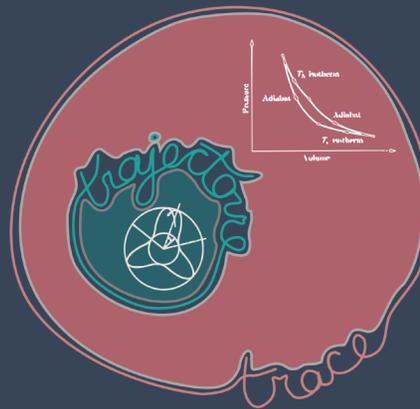
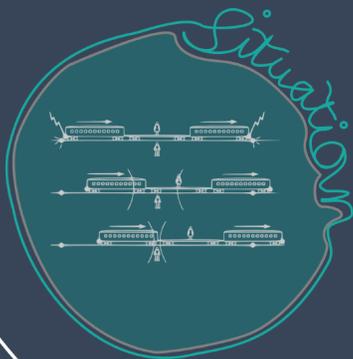


Implícite

Explícite

Image figurative

Diagramme



Degré d'abstraction

L'EP sert à représenter l'espace physique

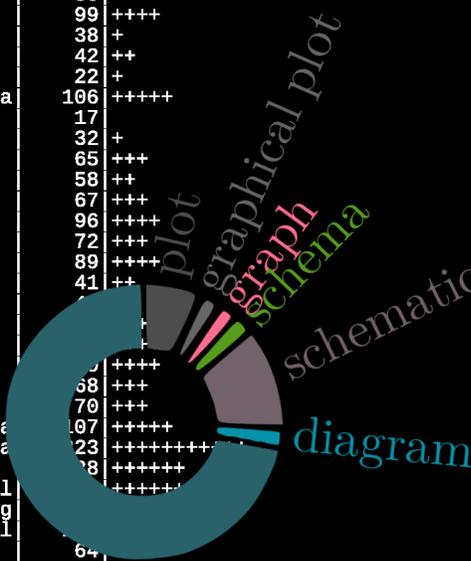
L'EP sert à représenter l'espace et le temps physique

L'EP sert à représenter autre chose que l'espace et le temps physique



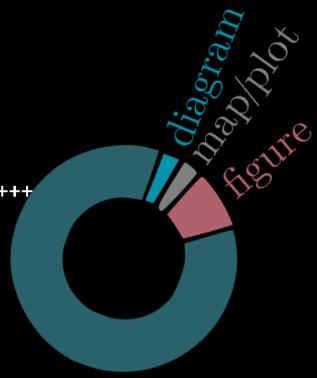
Sakurai

1		30	+
2		99	++++
3		38	+
4		42	++
5		22	+
6	dsa	106	++++
7		17	
8		32	+
9		65	+++
10		58	++
11		67	+++
12		96	++++
13		72	+++
14		89	++++
15		41	++
16			
17			
18			
19			
20		38	+++
21		70	+++
22	dsa	107	++++
23	dsa	23	+++++
24		8	+++++
25	gpl		+++++
26	g		
27	pl		
28		64	++++
29	dsa	63	+++
30		163	+++++
31		104	++++
32	dsa	37	+
33		200	+++++
34		65	+++
35	d	137	+++++
36	pl	203	+++++
37		137	+++++
38	pl	192	+++++
39		111	++++
40		296	+++++
41		87	++++
42		100	++++
43	sa	429	+++++



Goldstein

1		44	++
2		16	
3		17	
4		48	++
5	f	172	+++++
6		28	+
7		38	+
8		79	+++
9		53	++
10		84	++++
11		43	++
12		90	++++
13		69	+++
14		90	++++
15		65	+++
16		88	++++
17		137	+++++
18		204	+++++
19		169	+++++
20	mpl	213	+++++
21		103	++++
22		43	++
23	d	55	++
24		60	+++
25		69	+++
26		115	++++
27		192	+++++
28	f	72	+++
29		117	++++
30		55	++
31	f	256	+++++
32		244	+++++
33		159	++++
34		223	+++++



LÉGENDE

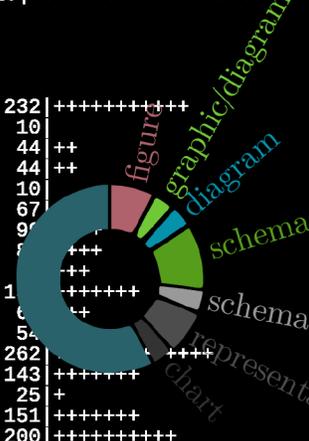
Titres sans identifiant de l'image

Titres contenant l'identifiant :

- chart
- diagram
- figure
- graph
- graphical plot
- graphic & diagram
- image
- map & plot
- plot
- representation
- schema
- schematic diagram
- schematic representation
- symbolic representation

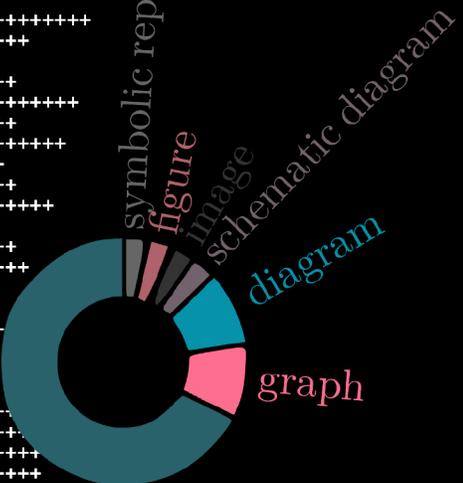
Callen

1	r	232	+++++
2	f	10	
3		44	++
4		44	++
5	f	10	
6		67	+++
7		9	
8	r	5	
9		1	
10		1	
11	d	6	
12	rsa	54	+++
13	sa	262	++++
14	c	143	++++
15		25	+
16		151	++++
17		200	++++
18	dfg	311	++++
19		26	+
20		49	++
21	sa	51	++
22		139	++++
23		76	+++
24	sa	42	++
25		52	++
26		228	++++



Schroeder

1	rsy	266	+++++
2		168	++++
3		94	+++
4		141	++++
5	g	258	++++
6		146	++++
7		231	++++
8		125	++++
9		154	++++
10		215	++++
11		45	++
12		157	++++
13		165	++++
14		69	+++
15	g	65	+++
16		214	++++
17	d	65	+++
18	d	58	++
19		118	++++
20	dsa	221	++++
21		246	++++
22	g	304	++++
23		182	++++
24		120	++++
25		377	++++
26		106	++++
27		218	++++
28	im	525	++++
29	d	771	++++
30		231	++++
31	f	400	++++



Annexe B

Passages de textes provenant des manuels et ayant fait l'objet d'une lecture proche.

Goldstein

p.2 | TIME & BASICS

« Basic to any presentation of mechanics are a number of fundamental physical concepts, such as space, time, simultaneity, mass, and force. For the most part however, these concept will not be analysed critically here; rather, they will be assumed as undefined terms whose meanings are familiar to the reader. »

p.73 | Fig. 3.2 | VISUAL EQUIVALENCE

« The conservation of angular momentum is thus equivalent to saying the areal velocity is constant. Here we have the proof of the well-known Kepler's second law of planetary motion: The radius vector sweeps out equal areas in equal times. It should be emphasized however that the conservation of areal velocity is a general property of central force motion and is not restricted to an inverse-square law of force. »

Sakurai

p.129 | Fig. 2.6 | OBSERVATION

« It is extraordinary that such an effect has indeed been observed experimentally; see Figure 2.6 taken from a 1975 experiment of R. Colella, A. Overhauser, and S. A. Werner. The phase shift due to gravity is seen to be verified to well within 1%. »

p.5-6 | MENTAL PICTURE

« How can we explain this ? Does it mean that 50% of the atoms in the $S_z +$ beam coming out the first apparatus (SG_2) are made up of atoms characterized by both $S_z +$ and $S_x +$, while the remaining 50% have both $S_z +$ and $S_z -$? It turns out that this picture runs into difficulty, as will be shown below. »

« The model in which the atoms entering the third apparatus are visualised to have both $S_z +$ and $S_x +$ is clearly unsatisfactory. »

p.303 & 390 | Fig. 5.1 & Fig. 7.4 | VOCABULARY

« Schematically the energy levels are as shown in Figure 5.1. »

« A physical interpretation of (7.2.23) is given in Figure 7.4, where the incident wave interacts at x' --which explains the appearance of $V(x')$ --and then propagates from x' to x via Green's function for the Helmholtz equation (7.1.18); subsequently, a second interaction occurs at x' --thus the appearance of $V(x')$ --and finally, the wave is scattered into the direction k' . In other words, $f^{(2)}$ corresponds to scattering view as a two-step process; likewise, $f^{(3)}$ is viewed as a three-step process, and so on. »

p.116-117 | Fig. 2.1 | VISUALISATION

« To visualize this pictorially, we consider a space-time plane, as shown in Figure 2.2. »

p.125 | Fig 2.4 | ILLUSTRATION

« Even though the choice of the absolute scale of the potential is arbitrary, potential differences are of non-trivial physical significance and, in fact, can be detected in a very striking way. To illustrate this point, let us consider the arrangement shown in Figure 2.4.

« A particle in the beam can be visualized as a wave packet whose dimension is much smaller than the dimension of the cage. »

p.223-224 & 423 | Fig 3.8 & 7.13 | PICTORIALITY

« The simplest example of angular-momentum addition we encountered in section 3.7 was concerned with a composite system made up of spin 1/2 particles. In this section we use such a system to illustrate one of the foremost astonishing consequences of quantum mechanics. »

« To be more pictorial we consider a system of two spin 1/2 particles moving in opposite directions, as in Figure 3.8. »

« Pictorially, we have the situation illustrated in Figure 7.13a. »

p.403-404 | Fig 7.6 | SELF-EXPLANATORY

« We plot kf_1 in a complex plane, as shown in Figure 7.6, which is self-explanatory if we note from (7.6.16) that $kf_1 = i/2 + 1/2e...$ »

p.419 | Fig. 7.12 | INSTRUCTIVE

« It is instructive to verify this point with explicit calculations for some known potential. The result of numerical calculation shows that a response behavior is in fact possible for $l \neq 0$ with a spherical-cell potential. »

p.470 | Fig. S.2. | CONFIRMATION

« Thus, the validity of (S.23) for the Berry's phase was confirmed (see Fig. S.2). »

p.466 | TIME-REVERSAL SYMMETRY

« In this section we study another discrete symmetry operator, called time reversal. This is a difficult topic for the novice, partly because the term time reversal is a misnomer; it reminds us of science fiction. Actually what we do in this section can be more appropriately characterized by the term reversal of motion. »

« Suppose there is a trajectory of a particle subject to a certain force field; see Figure 4.9. At $t=0$, let the particle stop and reverse its motion: $p|_{t=0} \rightarrow -p|_{t=0}$. The particle traverses backward along the same trajectory. If you run the motion picture of trajectory (a) backward as in (b), you may have a hard time telling whether this is the correct sequence. (...) we do not have a dissipative force here. A block sliding on a table decelerates (due to friction) and eventually stops. But have you ever seen a block on a table spontaneously start to move and accelerate? With a magnetic field you may be able to tell the difference. Imagine that you are taking the motion picture of a spiraling electron trajectory in a magnetic field. You may be able to tell whether the motion picture is run forward or backward by comparing the sense of rotation with the magnetic pole labeling N and S. However, from a microscopic point of view, B is produced by moving charges via an electric current; if you could reverse the current that causes B, then the situation would be quite symmetrical. In terms of the picture shown in Figure 4.10, you may have figured out that N and S are mislabeled! »

Misner

p.212 | Fig. 8.3 | VOCABULARY

« ...schematically portrayed. »

p.236 | Box 9.2 | VISUALISATION

« A. Pictorial representation in Flat Spacetime

1. For ease of visualization, consider flat spacetime, so the two vector fields $u(P)$ and $v(P)$ can be laid out in spacetime itself. (...)

3. Give the names P_1, P_2, P_3, P_4 to the events pictured in the diagram. (...)

B. Pictorial representation in Absence of Metric, or in Curved Spacetime with a metric

1. The same picture must work, but now one dares not (at least initially) lay out the vector fields in spacetime itself. »

p.143 | Fig. 5.3 | DEPICTING

« Figures (b), (c), (d), and (e) depict examples to which the text applies this law of conservation of 4-momentum. »

p.779 | Fig. 28.1 | SUMMARIZING

« In Figure 28.1, where the past evolution of the universe is summarized, one can freely replace the horizontal... »

p.393 | RODS, CLOCKS & PENDULUM

« Turn attention now from the laws of physics in the presence of gravity to the nature of the rods and clocks that must be used for measuring the length and time intervals appearing in those laws. One need not—and indeed must not!—postulate that proper length s is measured by a certain type of rod (e.g., platinum meter stick), or that proper time τ is measured by a certain type of clock (e.g., hydrogen-maser clock). Rather, one must ask the laws of physics themselves what types of rods and clocks will do the job. Put differently, one defines an "ideal" rod or clock to be one which measures proper "Ideal" rods and clocks length as given by $ds = (g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta)^{1/2}$ or proper time as given by $d\tau = (-g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta)^{1/2}$ (the kind of clock to which one was led by physical arguments in §1.5). One must then determine the accuracy to which a given rod or clock is ideal under given circumstances by using the laws of physics to analyze its behavior.

As an obvious example, consider a pendulum clock. If it is placed at rest on the Earth's surface, if it is tiny enough that redshift effects from one end to the other and time dilation effects due to its swinging velocity are negligible, and if the accuracy one demands is small enough that time variations in the local gravitational acceleration due to Earth tides can be ignored, then the laws of physics report (Box 16.2) that the pendulum clock is "ideal." However, in any other context (e.g., on a rocket journey to the moon), a pendulum clock should be far from ideal. Wildly changing accelerations, or no acceleration at all, will make it worthless! »

p.394 | CLOCKS

« Of greater interest are atomic and nuclear clocks of various sorts. Such a clock is analyzed most easily if it is freely falling. One can then study it in its local Lorentz rest frame, using the standard equations of quantum theory; and, of course, one will find that it measures proper time to within the precision ($\Delta t/t \sim 10^{-9}$ to 10^{-14}) of the technology used in its construction. However, one rarely permits his atomic clock to fall freely. (The impact with the Earth's surface can be expensive!) Nevertheless, even when accelerated at "1 g" = 980 cm/sec² on the Earth's surface, and even when accelerated at ~g" in an airliner trying to avoid a midair collision, an atomic clock—if built solidly—will still measure proper time $dr = -gap dx^* dx \&I/2$ along its world line to nearly the same accuracy as if it were freely falling. To discover this one can perform an experiment. Alternatively, one can analyze the clock in its own "proper reference frame" (§13.6), with Fermi-Walker-transported basis vectors, using the standard local Lorentz laws of quantum mechanics as adapted to accelerated frames (local Lorentz laws plus an "inertial force," which can be treated as due to a potential with a uniform gradient. Of course, any clock has a "breaking point," beyond which it will cease to function properly (Box 16.3). But that breaking point depends entirely on the construction of the clock—and not at all on any "universal influence of acceleration on the march of time." Velocity produces a universal time dilation; acceleration does not. »

p.393 | HUMAN CLOCKS

« The aging of the human body is governed by the same electromagnetic and quantum-mechanical laws as govern the periodicities and level transitions in atoms and molecules. Consequently, aging, like atomic processes, is tied to proper time as governed by the metric—though, of course, it is also tied to other things, such as cigarette smoking. In principle, one can build ideal rods and clocks from the geodesic world lines of freely falling test particles and photons. (See Box 16.4.) In other words, spacetime has its own rods and clocks built into itself, even when matter and nongravitational fields are absent! »

Taylor

p.138 | Fig. 5-1 | SPACETIME DIAGRAM

« Yes, it is nonsense to attribute a kilometer reading to Tokyo. However, it is not at all nonsense to make a map showing where Tokyo lies relative to the towns roundabout, a map in which kilometers do appear, kilometers north and south, kilometers east and west. Likewise, the term "the time" of an event is totally without meaning. However, that event—and every event near it—lends itself to display on a spacetime diagram (Figure 5-1), with distance (the locator of latticework clock) running in one direction and in another direction time (the reading printed out by that clock on the occasion of that event). Time as employed in this sense acquires meaning only because it serves as a measure on a latticework-defined map. A different latticework? A different set of clocks, different readings on those clocks, a different map—but same events, same spacetime, same tools to measure the history-dependent interval between event and event. Only such a spacetime plot does one see at a glance the layout of all nearby events, and how one history of travel from event A to event B differs from another. One problem in making our map: Spacetime has four dimensions—three space dimensions plus time. We picture our event points most readily when they occupy a two-dimensional domain and let themselves be dotted in on a two-dimensional page. Therefore for the present we limit attention to time and one space dimension; to events, whatever their timing, that occur on one line in space. All events that do not occur on this line we ignore for now. The space location of each event on this line we plot along a horizontal axis on the page. The lattice-clock time as which an event occurs we plot along a vertical axis, from bottom to top of the page. Space and time we measure in the same unit, for example meters of distance and meters of time—or light-years of distance and years of time. We call the result a spacetime map or a spacetime diagram. Each spacetime map represents data from a particular reference frame, for example "the laboratory frame." Figure 5-1 shows such a spacetime map. Five sample event points appear on the laboratory spacetime map of Figure 5-1, events labeled O, A, B, C, and D.»

Callen

p.7 | Fig 1.1 | VOCABULAR

« Three such normal modes are indicated schematically in Fig. 1.1. »

p.67 | Fig 3.1 | GRAPHICALLY EVIDENT

« These statements are graphically evident if we focus, for instance, on the dependence of U on S at constant V and N . Let that dependence be as shown in the Fig. 3.1(a); for each point on the $U(S)$ curve, there is a definite U and a definite slope $T = \text{del}U/\text{del}S$, determining a point on the $U(T)$ curve (an equation of state) and we seek to recover the fundamental $U(S)$ curve. Each of the dotted curves differ by an arbitrary displacement, corresponding to the arbitrary "constant of integration" in the solution of the differential equation $U = U(\text{del}U/\text{del}S)$. Thus, Fig. 3.1(a) implies Fig. 3.1(b), but the reverse is not true. Equivalently stated, only $U = U(S)$ is a fundamental relation. The formal structure is illustrated by consideration of several specific and explicit systems in the following Sections of this book. »

p.182-183 | Fig 7.1 | MENTAL DEVICE

« A mnemonic diagram to be described in Section 7.2 provides a mental device for recalling relations of this form. (...) A number of the most useful Maxwell relations can be remembered conveniently in terms of a simple mnemonic diagram. »

« This diagram was presented by Professor Max Born in 1929 in a lecture heard by Professor Tisza. It appeared in the literature in a paper by F. O. Koenig... » (note de bas de page)

p.5-6 | TIME SCALE

« The key to the simplicity of macroscopic description, and the criterion for the choice of thermodynamic coordinates, lies in two attributes of macroscopic measurement. Macroscopic measurements are extremely slow on the atomic scale of time, and they are extremely coarse on the atomic scale of distance. »

« Only those few particular combinations of atomic coordinates that are essentially time independent are macroscopically observable. »

p.307 | PHYSICS OF BECOMING (TD)

« As useful as the characterization of equilibrium states by thermostatics theory as proven to be, it must be conceded that our primary interest is frequently in processes rather than in states. »

« The extension of thermodynamics that as reference to the rates of physical processes is the theory of irreversible thermodynamics. Irreversible thermodynamics is based on the postulates of equilibrium thermostatics plus the additional postulate of time reversal symmetry of physical laws. This additional postulate states that the laws of physics remain unchanged if the time t is everywhere replaced by its negative $-t$, and if simultaneously the magnetic field B_c is replaced by its negative $-B_c$ (and, if the process of interest is one involving the transmutation of fundamental particles, that the charge and "parity" of the particles also be reversed in sign [unuseful here].) »

Schroeder

p.55 | Fig 2.1 | GRAPHICAL PROOF

« To prove this formula, let me adopt the following graphical representation of the microstate of an Einstein solid: I'll use a dot to represent the microstate in which the first oscillator has one unit of energy, the second oscillator has three, the third oscillator has none, and the fourth oscillator has four. Notice that any microstate can be represented uniquely in this way, and that every possible sequence of dots and lines corresponds to a microstate. There are always q dots and $N - 1$ lines, for a total of $q + N - 1$ symbols. Given q and N , the number of possible arrangements is just the number of ways of choosing q of the symbols to be dots, that is, $(q+N-1 | q)$. »

p.58 | Fig 2.1 | VOCABULARY

« Using a computer spreadsheet program, or comparable software, or perhaps even a graphing calculator, you should be able to reproduce the table and graph in Figure 2.4 without too much difficulty »

p.69 | Fig 2.9 | PICTURING

« But the number of independent wavefunctions (in a technical sense that's defined in Appendix A) is finite, if the total available position space and momentum space are limited. I like to picture it as in Figure 2.9. »

p.358 REPRESENTATION

« But there is also plenty of more direct evidence for quantum mechanics, that is, for the idea that neither a wave model nor a particle model is adequate to understand matter and energy at the atomic scale. »

p.382-383 PICTURE AND UNREAL

« Fundamentally, of course, phonons are not "real" particles: Their wavelength and energies are limited by the nonzero atomic spacing in the crystal lattice, and they behave simply only when their wavelengths are much larger than this distance. For this reason, phonons are called quasiparticles. Still, the phonon picture provides a beautiful accurate description of the low-energy excitations of a crystal. »

p.58 TIME SCALE

« The concept of "accessible," like that of "macrostate," depends on the time scale under consideration ».

p.2-3 TEMPERATURE AND TIME

« The most familiar concept in thermodynamics is temperature. It's also of the trickiest concepts – I won't be ready to tell you what temperature really is until Chapter 3. For now, however, let's start with a very naive definition: Temperature is what you measure with a thermometer. »

« Temperature is the thing that's the same for two objects, after they've been in contact long enough. I'll refer to this as the theoretical definition of temperature.»

« The time required for a system to come to thermal equilibrium is called the relaxation time. »

p.49-59 SECOND LAW

« What is temperature, really, and why does heat flow spontaneously from a hotter object to a cooler object, never the other way? More generally, why do so many thermodynamic processes happen in one direction but never reverse? This is the Big question of thermal physics, which we now set out to answer. In brief, the answer is this: Irreversible processes are not inevitable, they are just overwhelmingly probable. »

« We have also stumbled upon a new law of physics: the spontaneous flow of energy stops when a system is at, or very near, its most likely macrostate, that is, the macrostate with the greatest multiplicity. This "law of increase of multiplicity" is one version of the famous second law of thermodynamics. Notice, though, that it's not a fundamental law at all--it's just a very strong statement about probabilities. »

p.82-83 END AND THE BEGINNING OF TIME

« Most of the process we observe in life involve large entropy increases and are therefore highly irreversible: sunlight warming the earth, wood burning in the fireplace, metabolism of nutrients in our bodies, mixing ingredients in the kitchen. Because the total entropy of the universe is constantly increasing, and can never decrease, some philosophically inclined physicists have worried that eventually the universe will become a rather boring place: a homogeneous fluid with the maximum possible entropy and no variations in temperature or density anywhere. At the rate we're going, though, this "heat death of the universe" won't occur any time soon; our sun, for instance, should continue to shine brightly for at least another five billion years. »

« It may be more fruitful to ask instead about the beginning of time. Why did the universe start out in such an improbable, low-entropy state, so that after more than ten billion years it is still so far from equilibrium? Could it have been merely a big coincidence (the biggest of all time)? Or might someone, someday, discover a more satisfying explanation? »

Annexe C

Programme pour l'analyse des titres d'images.

```
# Caractérisation des N titres d'images (taille, nombre et composition)
import numpy as np

def types(titre, listeMot, listeType):
    """Retourne la liste des types associe au titre.
    """
    types_ = "" # tous les types
    for mot, type_ in zip(listeMot, listeType): # boucle sur pour chaque mot
        # si le mot se trouve dans le titre, on ajoute le type
        if mot.lower() in titre.lower():
            types_ += type_
    return types_

def lenTitres(data):
    """ Denombre les caractères (avec espaces).
    """
    return [len(x) for x in data]

def lenMaxTitre(data):
    """Trouve la longueur maximale.
    """
    return max(lenTitres(data))

def numLignes(data):
    """Retourne une liste des numeros de ligne.
    """
    # on enumere a partir de 1
    return list(range(1, len(data) + 1))

# Creation des tableaux
nomManuel = ['Schroeder', 'Callen', 'Bjorken', 'Taylor', 'Hartle', 'Misner',
             'Sakurai', 'Goldstein']
nNom = len(nomManuel)
nColonne = 3 # nombre de colonnes dans le tableau final

# vocables des auteurs
listeMot = ['chart', 'diagram', 'figure', 'graph', 'illustration', 'image',
            'map', 'picture', 'plot', 'representation', 'symbol', 'schema',
            'scheme', 'visualisation']

# identifiants des vocables
listeType = ['c', 'd', 'f', 'g', 'i', 'im', 'm', 'p', 'pl', 'r', 'sy', 'sa',
             'se', 'v']
```

```

for nom in nomManuel: # boucle pour chaque livre
# lire le fichier
titres = np.genfromtxt(
    nom + '.txt', encoding='utf8', delimiter='@', dtype=str)

# generer le tableau de resultats
resultats = [[titre, types(titre, listeMot, listeType), len(titre)]
    for titre in titres]

# chaine de '+' pour visualiser longueur des titres
# on divise par 20 pour normaliser
plus = ['+' * (j // 20) for j in lenTitres(titres)]

# tableau resume (sans les titres)
resume = []
for j, (resultat, plus_ce_titre) in enumerate(zip(resultats, plus)):
    resume.append([j + 1, resultat[1], resultat[2], plus_ce_titre])

# Creation des fichiers textes de donnees
np.savetxt(nom + '_classify.txt', resultats, header=nom, delimiter='|',
    fmt=('%i' + str(lenMaxTitre(titres)) + 's', '%6s', '%6s'))

# Visualisation des resultats (tableaux resumes)
np.savetxt(nom + '_resume.txt', resume, header=nom, delimiter='|',
    fmt=('%6s', '%6s', '%6s', '%s'))

```