

Université de Montréal

L'étalonnage des instruments de mesure en physique
expérimentale

Le cas du télescope spatial James Webb

Par

Carlo Calvi

Département de philosophie, Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise

en philosophie, option Recherche

Août 2023

©Carlo Calvi, 2023

Université de Montréal

Département de philosophie, Faculté des arts et des sciences

Ce mémoire intitulé

L'étalonnage des instruments de mesure en physique expérimentale

Le cas du télescope spatial James Webb

Présenté par

Carlo Calvi

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Christian Leduc

Président-rapporteur

Molly Kao

Directrice de recherche

Jonathan Simon

Membre du jury

Résumé

Philosophes et scientifiques ont souvent adopté la version orthodoxe de l'étalonnage qui consiste à normaliser un instrument en utilisant un phénomène connu. Le lien essentiel entre concepts théoriques et données empiriques, en philosophie de la mesure, a engendré la formulation de principes de coordination, synthétiques a priori, et révisables. La pensée operationaliste a voulu limiter l'étendue des concepts aux opérations de mesure effectivement réalisables. La perspective cohérentiste en philosophie de la mesure a opéré une récupération de l'épistémologie coordinationniste et de l'opérationnalisme, en s'appuyant sur un nombre minime de principes ontologiques. Les modèles d'un instrument impliquent un engagement à la séparation entre les théories idéalisées et les choses matérielles. Toutefois, philosophes et métrologues ont préconisé l'exigence d'un riche contenu théorique dans la modélisation des instruments de mesure. Selon d'autres contributions, le privilège épistémique de la mesure précède une théorie d'arrière-plan et sa robustesse réside dans le libre contact avec les données empiriques. De plus, le régime d'applicabilité d'une théorie dicte ses conditions aux limites, qui guident l'expérimentateur dans la conception d'instruments de mesure et fournissent le fondement de l'opérationnalisation du sens des termes théoriques. Je soutiens un pluralisme opérationnel, des opérations de mesure impliquant différents indicateurs physiques, accompagné d'un cohérentisme dynamique. Le programme d'étalonnage du télescope spatial James Webb est un cas significatif. Les observations des étoiles d'étalonnage par différents procédés sont utilisées pour calculer les facteurs qui convertissent une mesure en unités instrumentales en unités physiques.

Mots-clés : étalonnage, mesure, opérationnalisme, cohérentisme, coordination, modélisation, physique, néokantisme.

Abstract

Philosophers and scientists have often adopted the orthodox version of calibration which involves standardizing an instrument using a known phenomenon. The essential link between theoretical concepts and empirical data, in the philosophy of measurement, has generated the formulation of principles of coordination, synthetic a priori, and revisables. Operationalist thinking wanted to limit the scope of concepts to operations of measurement that are actually achievable. The coherentist perspective in the philosophy of measurement has operated a recovery of coordinationist epistemology and operationalism, relying on a minimal number of ontological principles. Models of an instrument involve a commitment to separation between idealized theories and material things. However, philosophers and metrologists have advocated the requirement of a rich theoretical content in the modeling of measuring instruments. According to other contributions, the epistemic privilege of measurement precedes a background theory and its robustness lies in the free contact with empirical data. Moreover, the applicability regime of a theory dictates its boundary conditions, which guide the experimenter in the design of measuring instruments and provide the basis for operationalizing the meaning of theoretical terms. I support operational pluralism, measurement operations involving different physical indicators, accompanied by dynamic coherentism. The James Webb Space Telescope calibration program is a significant case. Observations of calibration stars by various methods are used to calculate the factors that convert a measurement in instrumental units to physical units.

Keywords: calibration, measurement, operationalism, coherentism, coordination, modelling, physics, neo-Kantianism.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Table des matières	5
Liste des figures	7
Liste des tableaux	8
Liste des sigles et abréviations	9
Remerciements	11
Introduction - La fonction épistémique de l'étalonnage dans les discussions philosophiques contemporaines sur la mesure	12
1.1-La détection des ondes gravitationnelles dans les années 70.....	13
1.2-Briser la régression des expérimentateurs en faisant appel aux faits matériels.....	16
1.3-Les philosophes de la mesure et la vision orthodoxe.....	18
1.4-Les rôles épistémiques de l'étalonnage.....	20
1.5-Étalonnage, cohérence et consilience	22
1.6-La nature de la justification, fondationnalisme et cohérentisme.....	23
Les principes de coordination	26
2.1-L'axiomatisation empirique de Hilbert.....	28
2.2-L'approche axiomatique de Reichenbach.....	30
2.3-Une méthode d'approximations successives	32
2.4-Le lien entre la réalité et sa description scientifique.....	34
Appliquer avec succès le pluralisme opérationnel	37
3.1- La prudence empiriste de Bridgman inspirée de la théorie de la relativité restreinte	37
3.2-Les principes ontologiques nécessaires à la mesure physique.....	43

Des procédés basés sur les modèles et l'épistémologie de la mesure	51
4.1-Structure inférentielle des procédures d'étalonnage.....	53
4.2-Les cas paradigmatiques d'étalonnage.....	59
4.3-Le privilège épistémique de la mesure.....	62
À la recherche de solutions	68
5.1-Mettre une théorie à l'épreuve	70
5.2-La cinématique d'une théorie fonde la modélisation des mesures	74
5.3-Philosophie de la mesure et détections directes et dérivées.....	79
5.4-Un problème de circularité épistémique	82
Pluralisme opérationnel et étoiles d'étalonnage.....	85
6.1-Les premières données du télescope spatial James Webb et l'évolution de son processus d'étalonnage.	90
6.2-Outils et étalonnages pour la photométrie et l'astrométrie ponctuelles de précision	94
6.3-Les images d'étalonnage de l'astéroïde de la ceinture principale.....	99
6.4-La performance scientifique du télescope spatial James Webb par rapport aux attentes de pré-lancement	101
Conclusion.....	104
Références bibliographiques	106

Liste des figures

Figure 1 - L'antenne à ondes gravitationnelles de Weber(Franklin 1994)	13
Figure 2 - Cinq procédures de la mesure de l'aplatissement polaire de la Terre(Ohnesorge 2022)	88

Liste des tableaux

Tableau 1 - Modes d'observation du télescope spatial James Webb(Gordon 2022).....93

Liste des sigles et abréviations

iREx : Institut Trottier de recherche sur les exoplanètes iREx

LHC : Grand collisionneur d'hadrons

LIGO : Interféromètre géant (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

MIRI : Mid-Infrared Instrument

NIRCam : Near Infrared Camera

NIRISS : Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph

PSF : Fonction d'étalement du point (point spread function)

JWST : Télescope spatial James Webb

À mes enfants Roberto et Nicola

Remerciements

Je suis vivement reconnaissant envers ma directrice Molly Kao pour ses conseils et son soutien pendant la rédaction de ce mémoire. J'ai tiré profit de l'accès à la communauté des participants aux problématiques de philosophie et d'histoire de la mesure scientifique, notamment à Berlin, Cambridge et Boston. Je tiens également à mentionner l'Institut Trottier de recherche sur les exoplanètes iREx à l'Université de Montréal et la Conférence Spatiale canadienne à Polytechnique Montréal. La philosophie est à son mieux lorsqu'elle interagit avec d'autres expressions du savoir.

Introduction - La fonction épistémique de l'étalonnage dans les discussions philosophiques contemporaines sur la mesure

La notion d'étalonnage désigne une stratégie qui sert à établir qu'une technique ou un instrument fonctionne comme prévu et contribue à justifier la validité des connaissances scientifiques fondées sur l'expérience. Une technique d'observation est considérée comme acceptable uniquement dans la mesure où on peut s'y fier pour produire des représentations ou des indicateurs précis de ses cibles. C'est pourquoi les procédures d'observation en général, et les instruments en particulier, doivent être étalonnés.

Le terme étalonnage est utilisé de diverses manières dans différentes disciplines. La définition plus pertinente relève de la métrologie, la science de la mesure. Dans le Vocabulaire international de la Métrologie, l'étalonnage est défini comme suit :

L'opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication.

Par exemple, un simple pied à coulisse convertit le diamètre d'un objet placé entre ses mâchoires en une lecture numérique([Tal 2017](#)).

Le point de vue parmi les philosophes et les scientifiques semble être que l'étalonnage n'est que sa définition orthodoxe. Cela stipule qu'une expérience d'étalonnage standard pour un instrument ou une méthode utilise une entrée de caractère connu pour montrer que l'instrument ou la méthode donne la sortie correcte. L'élargissement d'un compte rendu de la fonction épistémique de l'étalonnage, au-delà de son application orthodoxe, aide à valoriser certains des récits plus attentifs de l'étalonnage, en particulier dans les discussions philosophiques contemporaines sur la mesure.

La définition orthodoxe de l'étalonnage est associée au célèbre différend entre l'historien de la physique Allan Franklin et le sociologue britannique Harry Collins.

1.1-La détection des ondes gravitationnelles dans les années 70.

Selon la théorie générale de la relativité, des ondes gravitationnelles devraient être émises lorsque des étoiles explosent ou entrent en collision. Le physicien Joseph Weber était le premier à revendiquer la détection des oscillations qui en découlent, quarante-cinq ans avant les collaborations LIGO et Virgo d'aujourd'hui, grâce à un système de barres résonnantes. Weber a suspendu une barre massive qu'il a isolée de toutes les forces connues. Il a comparé les vibrations dans la barre avec les vibrations dans des barres similaires séparées par des centaines de kilomètres. Lorsque les barres séparées vibraient en simultanéité, cela était considéré comme une preuve de l'existence d'ondes gravitationnelles.

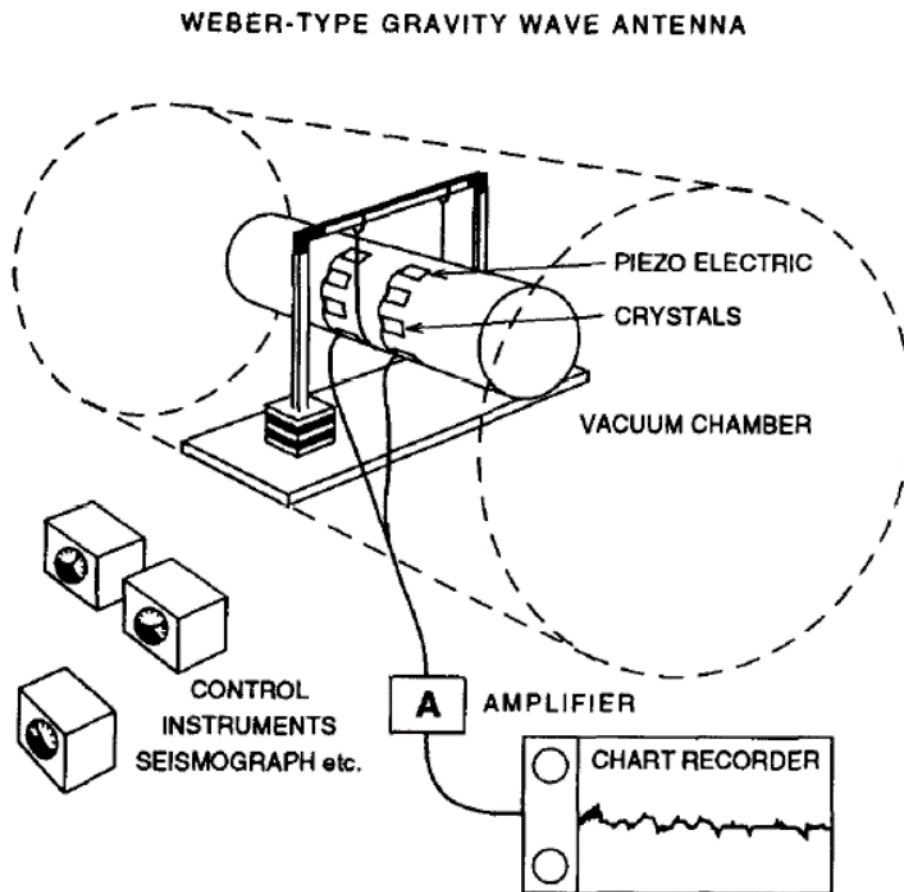


Figure 1 - L'antenne à ondes gravitationnelles de Weber([Franklin 1994](#))

La communauté scientifique de l'époque a tranché en défaveur de la détection des ondes gravitationnelles par Joseph Weber.

Ce que Harry Collins a appelé la régression des expérimentateurs renvoie à un cercle vicieux. Pour savoir qu'un appareil, une technique ou une méthode expérimentale est fiable, il faut savoir que ses résultats sont fiables, mais pour savoir que les résultats sont fiables, il faut savoir que l'appareil, la technique ou la méthode sont fiables ([Collins 1994](#)). Selon Harry Collins, l'étalonnage consiste en l'utilisation d'un signal de substitution, un phénomène connu, pour standardiser un instrument.

Suivant Collins, l'étalonnage était assuré par la présomption d'une similitude entre l'effet d'un signal de substitution et le signal inconnu qui doit être mesuré avec l'instrument. Toutefois, il a insisté sur le fait que les scientifiques ne s'interrogent pas suffisamment sur l'adéquation du signal témoin. Collins a nié l'existence de repères formels et autonomes pour consentir à l'étalonnage de statuer sur le correct fonctionnement d'un appareil. Cette critique était pour lui particulièrement appropriée quand un nouvel appareil est utilisé pour détecter un phénomène qui n'a pas fait l'objet d'observations antérieurement. Se référant à l'histoire de la controverse sur la détection des ondes gravitationnelles au début des années 70, Collins a fait remarquer qu'aucune expérience n'a pu fournir un support indépendant de l'adéquation d'un signal de substitution. Par conséquent, l'étalonnage ne permet pas pour lui d'échapper à la régression des expérimentateurs.

Allan Franklin a contesté le récit de Collins sur la détection des ondes gravitationnelles, mais il n'a pas contredit la représentation de Collins sur l'étalonnage orthodoxe. Pour Franklin aussi, l'étalonnage est l'utilisation d'un signal de substitution pour uniformiser un instrument et pour établir l'exactitude et la validité des résultats expérimentaux. Si un appareil génère des phénomènes éprouvés, cela renforce légitimement la conviction que l'appareil fonctionne correctement et que les résultats expérimentaux produits avec cet appareil sont fiables. Il s'est toutefois opposé à la thèse de Collins sur la régression de l'expérimentateur. En principe l'étalonnage nous permet de briser le cercle vicieux.

Le but d'Allan Franklin était de montrer que le compte-rendu de la détection des ondes gravitationnelles dans les années 70 par Harry Collins était incorrect([Franklin 1994](#)). Franklin a utilisé de nombreux arguments pour montrer que si la communauté scientifique a tranché en défaveur de la détection par Joseph Weber, c'était sur la base de plusieurs stratégies réfléchies en garantie de la validité de leurs résultats expérimentaux.

Les responsables des expériences critiques de la détection d'ondes gravitationnelles obtenue par Weber, avaient étalonné leur appareil en insérant des sources acoustiques connues d'énergie pulsée.

L'instrument de Weber n'avait pas réussi à détecter les impulsions acoustiques utilisés par les expériences de ses opposants pour étalonner leurs propres instruments. Ils avaient utilisé de façon indépendante la procédure d'analyse de Weber pour traiter leurs résultats sans obtenir de détections. Les scientifiques opposés à Weber avaient également manifesté des doutes sur la disposition des instruments de Weber à déterminer des coïncidences aussi serrées des vibrations de barres résonnantes écartées, d'une façon semblable à celles qu'il disait d'avoir constatées.

L'algorithme de Weber était moins susceptible à la détection d'impulsions conformes à celles que la radiation gravitationnelle est censée manifester selon la théorie. La communauté scientifique avait basé sa contestation de l'expérience positive de détection opérée par Weber sur des critères de connaissance solides. Franklin a souligné que les physiciens avaient scrupuleusement examiné l'affinité du signal de substitution, utilisé pour étalonner leur instrument, et qu'ils avaient des raisons expérimentales valides pour penser qu'il s'agissait d'un substitut approprié. Franklin a argumenté que l'adéquation d'un signal témoin du phénomène recherché, devient déterminante dans le cas où un nouvel appareil serait utilisé pour découvrir un phénomène encore jamais observé.

Les physiciens reconnaissent des étalonnages problématiques. Allan Franklin([Franklin 1997](#)) les a appelés des cas d'étalonnage en un sens large. Ils éclaircissent les raisonnements des scientifiques sur les procédures d'étalonnage réalisées. Autre que les vérifications du fonctionnement des appareils, d'éventuelles sources d'arrière-plan dissimulant le phénomène recherché. Les procédures d'analyses des données expérimentales sont méticuleusement examinées.

Dans certains cas, la question du caractère approprié de l'étalonnage est difficile à décider, notamment dans les cas de résultats discordants ou d'un nouveau type d'instrument utilisé afin d'examiner un phénomène jamais détecté auparavant. La proche similitude du signal de substitution avec le signal recherché implique une réflexion critique élargie.

Franklin est demeuré toutefois partisan de l'étalonnage orthodoxe, qui comporte l'utilisation d'un signal de substitution ou signal témoin, pour standardiser un instrument. Il a dressé une liste de stratégies que les scientifiques doivent utiliser pour plaider en faveur de l'exactitude de leurs résultats. Cela inclut l'utilisation des résultats eux-mêmes pour plaider en faveur de leur validité, le renforcement des croyances par une confirmation indépendante. Les différents cas problématiques montrent qu'une procédure d'étalonnage réussie peut inclure plus que l'utilisation d'un signal témoin pour standardiser un instrument.

1.2-Briser la régression des expérimentateurs en faisant appel aux faits matériels.

Jonathan Livengood et Adam Edwards ont argumenté que des expériences peuvent établir qu'une technique est fiable sans s'appuyer sur une expérience d'étalonnage orthodoxe ([Livengood 2022](#)). Les auteurs se sont inspirés à la théorie matérielle de l'induction de John Norton([Norton 2021](#)). L'idée principale de la théorie matérielle de l'induction est que les faits d'arrière-plan obtenus dans un domaine nous indiquent quelles sont les bonnes et les mauvaises inférences inductives dans ce domaine. Des faits matériels justifient les inférences inductives et non pas une structure argumentative précise. Bien que différentes approches formelles puissent fonctionner dans différents domaines, une approche formelle est inapte à la compréhension de l'inférence inductive dans son ensemble. Il n'y a pas une règle purement formelle et universellement applicable, aucun fait global qui justifie chaque inférence inductive. Chaque inférence inductive est alimentée par des faits locaux. Les scientifiques en activité font parfois appel à des faits locaux afin de briser la régression des expérimentateurs, sans faire appel à une théorie solide d'un instrument et sans mener d'expériences d'étalonnage standard.

Les auteurs ont proposé une interprétation de l'analyse par adsorption chromatographique, une technique de séparation en chimie physique, effectuée par Mikhail Tswett (1872–1919). Tswett a développé sa technique en 1902. La communauté scientifique au sens large ne l'a acceptée comme fiable que dans les années 1930. En chromatographie, la séparation se produit parce que les parties d'un échantillon sont adsorbées de manière séquentielle. Tswett a fait appel aux travaux théoriques du physicien-mathématicien Willard Gibbs(1839-1903) sur la thermodynamique chimique, afin de justifier l'affirmation selon laquelle les parties séparées par analyse d'adsorption étaient optiquement et chimiquement distinctes. L'équation de Gibbs idéalise l'analyse d'adsorption en supposant une distribution homogène de l'adsorbat sur une surface géométrique. S'il y a plusieurs composants dans une solution, celui qui réduit le plus fortement l'énergie de surface est adsorbé en premier, et en dessous la substance active suivante est enregistrée. Il y a autant de zones différentes qu'il y a de substances différentes réductrices d'énergie de surface dans une solution. La théorie de Gibbs était controversée et est demeurée longtemps précaire. De nombreuses tentatives avaient été faites pour obtenir la confirmation de son équation, mais les grandes difficultés expérimentales avaient empêché toute conclusion définitive.

Une théorie de l'adsorption n'est pas équivalente à une théorie de la chromatographie qui a été redécouverte et appliquée dans les années 1930. Dans les circonstances historiques, on ne pouvait raisonnablement supposer que le caractère de la chlorophylle, décomposée dans les expériences de Tswett, était convenablement similaire au caractère de tout échantillon de substitution. La chlorophylle brute désigne le mélange de pigments qui donne leur couleur aux feuilles. De meilleurs pigments organiques de substitution n'étaient pas bien compris à l'époque.

Les expériences de Tswett ne répondaient pas à la définition orthodoxe de l'étalonnage. Il n'a pas établi la fiabilité de sa technique par rapport à certains échantillons de caractère connu pour en déduire ensuite que la technique s'appliquerait également à la chlorophylle. Les expériences réalisées par Tswett n'impliquaient pas de signal de substitution, néanmoins, elles ont démontré la fiabilité de sa technique. Les auteurs ont proposé que Tswett ait brisé la régression des expérimentateurs en faisant appel aux faits matériels locaux et qu'il ait répondu aux critiques selon lesquelles sa technique était vicieusement circulaire. La réponse de Tswett aux préoccupations générales sur sa méthode sous-tend également une réponse à l'objection méthodologique, à savoir que ses résultats n'étaient soutenus que par un appel vicieusement circulaire à sa propre méthode.

Les expériences de Tswett ont suffi à répondre à la préoccupation générale selon laquelle l'échantillon aurait pu être modifié de manière systématique au cours de l'analyse d'adsorption. Tswett a été en mesure de prouver que l'échantillon n'avait pas été chimiquement modifié par les adsorbants ou de toute autre manière. En tant que telle, une expérience d'étalonnage standard n'aurait pas fourni beaucoup d'assurance que des échantillons de chlorophylle, éventuellement très différents de tout échantillon d'essai, seraient séparés par adsorption sans interagir chimiquement avec l'adsorbant.

Si les résultats de Tswett avaient été en accord avec les résultats obtenus à partir de techniques et de théories bien établies, cet accord aurait appuyé l'affirmation selon laquelle sa technique était fiable. L'approbation de ses résultats nécessitait une preuve indépendante que les résultats des techniques bien établies étaient incorrects. Sans preuve indépendante, se fier uniquement à sa technique pour établir sa fiabilité semblait vicieusement circulaire. Il y avait des faits matériels à la disposition de Tswett. Il a fait appel à des faits matériels en s'appuyant sur des faits concernant l'interaction chimique et l'analyse spectrale qui étaient communs aux chimistes de son temps.

Le cas de Tswett fournit une raison de produire un compte rendu plus large de l'étalonnage en prêtant attention aux fonctions épistémiques des expériences d'étalonnage([Livengood 2022](#)).

1.3-Les philosophes de la mesure et la vision orthodoxe

L'exigence avancée par Livengood et Edwards de donner un sens à la fonction épistémique de l'étalonnage aide à introduire certaines des caractéristiques notables des récits contemporains de l'étalonnage, en particulier dans les discussions philosophiques sur la mesure. Certains philosophes de la mesure, notamment Slobodan Perovic, approuvent quelque chose comme la vision orthodoxe. Des contributions importantes, comme celle d'Eran Tal, s'en éloignent.

Slobodan Perovic a traité le cas du Grand collisionneur d'hadrons et la relation continue entre l'étalonnage et la mesure([Perovic 2017](#)). Le LHC est l'accélérateur de particules le plus grand et le plus puissant du monde. Les hadrons sont une grande famille de particules composites. Le LHC consiste en un anneau de 27 kilomètres de circonférence formé de structures accélératrices qui augmentent l'énergie des particules qui y circulent. Le résultat de la mesure et l'étalonnage sont pour Perovic de suites de reconstructions complexes, et non une production unique de données et de paramètres dissociés. Une avancée théorique et un aspect du dispositif sont constamment utilisés l'une comme levier pour l'autre. Les raisons théoriques et techniques justifiant l'étalonnage dans le cas du LHC sont développées dans un processus itératif de longue durée.

Les procédures et les paramètres d'étalonnage et de mesure au LHC sont étroitement et systématiquement liés. Les résultats de l'expérience et d'étalonnage partagent des paramètres, et ces paramètres tirent parti des itérations. L'ensemble de l'argument de régression de l'expérimentateur a été construit pour aborder des types de procédures fondées sur une vision beaucoup trop simple de l'interrelation entre l'étalonnage et les mesures. L'expérimentation innovante progresse avec de nouveaux instruments et phénomènes. Cela nécessite de questionner l'insistance sur l'indépendance de l'étalonnage par rapport aux résultats de l'expérience.

Les étalonnages in situ dans les expériences LHC entretiennent les mesures des paramètres d'intérêt de l'ensemble de l'instrument afin d'améliorer en permanence les mesures de ces mêmes paramètres. La procédure d'étalonnage est semblable à une très longue chaîne d'appareils de mesure en constant perfectionnement où chaque nouvel appareil utilise les meilleurs résultats du précédent en s'appuyant sur diverses contraintes.

Malgré le cas d'étalonnage in situ, Perovic persiste à définir l'étalonnage comme toute combinaison de techniques expérimentales qui assure le bon fonctionnement de l'appareil à partir de phénomènes déjà connus. Le processus itératif de perfectionnement des valeurs des paramètres utilisés dans les expériences LHC est lancé en faisant appel comme valeurs d'étalonnage à des données du passé concernant un phénomène bien connu tel que le quark. Les quarks sont des particules élémentaires et forment les hadrons. Les appareils expérimentaux du LHC ont été étalonnés, du moins dans un premier temps, par référence à des valeurs de confiance.

Eran Tal, adoptant plutôt une approche cohérentiste, se passe complètement de signaux de substitution et d'étalons de mesure. Suivant la terminologie de la métrologie, Tal fait la distinction entre les indications des instruments et les résultats des mesures. La métrologie, la science de la mesure, définit les principes et les méthodes permettant de garantir la confiance des mesures. Une indication d'instrument est l'état final d'un appareil de mesure. Une indication d'instrument doit être interprétée à la lumière d'autres informations sur le contexte de mesure, notamment une fonction d'étalonnage, afin d'être compris comme un véritable résultat. Eran Tal soutient que la comparaison avec une norme n'est ni nécessaire ni suffisante pour un étalonnage réussi. Il définit l'étalonnage comme un processus d'identification des valeurs de paramètres dans un modèle de mesure (Tal 2017). L'étalonnage est pour lui un type particulier d'activité de modélisation où le système modélisé est un processus de mesure.

L'objectif principal de l'étalonnage est d'identifier quelles valeurs de paramètre dans le modèle d'un processus de mesure prédisent de manière cohérente et précise les états finaux du processus de mesure. Ce récit, dit Tal, diffère de plusieurs autres en mettant l'accent sur la cohérence et la précision prédictive en tant qu'objectifs centraux de l'étalonnage, et en minimisant le rôle épistémique des normes de mesure. La dévalorisation des normes de mesure et d'autres signaux de substitution est une étape importante dans sa compréhension de l'étalonnage. Pour Tal, les mesures sont validées si elles sont mutuellement cohérentes avec les prédictions du même mesurande, une quantité qui doit être mesurée, faites avec différents modèles de processus de mesure.

La doctrine cohérentiste place la justification épistémique dans la cohérence d'une croyance avec d'autres croyances. Les croyances sont justifiées dans la mesure où elles appartiennent à un système de croyances qui se soutiennent mutuellement. Tout système de connaissances cohérent à son intérieur est également justifié.

Comme on verra, l'interprétation concurrente proposée par Hasok Chang est le cohérentisme progressif([Chang 2007](#)). Il reconnaît la possibilité de progresser en acceptant d'abord un certain système de connaissances sans justification ultime, en utilisant par la suite ce système pour lancer des pistes de recherche.

1.4-Les rôles épistémiques de l'étalonnage

Nora Mills Boyd a soulevé des objections sur le rapprochement entre la mesure et la précision prédictive réalisé par Tal([Boyd 2021](#)). Selon elle, l'accent mis par Tal sur les modèles idéalisés fausse la démarcation entre les deux.

Boyd affirme que si les mesures devaient avoir la même fonction épistémique que les prédictions, les conséquences de cette unité seraient catastrophiques, bien au-delà de la portée de la régression des expérimentateurs. Dans l'épistémologie de la mesure de Tal, les résultats des mesures génèrent des prédicteurs objectivés par leur cohérence mutuelle et la précision des mesures est un cas particulier de précision prédictive. Les prédictions de Tal, dit Boyd, dérivent d'une théorie ou d'une hypothèse. La cohérence entre les prédictions ne peut pas tronquer la régression des expérimentateurs, car la cohérence entre les prédictions peut être atteinte, quel que soit l'état du monde. Les résultats de mesure sont des données empiriques générées par un traitement intelligent des enregistrements d'indications, une interaction impliquant la cible matérielle. Les prédictions peuvent être empiriquement informées, mais elles ne sont pas elles-mêmes des résultats empiriques.

Selon Boyd, les résultats empiriques ne gagnent en utilité épistémique que lorsqu'ils sont considérés dans le contexte de toute une série de preuves issues des données à partir desquelles ils ont été générés. Ceci inclut des informations sur la manière dont tous les résultats de cette source de données ont été produits. Ces métadonnées concernent la provenance des enregistrements de données à partir desquels les résultats sont finalement générés, et les étapes de traitement qui transforment les données en résultats. L'ensemble des résultats considérés en eux-mêmes est pour elle incohérent.

Boyd poursuit son élaboration à la suite de l'épistémologie de la mesure de Tal, en soulignant que ses fonctions d'étalonnage sont des outils pour prédire la valeur d'une grandeur à partir des indications de l'instrument.

Plus précisément, comme on verra plus loin, Tal inverse la fonction d'étalonnage pour obtenir un prédicteur d'indications à partir de résultats de mesure. En métrologie un résultat de mesure est défini comme l'ensemble de valeurs attribuées à un mesurande, complété par toute autre information pertinente disponible.

Il est possible de lire le récit de Tal conformément à la vision des preuves empiriques qu'elle défend, en prenant l'exemple de Tal d'une procédure d'étalonnage en boîte blanche. Il souligne que la sensibilité au contexte des résultats de mesure est une condition préalable nécessaire à la possibilité d'établir leur objectivité. Si les détails sensibles au contexte avaient été idéalisés, tout type de révision ne serait pas possible. En gardant la trace des hypothèses qui ont été faites lors de la génération d'un résultat de mesure, on peut alors juger si la révision ultérieure de ces hypothèses affecte l'utilité épistémique du résultat.

Boyd s'inspire de la distinction faite par Uljana Feest entre deux régressions([Feest 2016](#)). Il existe une boucle interne à une expérience et la régression exposée par l'épistémologie de Tal. C'est dans le contexte de la régression qui s'étend au-delà du contexte d'une expérience, que la possibilité d'une explication cohérente de la justification épistémique apparaît la plus prometteuse. Un réseau cohérent déconnecté du contact causal avec des cibles matérielles ne rendra pas justice à la science empirique. Les hypothèses théoriques de modélisation sont formulées au cours du traitement des données et de l'interprétation des résultats empiriques, mais cela ne rend pas ces résultats prédictifs.

Boyd se rapproche de la vision de la mesure défendue par Hasok Chang, qui pourrait être mobilisée pour éviter l'obstacle suscité par l'épistémologie de la mesure de Tal. Elle mentionne l'étude magistrale de Chang sur l'évolution des mesures de température([Chang 2004](#)) comme corroborant sa distinction entre les prédictions théoriques et les résultats empiriques. La vision de Chang du cohérentisme progressif repose sur le moteur de l'itération épistémique. Tal va jusqu'à affirmer que les sources épistémiques de la mesure ne sont pas différentes de celles de la prédiction théorique et de la simulation informatique. C'est une vision qui rompt le lien crucial entre le monde et les résultats empiriques que toute épistémologie empiriste de la science doit conserver, dit Boyd.

En déclarant que la simulation informatique peut utilement être présentée comme une sorte de mesure, Tal risque de perdre de vue les canaux par lesquels la nature contraint notre théorisation. Boyd prévient de distinguer les prédictions et les résultats empiriques par les rôles fonctionnels qu'ils jouent dans l'épistémologie de la science.

1.5-Étalonnage, cohérence et consilience

Alisa Bokulich souligne que des tests de cohérence accomplissent une fonction différente anticipant l'étalonnage et la consilience, elle insiste sur la valeur de preuves discordantes ([Bokulich 2020](#)). La littérature philosophique actuelle ne parvient pas selon elle à distinguer de manière adéquate les tests de cohérence à la fois de l'étalonnage et de la consilience. L'identification faite par Eran Tal d'étalonnage et test de cohérence obscurcit les décisions de fond que les scientifiques doivent prendre. Il a échoué, selon elle, à apprécier le rôle épistémique complet des tests de cohérence, en se concentrant uniquement sur des résultats concordants. Pour Bokulich, l'étalonnage est une étape supplémentaire au-delà de l'étape du test de cohérence.

Bokulich soutient qu'il est plus utile de séparer les tests de cohérence, qui sont une activité de collecte d'informations, de l'étalonnage, qui est une décision de réviser une procédure de mesure à la lumière de ces informations. Lorsqu'un test de cohérence donne des résultats de mesure discordants, les scientifiques peuvent décider de réviser les procédures de mesure.

Pour elle, le but de l'étalonnage est d'améliorer la fiabilité d'un processus de mesure. La fiabilité peut être comprise comme une fonction de deux notions distinctes : la précision et l'exactitude. La précision est augmentée en réduisant les erreurs aléatoires. L'exactitude est augmentée en réduisant les erreurs systématiques. L'exactitude est évaluée par des tests de cohérence itératifs.

Les arguments de consilience peuvent commencer par un test de cohérence, bien qu'ils soient différents. La consilience fait référence à la convergence de plusieurs sources de données indépendantes sur une hypothèse ou un résultat particulier. Ce que le philosophe William Whewell (1794- 1866) a appelé une consilience d'inductions, a lieu lorsqu'une induction obtenue à partir d'une classe de faits, coïncide avec une induction obtenue d'une classe différente.

La consilience consiste à attribuer un degré élevé de plausibilité à une hypothèse donnée lorsqu'elle est supportée par un ensemble diversifié de sources de données indépendantes, qui auraient peu de chances de converger à moins que l'hypothèse ne soit correcte.

Par exemple, les géochronologues, les scientifiques impliqués dans la détermination de l'âge des roches, ont été confrontés au choix entre rétablir la cohérence en inter étalonnant les méthodes radiométriques ou en faisant des changements ailleurs, afin de garder les méthodes indépendantes afin qu'elles puissent être utilisées pour la consilience.

Encore que la convergence, qui fonde les arguments de consilience, soit certainement importante, elle passe à côté de la valeur épistémique des lignes de preuve discordantes. Les scientifiques peuvent choisir d'utiliser les discordances entre les mesures comme ressource pour réviser les connaissances scientifiques de base ou les hypothèses auxiliaires qui pourraient ensuite être utilisées pour affiner ou étalonner indépendamment les méthodes de mesure.

Il suffira également ici d'anticiper que le terme indication est potentiellement trompeur. Cela suggère que les résultats de mesure sont toujours obtenus directement à partir d'un instrument. Wendy Parker a noté que ce n'est le cas que dans ce qu'elle appelle les mesures directes ([Parker 2017](#)). Elle oppose à cela un deuxième type de mesure qu'elle appelle les mesures dérivées. Les paramètres qui sont directement mesurés n'indiquent pas la quantité d'intérêt. Cette dernière doit plutôt être dérivée de la première par des principes scientifiques pertinents.

1.6-La nature de la justification, fondationnalisme et cohérentisme

La théorie de la cohérence de la justification doit être distinguée de la théorie de la cohérence de la vérité. Les théoriciens modernes de la cohérence souscrivent à une théorie cohérente de la justification sans prôner une théorie cohérente de la vérité ([Olsson 2021](#)). Un système de croyances cohérent est un système où les croyances sont justifiées par le fait qu'elles sont reliées à d'autres croyances dans le contexte global d'un système de support mutuel.

Le cohérentisme ne suppose pas un fondement de vérités indubitables. La tentative la plus célèbre de donner un sens à cette idée vient du philosophe Willard Van Orman Quine (1908-2000) et de sa métaphore de la toile de croyances. La cohérence a été considérée comme faisant partie d'une solution au problème de régression traditionnel en épistémologie. Toute revendication de connaissances nécessite une chaîne sans fin. Ce ne sont pas les croyances individuelles qui sont justifiées, mais des systèmes de croyances entiers. Ce qui justifie un système de croyances, c'est précisément sa cohérence. Ceci, en substance, est la solution au problème de la régression.

Le fait que n'importe quelle croyance non justifiée puisse être reliée à d'autres croyances qui se supportent mutuellement pose un problème pour le cohérentiste. Les théoriciens de la cohérence les plus distingués évitent les objections courantes en attribuant à certaines croyances proches de l'expérience un rôle particulier. Ces théories sont souvent répertoriées comme des versions du fondationnalisme faible.

Le fondationnalisme faible soutient que si la cohérence est incapable de justifier les croyances, elle peut fournir une justification aux croyances observationnelles. Les propositions qui décrivent les résultats de l'observation ont un degré d'acceptabilité par elles-mêmes. Le philosophe canadien Paul Thagard a avancé une théorie de la cohérence qui donne une certaine priorité épistémique aux croyances observationnelles, ce qui en fait plutôt une forme de fondationnalisme faible(Thagard 2000, Thagard 2009). Certaines propositions ont un support épistémique initial en dehors de la cohérence.

La discussion sans doute la plus systématique et la plus prolifique de la théorie de la cohérence de la justification s'est concentrée sur la relation entre la cohérence et la probabilité inspirée par les travaux fondateurs du philosophe pragmatiste américain C. I. Lewis(1883-1964).

La renaissance des travaux de C. I. Lewis a inspiré la traduction de la théorie de la cohérence dans le langage des probabilités. Des fonctions de probabilité modélisent la cohérence comme support mutuel. Si les croyances en un ensemble n'ont aucune crédibilité initiale, alors aucune justification ne découlera de l'observation de la cohérence de cet ensemble. Lewis a prôné un fondationnalisme faible plutôt qu'une pure théorie de la cohérence. Les théoriciens de la cohérence doivent encore parvenir à un consensus sur la meilleure façon de définir la cohérence en termes probabilistes(Olsson 2021).

Selon la position de Lewis, la cohérence n'augmente la probabilité d'un ensemble de propositions rapportées que si les rapports individuels ont une certaine crédibilité en eux-mêmes, étant donné que ces rapports sont indépendants. En ce qui concerne le problème de la vérité, Lewis a fixé des conditions. Toute théorie de la cohérence doit reconnaître un faible fondement de croyances qui ont une certaine crédibilité en elles-mêmes. En plus d'être collectivement indépendantes, elles sont également crédibles individuellement, sinon aucune mesure ne peut conduire à la vérité. La cohérence ne peut pas créer de crédibilité.

Erik J. Olsson a revalorisé le débat actuel sur la bonne définition de la cohérence du point de vue de la méthodologie d'explication de Rudolf Carnap. Le résultat est une défense provisoire et nuancée des premières notions de cohérence(Olsson 2022). Rudolf Carnap a introduit une méthode d'explication dans une tentative d'introduire une approche plus scientifique de la définition des concepts philosophiques.

L'explication signifie la transformation d'un concept inexact, préscientifique, l'explicandum, en un nouveau concept exact, l'explicatum. Une explication doit être évaluée par rapport à certaines considérations pragmatiques, que Carnap appelle des desiderata ou des exigences sur un explicatum. Carnap énonce quatre exigences sur un explicatum approprié. Le choix de Carnap de se référer à la similarité, à la fécondité, à l'exactitude et à la simplicité. Les quatre exigences devraient avoir un poids positif dans le processus d'explication([Carnap 2015](#)).

Olsson utilise le terme d'épistémologie explicationniste pour désigner l'application de la méthode de Carnap dans la théorie de la connaissance. Les mesures de cohérence doivent être évaluées, non comme des analyses conceptuelles, mais comme des explications au sens de Carnap, se référant aux quatre exigences carnapiennes.

Le rôle de la cohérence est de pointer vers des hypothèses intéressantes qui pourraient mériter d'être approfondies. La cohérence est avant tout un facteur avec lequel il faut compter en ce qui concerne ce que le fondateur du pragmatisme américain Charles Sanders Peirce(1839-1914) appelait l'abduction, le processus par lequel des théories plausibles sont sélectionnées pour des tests supplémentaires. La référence au haut degré de cohérence de la totalité de nos croyances pourrait au mieux indiquer que leur vérité réelle est une hypothèse intéressante pour un examen plus approfondi.

Les principes de coordination

Le débat sur la façon plus appropriée de coordonner des expressions théoriques quantitatives avec les opérations expérimentales demeure un sujet récurrent en philosophie de la mesure. La coordination joint des concepts théoriques aux procédures empiriques pour les mesurer. Les éléments purement formels d'une théorie et les relations quantitatives entre eux acquièrent leur signification par l'attribution de valeurs. Les contributions émergentes en philosophie de la mesure visent à établir la validité des procédés qui permettent aux instruments de produire des informations fiables.

Dès leur origine même, les principes de coordination ont été marqués par l'identification de l'empirisme logique avec le conventionnalisme([Tal 2013](#)). C'est parce que la perspective conventionnaliste attribuerait à la coordination une apparence de définition arbitraire. L'empirisme logique a été manifestement très loin d'être homogène dans le long parcours temporel de ses participants.

La collaboration du Cercle de Vienne avec le Groupe de Berlin dans les années 1920 a été définie comme un mariage de raison([Milkov 2013](#)). Le Groupe de Berlin fut indissociable de la tradition de Göttingen et en particulier l'approche axiomatique à la physique de David Hilbert ainsi que sa participation avec Albert Einstein à la formulation des équations du champ gravitationnel.

Les principes de coordination sont associés au nom de Hans Reichenbach. Reichenbach a étudié sous la direction de David Hilbert à Göttingen et par la suite à Berlin il fut élève de Max Planck et Ernst Cassirer. A Berlin, Reichenbach a assisté aux séminaires d'Albert Einstein sur la relativité et la mécanique statistique. Lorsque Hans Reichenbach a initialement élaboré sa méthode d'analyse logique de la science dans sa *Relativitäts theorie und Erkenntnis apriori*, l'ouvrage du psychologue Kurt Lewin était la seule source publiée à laquelle il faisait appel pour son soutien. La rapport de Reichenbach avec le psychologue expérimental Kurt Lewin remonte à 1910. Lewin et Reichenbach ont participé aux activités d'un mouvement étudiant connu sous le nom de *Freistudentenschaft*. Lewin et Reichenbach ont assisté aux cours d'Ernst Cassirer à l'Université de Berlin, ils ont travaillé dans le domaine de la construction d'appareils de mesure.

C'était au printemps 1920, dans son œuvre *Relativitätstheorie und Erkenntnis a priori* (Reichenbach 1965), que Reichenbach avança la distinction de deux sortes de principes : les axiomes de coordination et les axiomes de connexions.

Les axiomes de connexion sont de simples lois de la physique. Les axiomes de coordination quant à eux, ils sont essentiels pour lier les théories au monde. Ils fonctionnent comme des principes a priori et ne sont pas permanents.

Les notions de génidentité et de topologie de Kurt Lewin et Hans Reichenbach renvoient aux idées d'Ernst Cassirer. Reichenbach a introduit une horloge topologique pour définir la simultanéité. Elle est décrite comme tout mécanisme sans caractérisation matérielle explicite en raison du caractère arbitraire de son rapport aux mesures auxquelles elle sert de base. La topologie est entendue dans ce contexte comme le système objectif de relations et de coïncidences d'événements ponctuels qui peut être établi indépendamment de toute détermination métrique arbitraire. La génidentité représentait un principe de coordination des structures formelles à la réalité, nécessaire pour identifier un objet comme le même objet dans le passage à travers le temps.

Parmi les principes cognitifs, le principe de génidentité, comme celui de probabilité, jouait un rôle spécifique de méta principes des plus fondamentaux. Il était en fait présumé par un certain nombre d'autres principes de coordination, notamment ceux liés au processus de mesure. Reichenbach a mentionné pour la première fois le concept de génidentité dans sa *Relativitätstheorie und Erkenntnis a priori* (1920), où il était considéré comme un principe a priori synthétique révisable.

Ces définitions de Hans Reichenbach avaient l'objectif d'attribuer une signification empirique à des propositions conceptuelles. L'insistance sur les éléments conceptuels de son approche ne permet pas de comprendre la tradition d'axiomatisation empirique à la fin du XIXe et au début du XXe siècle, évidente en particulier dans les travaux de David Hilbert et de Reichenbach lui-même. Une telle insistance conduit à méconnaître le rôle des faits empiriques dans l'axiomatisation d'une théorie physique, et le rôle des principes de coordination de Reichenbach en particulier.

Hilbert et Reichenbach n'ont pas envisagé une notion strictement formaliste de l'axiomatisation de la physique, telle que celle attribuée à certains représentants du mouvement de l'empirisme logique (Eisenthal 2022).

D'importantes interprétations, en particulier dans des lectures philosophiques contemporaines sur la mesure, ont assimilé les définitions de coordinations à des conventions unissant des structures abstraites entièrement formelles à des faits empiriques. Cette conception de l'empirisme logique, insiste sur une stricte séparation entre le contenu théorique et empirique des théories.

2.1-L'axiomatisation empirique de Hilbert

La correspondance et les lectures de Hilbert du début de sa carrière révèlent sa préférence pour des travaux à forte tendance empirique. Il a entrepris la lecture du livre de Heinrich Hertz sur les fondements de la mécanique sous l'influence de l'enthousiasme de Hermann Minkowski, son collègue d'études à Königsberg. Minkowski s'est sérieusement intéressé à la physique au début des années 1890 à Bonn. Il est arrivé même jusqu'à demander à Heinrich Hertz l'autorisation de participer aux exercices de laboratoire proposés aux étudiants. Il a envoyé à Hilbert un compte-rendu de ses activités, dans lequel il se décrit comme un constructeur d'instruments([Rowe 2018](#)).

La méconnaissance du projet d'axiomatisation de la physique de Hilbert dérive de son apparente nature idéalisée en contraste avec les faits de l'expérience([Patton 2014](#)). Les physiciens explorent les phénomènes complexes de la nature par des expériences et évitent le terme d'axiome, identifié à l'idée de vérité établie.

L'analyse axiomatique de Hilbert n'était pas censée être effectuée que rétrospectivement pour des entités mathématiques concrètes et bien établies, en présence d'un empirisme robuste. L'articulation des axiomes de Hilbert est purement méthodologique et n'implique aucunement des vérités éternelles, mais vise plutôt la clarification de la théorie et l'identification des hypothèses superflues ou contradictoires([Corry 2004](#)). Hilbert l'a expressément indiqué comme la principale réalisation qu'il espérait obtenir de l'analyse axiomatique. L'axiomatisation clarifie la théorie, analyse ses composantes, élucide les relations de dépendance entre les éléments de la théorie.

Hilbert a évoqué le livre de Heinrich Hertz sur la mécanique comme la source précise de sa formulation. Hertz avait noté que l'axiomatisation n'est nécessaire que pour les sciences matures. La géométrie comme la mécanique émerge de l'expérience mais les fondements expérimentaux de la géométrie ont été confirmés à un tel point qu'ils peuvent être dérivés d'axiomes indépendants. En physique, les concepts de base restent indéterminés et l'axiomatisation demeure dans une phase historique d'évolution.

Les sciences matures considèrent les représentations logiquement claires d'une importance primordiale. Le but de l'analyse logique et axiomatique en géométrie n'est pas de s'éloigner entièrement des faits intuitifs qui sont à la base de la géométrie en tant que science physique. Elle montre plutôt nettement, une fois la théorie arrivée à maturité, comment les résultats géométriques sont établis, et de quoi ils dépendent.

En physique, tout comme dans le cas de la géométrie, le choix des axiomes de Hilbert est contraint par le contenu factuel qu'une théorie a déjà. Il s'agit d'établir quelles relations mathématiques peuvent être élucidées indépendamment du contenu empirique de la théorie. Hilbert n'a jamais suggéré que les vertus d'exhaustivité, consistance, indépendance et simplicité soient appliquées à des relations abstraites sans signification concrète.

Il a entrepris d'exposer la façon dont l'expression qui condense le contenu d'une théorie pouvait être dérivée des axiomes en même temps que de certains principes généraux. Il considérait la méthode axiomatique comme le moyen le plus approprié de décider quelles sont les hypothèses individuelles à partir desquelles toutes les lois principales de la théorie peuvent être déduites. Une analyse axiomatique des théories physiques pourrait obliger à modifier même les hypothèses les plus fondamentales si nécessaire. Hilbert a envisagé que l'analyse axiomatique des théories physiques pourrait non seulement contribuer à la clarification conceptuelle, mais aussi préparer à se réadapter dans l'éventualité de données empiriques nouvellement découvertes.

De son implication avec la relativité générale, Hilbert a déclaré qu'il était plus près que jamais d'atteindre l'exhaustivité et la clarté de l'analyse axiomatique pour la physique. La relativité générale avait proposé de renoncer aux intuitions concernant l'espace et le temps. Contrairement à l'ancienne conception comprenant à la fois des éléments purement physiques et purement mathématiques, la géométrie était devenue une partie de la physique.

Hilbert aimait citer Immanuel Kant, son célèbre concitoyen de la ville de Königsberg. Pour Kant, le postulat parallèle constituait une proposition synthétique a priori dont la valeur de vérité ne pouvait être ni déduite analytiquement ni vérifiée comme un fait empirique. Sur ce sujet, Hilbert aimait citer l'exemple éclairant de l'expérience de triangulation de Carl Friedrich Gauss. Gauss avait trouvé un moyen de tester la possibilité que l'espace soit courbé en mesurant les angles d'un triangle terrestre. À l'aide d'un héliotrope, ces trois sommets pouvaient être aperçus depuis le toit de l'observatoire de Gauss. Les sommets étaient situés dans trois endroits montagneux éloignés.

2.2-L'approche axiomatique de Reichenbach

En 1920, le projet épistémologique de Reichenbach s'inspire encore d'une approche kantienne. La découverte de la relativité générale et son implication que l'espace n'est pas euclidien, l'a conduit à rejeter le statut des principes de coordination comme synthétiques a priori.

Reichenbach était conscient de la ressemblance générale entre son approche et celle de Hilbert bien qu'il n'ait pas reconnu entièrement la proximité. Le placer dans cette tradition historique fournit un contexte important pour comprendre sa propre tentative d'axiomatiser la théorie de la relativité.

L'aspiration de Reichenbach fut singulièrement de connaître comment les systèmes formels constitués de symboles et de règles peuvent être utilisés pour nous dire quelque chose sur la réalité. Les quantités sont formulées en termes mathématiques. La question posée par la coordination est de savoir si la correspondance entre l'ensemble des symboles mathématiques et l'ensemble des objets du monde est bien fondée([Padovani 2021](#)). Les principes de coordination auraient fourni des règles de notre accès aux quantités qui apparaissent dans les équations physiques.

Les fondements des théories existantes étaient devenus soudainement incompatibles avec la nouvelle théorie émergente. La théorie de la relativité avait montré que dans l'évolution d'une théorie, certains principes qui paraissent essentiels peuvent être contredits par les hypothèses fondamentales sur lesquelles repose une théorie ultérieure. Pour décrire la réalité, les principes qui étaient fondamentaux par rapport à une théorie devaient être révisés suite à de nouvelles preuves.

Reichenbach a distingué deux aspects de la notion kantienne de l'a priori synthétique. D'une part, Kant considérait les propositions synthétiques a priori comme définitivement vraies, d'autre part, il les considérait comme constitutives de l'objet de connaissance. Reichenbach a introduit la nouvelle notion d'a priori relativisé: relatif à une époque donnée dans le développement de la physique.

Le développement historique des sciences mathématiques de la nature avait été interprété par Ernst Cassirer comme une progression générative de structures abstraites([Cassirer 2000](#)). Reprenant ce qu'Ernst Cassirer avait déjà souligné, Reichenbach spécifiait qu'a priori signifie constituer le concept d'un objet avant la connaissance, mais non indépendamment de l'expérience.

Les principes a priori de la connaissance pouvaient encore être considérés comme des principes constitutifs, bien que temporairement, car ils pouvaient bien être révisés à la lumière de nouvelles preuves.

Les principes de coordination de Reichenbach ne jouaient pas le rôle de relier une théorie mathématique entièrement abstraite à un contenu empirique. Pour Reichenbach, la théorie de la relativité avait montré l'existence de principes de coordination qui rendent impossible l'univocité de la coordination. La coordination était présentée comme une forme de correspondance entre deux ensembles. Le côté conceptuel était entièrement déterminé, tandis que le côté qui produisait les choses individuelles de la réalité restait à déterminer. Le côté déterminé définissait les choses individuelles du côté indéterminé qui à son tour prescrivait la disposition du côté déterminé. Il a souligné que la coordination, dans la connaissance physique, ne peut pas être systématiquement univoque. L'ensemble indéterminé étant celui qui prescrivait la disposition à l'autre ensemble, la véritable connaissance n'était possible que grâce à cette mutualité de coordination.

Quand l'ensemble des équations fondamentales bien déterminées de la physique était coordonné à la matière empirique, un côté de la coordination n'était pas déterminé. Les axiomes constitutifs précisaient les relations mesurables entre les objets qui exprimaient la coordination mutuelle. Le rôle distinctif que jouent les procédures de mesure nécessitait donc sa place dans des principes constitutifs de la science. Ces principes de coordination seraient des conditions préalables à l'individuation des grandeurs physiques afin de traiter de leur mesure, en ce sens ils se rapportaient à un type de constitution. Les principes de coordination constitueraient le monde de l'expérience, puisque les objets coordonnés avec les concepts sont complètement indéterminés en dehors de leur coordination. Les concepts scientifiques sont vides s'ils ne sont pas coordonnés par des principes a priori à l'expérience. Reichenbach a soutenu que la détermination des métriques spatiales et temporelles présuppose de tels principes de coordination.

La totalité des choses réelles était coordonnée au système total d'équations, mais les choses individuelles étaient coordonnées à des équations individuelles. Le fait que certains des principes constitutifs soient propres à une théorie et puissent être rejetés n'impliquait pas que tous les principes de coordination seraient rejetés. Un principe de coordination qui permet une coordination unique ou cohérente de concepts en conjonction avec des choses peut être incompatible avec l'expérience lorsqu'il est associé à d'autres principes de coordination.

L'épistémologie coordinative permet une vision inédite sur la question de la mesure physique([Giovannetti 2018](#)). La solution appuyée par Moritz Schlick, Henri Poincaré et Pierre Duhem, avait considéré les concepts métriques de grandeur physique comme des conventions.

Une explication des principes a priori relativisés devrait examiner la fonction occupée par les procédures qui dirigent l'application des concepts de mesure afin de définir les objets de l'expérience([Padovani 2015](#)). Les principes de coordination sont des conditions préalables à la fois à l'individuation des grandeurs physiques et à leur mesure. Les principes constitutifs, révisables à la lumière des évolutions scientifiques, sont définis comme des axiomes de coordination. Les axiomes de coordination déterminent les règles d'application des axiomes de connexion à la réalité.

Le récit original de Reichenbach ne peut être défini comme conventionnaliste au sens strict du terme, comme Tal et Van Fraassen ont tendance à l'interpréter([Padovani 2017](#)).

2.3- Une méthode d'approximations successives

Reichenbach était engagé dans un projet d'axiomatisation complètement empirique. Puisque la théorie de la relativité constituait une innovation en physique, les faits élémentaires devaient être choisis comme axiomes de manière à ne pas présupposer la nouvelle théorie. Le but de cette approche était de choisir comme axiomes des énoncés aussi directement vérifiables que possible, puis d'en dériver les éléments les plus abstraits de la théorie. Les axiomes en tant que faits élémentaires devaient être intelligibles sans recourir à la théorie de la relativité, car ils étaient invariants par rapport à toutes les théories et bien confirmés par la physique pré relativiste.

Il a utilisé des définitions de coordination qui n'ont pas fait usage d'indices relativistes pour rendre explicites les choix conventionnels au cours de l'énonciation d'une théorie physique. Cela s'écarte d'une compréhension formaliste d'une théorie axiomatisée. Ses définitions coordinatives tiennent le sens d'un concept pour acquis et elles consistent en la coordination d'une définition mathématique à un morceau de réalité.

Distinguer par l'axiomatisation les éléments conventionnels d'une théorie revient à identifier ce qui est le résultat d'un choix arbitraire, de ce qui est une affirmation sur la réalité. Certains principes géométriques devaient être posés comme axiomes de coordination avant même qu'une détermination empirique de l'espace ait un sens. Qu'ils soient compris comme des conventions ou comme des propositions relatives à une époque du développement de la physique.

Les axiomes affirment que les barres de mesure et les horloges s'adaptent à la géométrie de la lumière, ils capturent le nouveau contenu empirique de la relativité restreinte. Einstein a défini les systèmes inertiels, de telle manière que les lois physiques sont invariantes par changement de système de coordonnées. Pour Reichenbach, le noyau physique de la théorie consistait en l'hypothèse que les instruments de mesure suivent des définitions coordinatives différentes de celles supposées dans la théorie classique([Reichenbach 1958](#)), ([Reichenbach 1969](#)).

Il a plaidé pour une méthode d'approximations successives. Par cette méthode, les anciens principes de coordination devaient être remplacés par de nouveaux principes approximativement réalisés. La théorie d'Einstein coïncide dans les limites de l'observation avec la théorie newtonienne dans les petites régions. Cette méthode représentait la transformation de la doctrine kantienne, car elle montrait que l'adoption de nouveaux principes a priori obéit à une règle objective et peut être justifiée au regard des principes anciens.

L'univocité de la coordination n'était pas une nécessité pour la connaissance, mais une simple approximation. Le principe de probabilité de Reichenbach joignait le principe de causalité de Kant, pour qui toute succession se réduit à une causation. Ce principe affirmait que chaque distribution de fréquence des valeurs en physique a une limite de convergence représentative des probabilités réelles des valeurs mesurées. L'univocité de la coordination pour la connaissance physique n'est certaine que proportionnellement à l'incertitude de mesure et à ses propres constantes. Les connaissances physiques requièrent une coordination, qui ne peut se passer d'approximation.

La fonction de probabilité de Reichenbach joue un rôle similaire. Il est possible de découvrir par induction de nouveaux principes de coordination qui représentent une approximation successive des principes utilisés jusqu'à présent([Padovani 2011](#)). Reichenbach a maintenu la forme d'a priori synthétique comme élément constitutif de la connaissance, mais révisable en fonction de l'évolution de la science.

Reichenbach a entrepris de considérer le problème de la coordination afin de développer une interprétation objective des probabilités couvrant l'incertitude dans les sciences. Une explication des probabilités devait formuler comment un événement est lié à un état des choses dans le monde réel. Les mathématiques s'appliquent aux objets réels, mais elles ne sont pas nécessairement une structure valide de la réalité. Un système d'équations ne fournit qu'un cadre pour comprendre des événements réels, mais ne peut pas pleinement rendre compte de la réalité.

L'approximation était pour Reichenbach, un nouveau principe essentiel pour coordonner les jugements exprimés en termes mathématiques avec la réalité. Aux yeux de Reichenbach, ce principe équivalait à un principe a priori synthétique kantien. Le principe de probabilité est chargé de s'assurer que les quantités qui apparaissent dans les équations physiques sont les plus précises. L'idée d'une coordination univoque, où tous les déploiements aboutissent au même nombre pour un même phénomène, pouvait en principe être écartée. La fonction du principe de probabilité était de permettre la correspondance entre les représentations formelles et leur interprétation.

Reichenbach a envisagé une procédure itérative. Des révisions pouvaient réussir en s'appuyant sur des concepts appartenant à une étape scientifique antérieure. Si une limite de la fréquence observée d'un événement existe, cette limite sera détectée, car l'utilisation réitérée de l'induction trouvera finalement une convergence à un degré d'approximation suffisant. La chose physique qui est coordonnée est le résultat d'une construction, qui emploie nécessairement ce type même de raisonnement inductif, qui conduira au succès dans un nombre fini d'étapes. Les inférences inductives seront éventuellement évaluées à travers d'autres inférences, étant constamment révisées si nécessaire. La probabilité expliquait comment la coordination pouvait être efficacement atteinte. Cela illustre une autre limitation à la lecture de Reichenbach comme un conventionnaliste.

Une fonction de la physique est d'améliorer la caractérisation des objets en augmentant le nombre de variables dont les valeurs peuvent être déterminées numériquement. Cela inclut la détermination numérique des constantes. Une constante donnée dans des lois particulières, lorsqu'elle est mise en rapport avec des grandeurs différentes, montre qu'elle est en vigueur dans des lois précédentes. Tant que la constante n'est pas assurée, l'équation physique demeure non univoque.

2.4-Le lien entre la réalité et sa description scientifique

Reichenbach n'a jamais complètement précisé ce qu'est la coordination et comment elle s'accomplit. L'idée sous-jacente était que la coordination décrit la relation entre le modèle mathématique et le phénomène naturel. Son travail en philosophie de la physique, sa théorie des probabilités et son explication de la causalité dépendent de manière cruciale de la coordination([Eberhardt 2022](#)). Il devient nécessaire d'établir les quantités qui sont censées se trouver dans une relation causale apparente.

L'établissement de ces quantités est un exemple de coordination de la structure mathématique avec la réalité. Frederick Eberhardt a proposé que le critère de manipulations non ambiguës pour identifier les variables causales à partir des données de mesure joue le rôle d'un principe de coordination reichenbachien.

Reichenbach s'intéressait à la manière de convertir les relations causales entre les événements individuels en lois scientifiques générales. Une telle agrégation est possible lorsque les fréquences empiriques de certains types de séquences d'événements convergent vers une distribution limite.

La coordination est la construction d'une représentation de la réalité qui établit les grandeurs scientifiques autant qu'elle fixe la façon de les mesurer. Un jugement cognitif est nécessaire pour distinguer les phénomènes nécessitant une explication scientifique. Une pareille sélection identifie les caractéristiques dans l'espace de perception, qui vont former le centre de la représentation mathématique. Les principes de coordination sont des présomptions qui rendent possible la déduction d'une quantité méconnue et sont susceptibles d'une éventuelle révision. Les principes de coordination ne sont clairement pas une question de convention.

Il y a un équilibre mutuel entre la représentation pour décrire la réalité et l'expérience qui contraint quelle représentation est possible. La coordination va aussi au-delà de ce qui est observé. Il ne s'agit pas d'une définition opérationnelle de la relation entre les quantités scientifiques et les perceptions.

Il demeure possible que des variables causales aient des effets ambigus. Exiger que des manipulations soient sans ambiguïté impose donc une contrainte particulière sur le type de représentation mathématique des relations causales qui est jugée admissible. Ce type de description rend compte de la demande de Reichenbach selon laquelle les coordinations correctes sont empiriquement cohérentes.

Les variables avec des manipulations non ambiguës ne donnent pas lieu à des incohérences. Lorsqu'elles surviennent, elles indiquent que les variables causales sont surdéterminées. En utilisant le principe des manipulations non ambiguës, la représentation correcte d'un système est unique. L'unicité d'une coordination cognitive signifie qu'un état de variable physique est représenté à partir de différentes données empiriques.

La coordination détermine la représentation scientifique, mais les données empiriques limitent également la manière dont la coordination peut être réalisée. Exiger qu'une variable causale ait des manipulations non ambiguës ne fixe pas la variable causale par convention. L'expérience dicte ce qu'est la bonne description unique de la variable causale. Le développement des représentations scientifiques de la réalité occupe un terrain d'entente entre les choix conventionnels et les contraintes naturelles. Il existe des conditions de cohérence et d'unicité qui peuvent être précisées pour une coordination correcte. La description faite par Eberhardt de la coordination de Reichenbach semble juste.

Appliquer avec succès le pluralisme opérationnel

Des contributions contemporaines en philosophie de la mesure([Tal 2013](#)) ont voulu se distancier de l'opérationnalisme. Ceci dans sa version restrictive identifie les expressions de quantité avec les opérations utilisées pour les mesurer. Cependant, une convergence de l'opérationnalisme avec l'adoption bien établie de la perspective cohérentiste en philosophie de la mesure est souhaitable.

Je présente ici l'opérationnalisme de Bridgman. On verra par la suite certaines limites de cette perspective, et la façon donc le travail de Hasok Chang permet de les résoudre.

3.1- La prudence empiriste de Bridgman inspirée de la théorie de la relativité restreinte

The Logic of Modern Physics de Percy William Bridgman([Bridgman 1960](#)), publié en 1927, appelait à une révision critique de la structure conceptuelle de la physique. Deux phrases de son volume sont particulièrement révélatrices(traduction):

Nous devrions maintenant nous efforcer de comprendre si complètement le caractère de nos relations mentales permanentes avec la nature qu'un autre changement dans notre attitude, tel que celui dû à Einstein, soit à jamais impossible.(page 2).

Nous devons toujours être prêts à découvrir un jour qu'une augmentation de la précision expérimentale peut montrer que les deux ensembles différents d'opérations qui donnent les mêmes résultats dans la partie la plus ordinaire du domaine de l'expérience, conduisent à des résultats mesurablement différents dans les parties les moins familières du domaine. Nous devons rester conscients de ces articulations dans notre structure conceptuelle si nous espérons rendre inutiles les services des Einstein à naître.(page 24).

La percée originale d'Einstein à l'égard de la non-existence de simultanéité absolue entre des événements à différents endroits était la preuve que les concepts de base du temps et de l'espace avaient été sérieusement mal conçus. Elle a été observée en testant la simultanéité d'événements amplement séparés par un examen des opérations engagées dans la synchronisation des horloges.

Bridgman a réclamé l'arrêt de l'usage courant définissant les concepts physiques en fonction de leurs propriétés présumées sans une preuve préalable que quelque chose, correspondant à ces propriétés, existe dans la nature([Giovannetti 2018](#)). La signification ultime de chaque concept physique est liée aux opérations physiques et mentales par lesquelles il est mesuré ou testé.

L'opérationnalisme présenté par le physicien Percy Bridgman est l'un des essais les plus rigoureux dans la définition des principaux problèmes des concepts de grandeur([Kenble 1970](#)).

Quand de nouvelles méthodes de mesure exposent des expériences inédites, le sens de nos concepts se modifie. Bridgman a écarté l'apparence de précision des équations mathématiques de la physique et de la logique rigoureuse des théories, pour pointer vers les observations, desquelles les symboles et les équations tirent leur signification. L'analyse opérationnelle, proposée comme une aide à la réflexion, était le remède à l'incomplétude des concepts métriques. Cette incomplétude est due au fait qu'il est irréalisable d'énoncer toutes les méthodes de mesure possibles d'une grandeur.

Gabriel Giovannetti précise que selon Bridgman, un concept métrique est équivalent à un ensemble d'opérations de mesure([Giovannetti 2018](#)). Il n'essaye pas d'attribuer à chaque opération de mesure un concept métrique approprié. L'impossibilité de déterminer clairement l'ensemble des opérations de mesure restreint le lien entre le concept mathématique de grandeur et la réalité empirique de la mesure prescrite par l'expérience.

Une amélioration dans la précision expérimentale, a dit Bridgman, peut indiquer que deux ensembles différents d'opérations qui donnent les mêmes résultats dans la partie la plus courante de l'expérience conduisent à des résultats sensiblement différents dans des parties moins usuelles. Des opérations de mesure peuvent à une certaine échelle, donner les mêmes résultats avec les mêmes modalités et être jugées comme des mesures de la même grandeur. Elles peuvent, à une échelle de grandeur différente, donner des résultats différents([Giovannetti 2018](#)).

Bridgman n'entendait pas multiplier les concepts, mais plutôt soumettre la signification des concepts métriques à des opérations de mesure. La définition correcte d'un concept n'est pas ce qui concerne ses propriétés, mais demeure dans des opérations réelles. En affinité avec l'épistémologie coordinationniste([Giovannetti 2018](#)), si la mesure est prescrite par l'expérience, il doit y avoir une correspondance entre l'expérience et sa représentation. La signification d'un concept ne devrait pas conduire à autre chose qu'aux opérations de mesure. Un concept métrique auquel ne correspond aucun ensemble cohérent d'opérations de mesure est un concept privé de sens. Toutefois, il est possible d'utiliser un concept ou une prédiction dans un champ qui dépasse les valeurs accessibles à l'expérimentation à condition que les modalités de mesurabilité soient spécifiées.

Cette même possibilité avait poussé Reichenbach à voir dans les principes de coordination des propositions synthétiques. Contrairement aux définitions, qu'ont un statut analytique et conventionnel, la formulation des concepts métriques est révisable.

L'épistémologie de type coordinationniste permet le questionnement des propositions d'une théorie en contradiction avec l'expérience. Lors d'une nouvelle découverte, les prédictions finissent hors du champ des valeurs mesurables et l'univocité de la coordination vient à manquer.

Le caractère continu et infini des variables mathématiques utilisées pour indiquer les grandeurs physiques s'oppose à la disjonction et aux bornes propres aux opérations de mesure des grandeurs. Lors d'un changement d'échelle, il est impossible d'obtenir une définition indépendante pour toutes les grandeurs distinctives d'un système. Les différents concepts métriques n'ont plus des définitions indépendantes mais une représentation métrique hétérogène.

Bridgman a évalué des phénomènes qui sont à la limite des capacités théoriques et expérimentales. Il a reconnu au langage mathématique des caractéristiques qui manquent à l'expérience. Il y a toujours dans les mathématiques une propriété d'exactitude que les informations sur la nature n'atteignent jamais.

Appréhender des relations mathématiques qui permettent de décrire le réel dans l'infini requiert une progression constante et diversifiée de la précision des instruments de mesure. Bridgman a considéré vain d'exprimer la nature en terme mathématique. Contrairement à Kant, il a mis en évidence l'apparence, maintenue par le langage mathématique, de représenter des phénomènes physiques en termes de grandeurs continues.

Les grandeurs physiques ne se comportent pas comme des variables mathématiques. Les mathématiques n'admettent pas qu'à mesure que l'ampleur d'une grandeur physique change, les concepts fondamentaux deviennent flous. Des concepts perdent entièrement leur signification physique, et doivent donc être remplacés par d'autres concepts opérationnalisés différemment.

Bridgman a essayé d'appivoiser le changement de signification opérationnelle des concepts métriques lors d'un changement d'échelle. La signification opérationnelle du concept métrique n'est plus la même lors d'un changement drastique d'échelle, par conséquent les méthodes de mesure sont modifiées.

La représentation mathématique du sens physique d'un concept n'exprime pas certainement cette variation. En dehors du champ de grandeur numérique dans laquelle les concepts physiques eux-mêmes ont un sens, leurs représentations mathématiques devraient cesser.

Bridgman, en réduisant drastiquement les concepts physiques à leur seul sens opérationnel, aurait dû récuser toute forme de raisonnement scientifique, ce qu'il n'a pas fait selon Gabriel Giovannetti.

Tout système d'équations ne peut contenir qu'une très petite partie de la situation physique réelle ; il y a derrière les équations un énorme arrière-plan descriptif à travers lequel les équations font le lien avec la nature. Ce contexte comprend une description de toutes les méthodes de mesure par lesquelles les données qui entrent dans les équations sont obtenues. Le contenu empirique d'un principe physique n'est pas complètement exprimé par la formulation mathématique, ce qui rappelle l'épistémologie coordinative. Développer un concept métrique, la correspondance entre applications permises par les mathématiques et phénomènes empiriques devient problématique.

La précarité de la description mathématique des phénomènes dans les conditions empiriques aux extrêmes de la mesurabilité, et la façon de relier le sens mathématique et empirique d'un concept métrique restent sans solution dans l'opérationnalisme de Bridgman. Le travail de Hasok Chang rend cette correspondance réalisable grâce à l'introduction opportune d'hypothèses fondamentales quant aux concepts de grandeur([Giovannetti 2018](#)).

Carl Hempel ([Hempel 2012](#)) a élucidé les définitions opératoires de Percy Bridgeman :

Une conception très particulière du caractère des énoncés interprétatifs a été avancée par l'école opérationnaliste, qui s'est développée à la suite des travaux méthodologiques du physicien P.W. Bridgman. L'idée centrale de l'opérationnalisme est que la signification de chaque terme scientifique doit pouvoir être déterminée en spécifiant une opération de vérification bien définie qui lui fournit un critère d'application.([Hempel 2012](#))(page 156).

L'approche opérationnaliste précise les procédures destinées à déterminer la valeur numérique des quantités observées, les termes qui représentent des concepts quantitatifs prenant des valeurs numériques. Les critères opératoires, en fournissant des règles pour effectuer des mesures pour un ensemble de termes, garantiraient l'objectivité des énoncés qui les concernent. L'emploi des expressions pour lesquelles des définitions opératoires sont absentes mène à des énoncés vides de sens.

Les mises en garde de l'opérationnalisme ont été sûrement stimulantes pour les travaux philosophiques et méthodologiques consacrés à la science.([Hempel 2012](#))(page 160).

Mais, l'interprétation trop étroite que les opérationnalistes ont donnée du caractère empirique de la science a plutôt obscurci l'aspect systématique et théorique des concepts scientifiques et l'interdépendance étroite qui existe entre la formation des concepts et celle des théories.([Hempel 2012](#))(page 160).

Hempel considère la vision de Bridgman comme impliquant que la signification d'un terme scientifique est limitée à des situations empiriques dans lesquelles il est possible réaliser la procédure opératoire consistant à la définir. Il reconnaît, comme le souligne également Gabriel Giovannetti([Giovannetti 2018](#)), que Bridgman faisait référence aux concepts correspondants à des ensembles d'opérations([Bridgman 1960](#)). Un tel choix de critères opératoires impose une exigence de cohérence: des procédures doivent donner le même résultat à chaque fois qu'elles sont utilisées. Des critères opératoires différents définissent des concepts différents et ceux-ci devraient être indiqués par des termes différents. Cette conclusion de Bridgman, visant l'ambiguïté, est draconienne selon Hempel. Bridgman aurait négligé l'importance de ce que Hempel appelle la signification systématique. Des résultats empiriques discordants qui violeraient l'exigence de cohérence entre procédures imposeraient la modification d'une des interprétations opératoires:

Le raisonnement qui étaye cette conclusion draconienne la justifie mal, car il met trop l'accent sur la nécessité de donner des termes scientifiques une interprétation empirique exempte d'ambiguïté, alors qu'il sous-estime l'importance de ce que nous appellerons leur signification systématique. Puisque l'exigence de cohérence entre deux procédures serait violée, il faudrait abandonner l'un des critères ([Hempel 2012](#)).(page 163).

Tandis qu'un corps de lois et finalement de principes théoriques se constitue progressivement dans un secteur donné de la recherche, des liens de diverses sortes s'établissent entre les concepts qu'il comporte, et entre ceux-ci et des concepts déjà existants. De tels liens fournissent souvent des critères d'application opératoires tout à fait nouveaux. La maxime opérationnaliste nous obligerait à une prolifération de concepts scientifiques([Hempel 2012](#)). (page 164).

Les concepts de la science sont les nœuds d'un réseau de relations mutuelles systématiques dont les lois et les principes théoriques forment les fils. Plus nombreux sont les fils qui convergent vers un concept-nœud, ou qui rayonnent à partir de lui, plus grand sera son rôle dans la constitution des systèmes scientifiques ou encore sa signification systématique. La signification systématique des concepts conduit impérieusement à en limiter la prolifération qu'appelle la maxime opérationnaliste, d'après laquelle des critères opératoires différents déterminent des concepts différents. Des considérations théoriques signaleront souvent à l'intérieur de quel domaine une méthode de mesure est applicable et avec quelle précision([Hempel 2012](#)).(page165).

L'opérationnalisme met légitimement l'accent sur la signification empirique des concepts scientifiques, en tant qu'elle se reflète dans de clairs critères d'application de ces derniers. Il est tout aussi indispensable qu'ils aient une signification systématique, à tel point même qu'on peut modifier l'interprétation empirique de concepts théoriques quand on veut accroître le pouvoir de systématisation d'un réseau théorique([Hempel 2012](#)).(page168).

Le développement d'une théorie entraîne souvent la modification des critères opératoires initialement adoptés pour définir une partie de ses concepts. Les développements contemporains en physique a montré le risque d'attribuer une signification physique à des paramètres théoriques en dehors de leur champ de déterminabilité opérationnelle. Les théories de la relativité et quantique avaient étendu des grandeurs vers des conditions dans lesquelles elles n'avaient jamais été mesurées avant. Pour cette raison, Bridgman a voulu limiter le champ inférentiel des paramètres théoriques aux opérations physiques particulières qui sont déployées pour fixer leur grandeur.

Une convergence entre les mesures d'une quantité peut être trompeuse si certaines d'entre elles sont susceptibles à des sources d'erreurs spécifiques à un domaine. La notion de signification physique de Bridgman est conçue comme un outil pour identifier les convergences fallacieuses:

Il faut supposer d'abord que différents indicateurs permettent d'inférer la grandeur d'un même paramètre théorique, puis de rendre compte ensuite des erreurs spécifiques à un indicateur. Cela peut rendre les scientifiques inutilement susceptibles d'être induits en erreur par la structure mathématique de leurs modèles et de faire face à la confusion une fois que les résultats de mesure cessent d'être cohérents. Ils devraient prendre leurs procédures de mesure pour avoir des cibles locales différentes jusqu'à ce que les différentes perturbations agissant dans les domaines spécifiques de tous les indicateurs soient pleinement comprises([Ohnesorge 2022](#)). (traduction)

Pour appliquer avec succès le pluralisme opérationnel, les scientifiques doivent non seulement viser à atteindre la convergence, mais développer des hypothèses pour expliquer les valeurs aberrantes en vertu de perturbations affectant uniquement des indicateurs de mesure spécifiques. Ces hypothèses peuvent ensuite être utilisées pour prédire des erreurs spécifiques à un domaine et elles sont évaluées en fonction de leur capacité d'accroître la cohérence des résultats de mesure.

La signification physique des paramètres théoriques doit être progressivement réalisée sous la forme d'une capacité croissante des scientifiques à anticiper les erreurs spécifiques à un domaine. Bridgman voulait que sa notion de signification physique soit opérationnalisée de plusieurs manières alternatives en termes d'opérations physiquement distinctes. Les représentations significatives sont celles qui produisent des écarts qui ont des sources physiquement identifiables.

3.2-Les principes ontologiques nécessaires à la mesure physique

Le sens mathématique formulé par les équations d'une théorie doit être connecté à leur sens opérationnel établi par les opérations de mesure pour justifier des concepts métriques.

Le sens mathématique indique à quels concepts de la théorie fait référence la grandeur à définir et le sens opérationnel est la représentation des méthodes de mesures disponibles.

Des exemples caractéristiques de principes de coordination peuvent paraître lors d'événements scientifiques au cours desquels des théories d'un niveau fondamental n'existent pas encore pour expliquer certains phénomènes. Une étude historique et analytique révèle la nécessité d'admettre un certain nombre d'hypothèses. Hasok Chang les appelle des principes ontologiques ([Giovannetti 2018](#)). Chang semble suivre Reichenbach en attribuant un caractère ontologique à ces principes constitutifs. Chang parle de principes métaphysiques synthétiques a priori contingents et révisables.

Nous devrions faire de notre mieux pour améliorer nos principes ontologiques, plutôt que d'abandonner la pratique de les spécifier et de les utiliser dans l'évaluation des systèmes de connaissances.

Si l'on considère attentivement l'œuvre d'Henri Victor Regnault, ce qui apparaît au premier abord comme l'empirisme le plus pur possible s'avère crucialement fondé sur un principe ontologique, qui ne peut avoir qu'une justification métaphysique([Chang 2004](#))(page 96) (traduction).

Hasok Chang dans son livre classique *Inventing Temperature*([Chang 2004](#)), évoquant implicitement Reichenbach, adopte des principes minimes essentiels à la pratique physique expérimentale. Il s'agit de stratégies épistémiques qui rendent possible la validation des procédés et la confirmation des résultats empiriques en l'absence d'un cadre théorique établi.

Les méthodes de justification fondationnalistes conçoivent futilement tout nouveau résultat de la science mathématique et physique sur la base des principes incontestables et évidents par eux-mêmes([Chang 2007](#)). La charge théorique dans la science empirique expose la circularité inhérente au fondationnalisme. Pour répondre à ce défi, Chang présente une stratégie cohérentiste d'itération épistémique, qui permet de définir un nouveau concept métrique en se fondant sur le moins de théorie possible. L'itération épistémique fournit une méthode efficace d'autocorrection afin d'attribuer à un concept une échelle stable, mais susceptible de transformations à l'intérieur d'un ensemble théorique.

Acceptant la vision cohérentiste, les principes ne sont pas évidents par eux-mêmes, mais pris dans leur ensemble, leur cohérence est considérée comme une indication de leur validité([Olsson 2021](#)).

Les principes ontologiques de Chang, ainsi que les principes de coordination, sont des liens entre les grandeurs mathématiques abstraites et les opérations empiriques de mesure.

La circularité est probablement la forme la plus invalidante de charge théorique de l'observation ([Chang 2004](#)) (page 61)(traduction).

L'essentiel de l'application des principes de la théorie doit entrer dans le processus de mesure par des moyens empiriques et préthéoriques, sans tomber dans un cercle vicieux. Un processus d'itération épistémique n'est pas soumis à une déduction logique. Chaque nouvelle étape retient par impératif de progrès au moins certains des éléments de la précédente. Par un principe pragmatique de respect, certaines lois empiriques bien vérifiées, qui permettent de fabriquer et d'utiliser des instruments de mesure, doivent être conservées:

La stabilité de la science empirique réside dans le remarquable degré de robustesse que possèdent certaines régularités de niveau intermédiaire, une robustesse que ni les sens-data ni les théories de haut niveau ne peuvent revendiquer.(page45)(traduction).

Ces lois, du moins dans le cadre des mesures qu'elles permettent, n'ont pas failli et n'ont pas été remises en cause depuis des centaines d'années([Chang 2004](#)).(page46).

Des théories rivales peuvent tout à fait s'approprier des lois empiriques solidement bien adaptées aux phénomènes. Ces principes généraux servent à réaliser des instruments de mesure. Une contrainte préthéorique proche de la circularité dicte la condition du progrès d'une étape à l'autre:

La contrainte sur la norme ultérieure est qu'elle doit montrer un accord suffisant avec la norme précédente.(page38).

Toute la question peut être vue sous un jour plus instructif si nous cessons de chercher une relation logique statique de la justification, et essayons plutôt d'identifier un processus dynamique de construction de la connaissance.(page 38)

L'empirisme strict n'est pas suffisant pour la construction de la connaissance scientifique([Chang 2004](#)).(page88)(traduction).

Chang a cité amplement l'empirisme rigoureux du physicien expérimental Henri Victor Regnault (1810–1878).

Regnault insistait sur le fait que les données empiriques ne devaient pas être acquises au moyen de procédures de mesure qui reposent sur des hypothèses qui n'ont pas été vérifiées empiriquement par l'observation. Une telle exigence est difficilement envisageable en vue du grand nombre d'hypothèses nécessaires à la réalisation des opérations de mesure. Chang a soutenu que certaines des hypothèses applicables ne sont pas empiriques, ce qui évoque des énoncés synthétiques a priori.

Regnault devait comparer les échelles obtenues par différents thermomètres à gaz construits sur la base de l'hypothèse de la linéarité. L'hypothèse de la linéarité repose sur la loi des gaz parfaits, elle affirme que l'évolution du volume d'un gaz en fonction de la température doit être parfaitement linéaire. L'objectif était d'éliminer par la surdétermination les thermomètres qui s'éloignent trop du comportement du gaz parfait;

Une méthode de test d'hypothèses dans laquelle on effectue des déterminations multiples d'une certaine quantité, sur la base d'un certain ensemble d'hypothèses. Si les multiples déterminations concordent les unes avec les autres, cela tend à plaider en faveur de l'exactitude ou de l'utilité de l'ensemble d'hypothèses utilisées. S'il y a un désaccord, cela tend à aller à l'encontre de l'ensemble d'hypothèses. La surdétermination est un test de consistance physique, basé sur le principe de valeur unique qui soutient qu'une grandeur physique réelle ne peut avoir plus d'une valeur dans une situation donnée([Chang 2004](#))(page97)(traduction).

Regnault a choisi parmi les différents gaz celui qui s'écartait le moins de la moyenne de mesures de tous les gaz, puis il a adopté la dilatation de ce gaz comme étalon de la loi des gaz parfaits. Conformément à l'opérationnalisme, il a retenu autant de concepts de température que de thermomètres puis il a corrigé l'échelonnage des graduations sur le thermomètre (traduction):

La beauté des travaux de Regnault sur la thermométrie réside dans le fait qu'il a réussi à organiser la surdétermination sans recourir à des hypothèses supplémentaires significatives concernant la chaleur et la température. Regnault s'est rendu compte qu'il y avait déjà assez dans l'hypothèse de base elle-même pour soutenir la surdétermination. Une température donnée pouvait être surdéterminée en la mesurant avec différents thermomètres du même type. La surdétermination n'avait pas besoin d'impliquer d'hypothèses supplémentaires incertaines. L'œuvre de Regnault illustre ce que j'appellerai la stratégie de la surdétermination minimaliste([Chang 2004](#)).(page 98).

Le travail expérimental de Regnault, conçu avec le moins possible d'hypothèses théoriques, réclamait toutefois l'acceptation d'un ensemble minime d'hypothèses et en particulier le principe de la valeur unique.

Ce principe assure que dans un système physique en une situation donnée, une propriété physique concrète ne peut avoir plus d'une seule valeur spécifique. La mesure d'une grandeur ne peut pas donner des résultats qui diffèrent plus que la marge d'erreur expérimentale.

Chang a désigné ici une formulation réaliste du principe de la valeur unique. Ce n'est pas la logique, mais la consistance physique qui génère la primauté du principe de valeur unique. Par ailleurs, le principe de valeur unique n'est clairement pas une hypothèse empirique ([Giovannetti 2018](#)).

Le principe de valeur unique est un excellent exemple de ce que j'ai appelé les principes ontologiques, dont la justification n'est ni par la logique ni par l'expérience. Les principes ontologiques sont ces hypothèses qui sont généralement considérées comme des caractéristiques essentielles de la réalité au sein d'une communauté épistémique, qui forment la base d'intelligibilité dans tout récit de la réalité([Chang 2004](#))(page95)(traduction).

Il y a une différence significative entre les principes ontologiques de Chang et l'a priori synthétique de Kant. On ne peut pas prétendre que leur exactitude est indubitablement absolue et éternelle. Ils ne sont pas des propriétés essentielles de la réalité, mais des représentations adéquates toujours valables des phénomènes.

Chang a largement accepté l'analyse opérationnaliste de la difficulté rencontrée en élargissant des concepts quantitatifs en physique, si bien exprimée par Bridgman. L'usage d'un mot, négligeant la convergence dans des domaines différents, et la représentation d'un concept, si on croit qu'il existe naturellement une échelle pour ce concept, induisent en erreur. On pourrait penser, par l'attribution de l'échelle des nombres réels, que les quantités physiques doivent exister de manière significative jusqu'à une précision infinie.

Les critiques traditionnelles donnent une impression incorrecte du caractère indéniablement empirique de l'opérationnalisme. Bridgman n'a pas proposé de réduire la portée des concepts physiques à leur signification opérationnelle, mais de l'agrandir. Chang expose l'intention véritable de Bridgman d'augmenter le contenu empirique des théories par l'utilisation de concepts métriques bien définis sur le plan opérationnel, au-delà du domaine où leur application est connue. Chaque concept doit être supporté par des définitions opérationnelles, pour garantir que le concept est mesurable indépendamment dans toutes les circonstances dans lesquelles il est utilisé. Un concept qui connaît déjà un domaine d'usages établi acquiert de nouveaux usages en s'appliquant à un champ nouveau, indépendamment de sa signification opérationnelle.

La signification opérationnelle d'un concept ne s'épuise pas en changeant d'opérations de mesure. Une extension nécessite une nouvelle norme de mesure qui est reliée à l'ancienne d'une manière cohérente. Chang exige une conformité supplémentaire d'un nouveau concept métrique avec des usages précédents, pour assurer qu'ils augmentent la portée des mesures de la même grandeur à différentes échelles. Des principes ontologiques qui assurent aux représentations mathématiques un contenu empirique autorisent l'extension à de nouveaux usages.

Bridgman disait qu'une construction mentale ne pouvait se voir attribuer une réalité physique que si sa signification opérationnelle était plus large que sa définition. Suivant Chang, l'explication de la relation entre les normes antérieures et ultérieures réside dans le principe de respect. Il n'est pas une simple relation logique, mais un processus dynamique de la construction des connaissances. L'itération épistémique est un processus dans lequel des étapes de connaissances, chacune s'appuyant sur la précédente, sont créées afin d'améliorer la réalisation de certains objectifs épistémiques([Chang 2004](#)).

L'itération épistémique est un processus d'évolution créatrice. Le stade ultérieur est basé sur le stade antérieur, mais ne peut en être déduit directement. Chaque lien est basé sur le principe de respect et l'impératif de progrès. Il y a très peu de cas réels dans lesquels nous pourrions être sûrs que nous approchons de la vérité par itération épistémique([Chang 2004](#)).

Les travaux de James Woodward et James Bogen([Bogen 1988](#)), cités par Chang, sur la distinction entre données et phénomènes renforcent l'argument selon lequel la stabilité se trouve dans les phénomènes, et non dans les données individuelles à partir desquelles nous construisons les phénomènes. Des mesures pragmatiques pour garantir des points fixes de thermométrie étaient en place bien avant qu'il y ait eu une bonne compréhension théorique de leur efficacité. Une fois les points fixes établis, des thermomètres numériques ont pu être créés en trouvant une procédure pour attribuer des nombres aux degrés de chaleur entre les points fixes([Chang 2004](#)).

Le problème de mesure nomique empêche d'avoir les relevés de température avant d'avoir un thermomètre fiable. Ce problème n'est pas propre à la thermométrie. Chaque fois que nous avons une méthode de mesure qui repose sur une loi empirique, nous avons le même genre de problème pour tester et justifier cette loi.

L'empirisme rigoureux insiste sur le fait que les données empiriques ne seront pas acquises au moyen de procédures de mesure qui reposent elles-mêmes sur des hypothèses qui n'ont pas été vérifiées par l'observation. Pour voir dans quelle mesure l'empirisme strict est applicable, un examen de ce que signifie faire des observations devient nécessaire. Bas van Fraassen([Van Fraassen 2008](#)) discerne par observabilité une perceptibilité en principe par les sens humains sans aide. C'est possible d'adopter utilement une autre conception de l'observabilité qui tient compte de la contingence historique et du progrès scientifique. Tout lien qui peut exister entre l'observable et l'inobservable est contingent suite au progrès scientifique([Chang 2004](#)).

La précision expérimentale a été la préoccupation majeure de l'empirisme qui a dominé la physique française du XIXe siècle. La révolution de Henri Victor Regnault a été une révolution dans la physique expérimentale. Regnault s'est confronté à la circularité fondamentale de la mise à l'épreuve des théories. S'il s'avérait que certaines des régularités empiriques les plus fiables étaient fausses, aucune d'entre elles ne pourrait être digne de confiance. Il était évident que les méthodes de mesure existantes reposaient sur des régularités théoriques, le genre qu'il espérait tester de manière concluante par des mesures. Pierre Duhem([Duhem 1914](#)) disait que Regnault avait opéré une vraie révolution en physique.

Lorsqu'une méthode de mesure d'un concept est étendue à un nouveau domaine, il n'y a qu'un type particulier d'extension opérationnelle, qui n'est en soi qu'un aspect de l'extension sémantique. La validité devient une question intéressante si le concept possède une signification plus large que la spécification de la méthode de sa mesure. On est confronté à un problème de sous-détermination.

Il existe de nombreuses stratégies possibles pour l'extension d'une norme de mesure et chaque stratégie donnée permet également de nombreuses extensions possibles différentes. Dans les nouveaux domaines, les significations existantes ne seront pas suffisamment précises pour effectuer une détermination sans ambiguïté de la norme de mesure correcte. S'appuyer sur la convergence de diverses normes revient à adopter le cohérentisme après l'échec avéré du fondationnalisme([Chang 2004](#)).

La cohérence devient un guide pour un processus dynamique de formation de concepts, et de construction de connaissances. Une stratégie d'ancrage mutuel commence par accepter la sous-détermination en ne forçant pas un choix entre des options également valables.

Dans le cadre du choix des normes de mesure, accepter la pluralité signifie accepter l'imprécision, avec la promesse d'une consolidation ultérieure. L'aspect de cohérence immédiatement recherché est une convergence numérique des résultats de mesure([Chang 2004](#)).

L'opérationnalisation d'une théorie abstraite implique l'opérationnalisation de certains concepts individuels qui s'y trouvent, afin qu'ils puissent servir de ponts clairs et pratiques entre l'abstrait et le concret. Un moyen sûr d'opérationnaliser un concept est de le rendre physiquement mesurable. L'opérationnalisation d'un concept théorique peut être réalisée par une chaîne de relations qui le relie à des propriétés directement observables. Une réduction qui exprime le concept en termes d'autres concepts n'aboutit à rien tant que ces autres concepts n'ont pas été opérationnalisés.

Dans l'établissement des données fondamentales de la physique, il faut que la démarche adoptée soit la réalisation matérielle de la définition de l'élément recherché. Un concept théorique reçoit sa caractérisation abstraite à travers ses diverses relations avec d'autres concepts théoriques constituant un système abstrait. La première étape de l'opérationnalisation est de trouver une image concrète du système abstrait qui définit le concept abstrait.

La deuxième étape de l'opérationnalisation consiste à trouver un système physique réel d'entités et d'opérations qui correspond à l'image. Un concept abstrait non opérationnalisé ne correspond à rien de défini dans le domaine des opérations physiques, auquel appartiennent les valeurs des quantités physiques. Une fois qu'une opérationnalisation est faite, le concept abstrait possède des valeurs dans des situations concrètes. Les valeurs sont des produits de l'opérationnalisation et non des normes indépendantes par rapport auxquelles nous pouvons juger de l'exactitude de l'opérationnalisation elle-même. Une opérationnalisation valide consiste en une bonne correspondance entre le système abstrait et son image concrète, et entre l'image concrète et un système d'objets et d'opérations réels.

Avec un processus itératif, on ne s'attend jamais à avoir une concordance exacte entre l'image opérationnelle et les opérations réelles, mais on espère une convergence progressive entre elles. Si toutes les tentatives d'améliorations itératives d'un système aboutissent à une contradiction, cela peut être considéré comme un échec du système lui-même. Une telle autodestruction répétée est aussi proche que possible d'une falsification empirique du système initialement affirmé.

Les valeurs épistémiques sont prises comme critères par lesquels porter des jugements sur les systèmes de connaissance, et comme vertus épistémiques lorsqu'elles sont prises comme de bonnes qualités possédées par les systèmes de connaissance.

En essayant de justifier les méthodes de mesure, la circularité inhérente au fondationnalisme empiriste devient évidente. La seule manière productive de traiter cette circularité est de l'accepter et d'admettre que la justification dans la science empirique doit être cohérente. Au sein d'un tel cohérentisme, l'itération épistémique fournit une méthode efficace de progrès scientifique, aboutissant à l'enrichissement et à l'autocorrection du système initialement affirmé. Il n'y a aucune garantie que la méthode d'itération épistémique réussira toujours([Chang 2004](#)).

Des procédés basés sur les modèles et l'épistémologie de la mesure

Des études récentes ont mis en évidence la modélisation théorique et statistique des instruments de mesure et les moyens par lesquels les instruments de mesure recueillent des informations fiables. La mesure est à l'avant-garde de la recherche en philosophie des sciences. Des intervenants, plutôt que de tenter d'éviter complètement la circularité, ils ont entrepris de montrer qu'elle n'est pas nuisible.

Dans ce chapitre, je présente certaines idées centrales afin de montrer quelles sortes d'inférences sont impliquées dans l'étalonnage et la normalisation des instruments de mesure, et comment les hypothèses théoriques et statistiques sur le processus de mesure figurent dans ces inférences.

La coordination réussit parce qu'elle augmente la cohérence entre les éléments de la théorie et de l'instrumentation dans un processus de raffinement mutuel. Cette littérature sur la coordination déplace l'accent de la discussion de la définition des termes de quantité vers les réalisations de ces définitions et donc vers la métrologie, la science de la mesure. Les méthodes utilisées pour concevoir, entretenir et comparer les instruments ont une incidence directe sur l'application pratique des concepts de quantité, d'unité et d'échelle, tout autant que leurs définitions.

Eran Tal montre sa récusation de ceux qu'il amalgame sous le terme de conventionnalistes, qui auraient selon lui une vision statique des mécanismes de coordination, négligeant la pratique de l'expérimentation et la nature graduelle et cumulative du progrès scientifique. Selon Tal:

les conventionnalistes voyaient dans l'usage d'un terme un déplacement soudain et arbitraire plutôt qu'une marque de progrès scientifique([Tal 2013](#)). (page 4)(traduction).

Selon Flavia Padovani :

La cible, ici, ce sont les interprétations traditionnelles issues de la ligne conventionnaliste. Van Fraassen et Tal ne rendent pas pleinement justice à certains éléments importants qui sous-tendent le concept original de coordination de Reichenbach. La première exposition de Reichenbach ne peut pas être définie comme conventionnaliste au sens strict du terme, comme Tal et van Fraassen ont tendance à l'interpréter.([Padovani 2017](#))(page 50,58)(traduction).

L'épistémologie de la mesure s'interroge sur les conditions concrètes dans lesquelles les méthodes de mesure et de normalisation produisent des connaissances, leur nature, la portée, les limites de ces connaissances, et les sources de leur fiabilité¹.

Les résultats de mesure sont obtenus à partir d'indications par une chaîne d'inférences particulières qui dépendent des hypothèses théoriques et statistiques avec lesquelles le processus de mesure est représenté. Les issues de mesure sont distinguées en deux types. Du point de vue concret, on parle d'indications d'instrument, à savoir les états finaux d'un instrument après chaque cycle de mesure. Dans l'abstrait, les résultats de mesure sont des déclarations de connaissances sur l'état de l'objet d'intérêt. Des études contemporaines montrent que les modèles théoriques et statistiques d'un processus de mesure sont des exigences pour obtenir des résultats de mesure significatifs.

Dans les méthodes basées sur les modèles d'Eran Tal, les modèles fonctionnent comme des instruments de mesure. Pour obtenir une fonction d'étalonnage, l'appareil, l'objet mesuré et l'environnement doivent tous être modélisés, c'est-à-dire représentés de manière abstraite. Quelle fonction d'étalonnage et donc quels résultats de mesure seront associés à l'appareil, dépendent des hypothèses avec lesquelles le processus de mesure est modélisé.

Margaret Morrison([Morrison 1999](#)) a fait valoir que certaines simulations informatiques en physique, telles que les méthodes utilisées pour simuler l'évolution des systèmes de particules, fonctionnent comme des instruments de mesure, en raison de leur similitude avec les expériences de laboratoire. Elle a indiqué que le travail épistémique impliqué dans la mesure et l'expérimentation est effectué au niveau de la représentation abstraite. Les prétentions à la précision des mesures et à la validité expérimentale sont finalement justifiées en faisant appel aux modèles théoriques représentant l'objet et l'appareil expérimental, plutôt qu'aux propriétés matérielles. Tant que les modèles théoriques et les algorithmes sont bien construits, les simulations informatiques ont toutes les caractéristiques épistémiques essentielles des expériences de laboratoire, et les résultats de ces simulations devraient correctement compter comme des mesures².

¹ Patrick Suppes(Thagard 2009) a considéré que la mesure était synonyme d'attribution de nombres ou de construction d'échelle, et a négligé les aspects appliqués de la mesure tels que l'étalonnage.

² Pour Wendy Parker, Parker, W. S. (2017). "Computer Simulation, Measurement, and Data Assimilation." [British Journal for the Philosophy of Science](#) **68** 273–304. également, certains résultats de simulation peuvent être considérés à juste titre comme des mesures.

On pourrait penser que l'utilisation d'hypothèses théoriques dans la conception des appareils de mesure et l'interprétation de leurs indications est une menace à la neutralité des mesures. C'est ce qu'on appelle la charge théorique. Bien au contraire, Tal considère que la mesure n'est possible que dans un contexte théorique riche. Il est ardu de préciser quelle sorte de rapport à l'observation est suffisant pour conférer à la mesure son statut épistémique privilégié.

Le travail de Tal aborde des questions sur la fiabilité épistémique de la mesure en faisant appel à la cohérence entre les éléments de la méthodologie scientifique tels que les instruments, les modèles, les outils d'analyse statistique et les théories de base plutôt qu'aux fondements observationnels de la connaissance. Sa recherche basée sur des modèles vise à clarifier les rôles joués par les modèles théoriques et statistiques dans la production et la validation de la mesure.

4.1-Structure inférentielle des procédures d'étalonnage

La conception de l'étalonnage basée sur un modèle vise à clarifier la source d'objectivité des résultats de mesure, la nature de la précision de la mesure et la relation étroite entre la mesure et la prédiction. L'étalonnage établit une relation fiable entre les indications d'un instrument et les caractéristiques pertinentes d'un objet (Tal 2017). Il s'agit d'un type particulier d'activité de modélisation où le système modélisé est un processus de mesure. Pour Eran Tal, à la suite de Margaret Morrison, les modèles fonctionnent de manière autonome par rapport aux théories de fond qui ont informé leur construction. Un modèle est une représentation abstraite qui identifie quelles valeurs de paramètres prédisent de manière cohérente et précise les états finaux du processus de mesure.

L'étalonnage n'est pas toujours utilisé dans un sens métrologique en physique expérimentale. Allan Franklin a défini l'étalonnage comme l'utilisation d'un signal de substitution pour standardiser un instrument. Un signal de substitution est un système bien compris qui ressemble à certains égards au système que l'on souhaite détecter. Si l'appareil expérimental détecte ou mesure correctement les propriétés pertinentes du signal de substitution, cela est considéré comme une preuve de la capacité de l'appareil à détecter ou à mesurer le phénomène cible. Les exemples historiques de Franklin jettent un éclairage précieux sur ces questions, mais il ne tente pas d'offrir un compte rendu global de la structure inférentielle de l'étalonnage, et il ne s'engage pas non plus dans la littérature métrologique sur ce sujet. Franklin n'a pas tenté de fournir une épistémologie complète de l'étalonnage.

La première étape pour élucider la structure inférentielle de l'étalonnage consiste à faire la distinction entre les indications de l'instrument et les résultats de mesure. Une indication est l'état final d'un instrument de mesure une fois le processus de mesure terminé. Un résultat de mesure est une revendication de connaissance attribuant une ou plusieurs valeurs de paramètre à l'objet ou à l'événement mesuré. Des hypothèses de base théoriques et statistiques sont formulées et testées sur le comportement de l'instrument. L'objectivité des résultats de mesure s'avère être fondée sur des considérations de cohérence entre modèles du processus de mesure.

Le but ultime de l'étalonnage est d'établir des inférences. L'étalonnage établit une relation entre les valeurs de quantité fournies par les étalons de mesure et les indications correspondantes de l'instrument, et dans une deuxième étape, il établit une relation entre les indications de l'instrument et les résultats de la mesure.

L'objectif de la première étape d'étalonnage proposée par Tal est d'évaluer les incertitudes associées à la mise en correspondance des valeurs de quantité standard avec les indications. Une fonction d'étalonnage vers l'avant³ établit une relation entre les valeurs de la quantité à mesurer et les indications de l'instrument. La fonction d'étalonnage vers l'avant peut comprendre des variables représentant des grandeurs supplémentaires qui influencent les indications de l'instrument. Cela implique de formuler des hypothèses théoriques et statistiques sur le processus de mesure et de tester empiriquement leurs conséquences. Tal la désigne fonction vers l'avant, car elle convertit les valeurs de quantité en indications d'instrument, conformément à l'ordre temporel du processus de mesure. La fonction vers l'avant élucide quelles indications l'instrument de mesure produira pour un objet donné, en supposant que le modèle du processus de mesure est adéquat.

La fonction d'étalonnage vers l'avant doit être ensuite inversée. Cette inversion constitue la deuxième étape de l'étalonnage proposée par Tal. Le but de l'étalonnage n'est pas de prédire des indications à partir de valeurs connues de la quantité d'intérêt, mais d'inférer des valeurs de quantité jusqu'alors inconnues à partir d'indications observées. Dans cette étape, une fonction d'étalonnage à rebours⁴ établit une relation entre les indications observées d'un instrument et les valeurs de la quantité mesurée, c'est-à-dire les résultats de la mesure correspondants.

³ Forward calibration function.

⁴ Backward calibration function

Cette fonction est construite de manière à ce que les estimations de valeurs de la quantité soient égales aux valeurs qu'auraient prédites les mêmes indications lors de la première étape de l'étalonnage. Comme la fonction vers l'avant, la fonction d'étalonnage à rebours peut inclure des variables d'entrée supplémentaires. Une fois la fonction à rebours établie, elle peut être utilisée pour inférer des valeurs inconnues de la grandeur pertinente.

Les fonctions d'étalonnage à rebours sont parfois appelées équations modèles. Les deux fonctions qui viennent d'être mentionnées sont obtenues en construisant des modèles du processus de mesure et en dérivant des prédictions à partir de ces modèles. Considérer l'étalonnage comme une activité de modélisation fournira la clé pour comprendre comment la mesure produit des connaissances objectives. Une généralisation inductive d'indications d'instruments observées vers les non observées, est impliquée dans l'étalonnage. Les résultats de mesure doivent être retenus en fonction de leur capacité à prédire les indications dans le contexte d'un modèle idéalisé spécifique. On tire une inférence à rebours, à partir des indications observées vers un ensemble de valeurs de paramètres dans le modèle qui a une probabilité donnée de prédire correctement ces indications. L'inférence à rebours est nécessaire, car les valeurs du prédicteur ne peuvent pas être observées indépendamment de toute mesure.

Les deux étapes d'étalonnage impliquent ensemble une inférence à partir des indications observées d'un instrument vers les meilleurs prédicteurs de ces indications sous un modèle donné du processus de mesure. Les meilleurs prédicteurs doivent être compris en termes de maximisation de certaines vertus épistémiques, telles que la cohérence avec les valeurs associées aux normes, la cohérence avec les théories de fond et la précision prédictive. Les philosophes des sciences ont employé une variété de concepts d'observation. L'argument avancé par Tal ne nécessite aucun engagement et est compatible avec tout concept d'observation qui exclut l'inférence explicite. Les résultats des mesures sont donc des prédicteurs basés sur un modèle. La meilleure estimation de la quantité mesurée est déduite en fonction de sa capacité à prédire l'indication observée. Les incertitudes de mesure sont des incertitudes prédictives.

On peut distinguer entre procédures en boîte noire et boîte blanche. Dans certains instruments, les inférences complexes impliquées dans l'obtention d'un résultat de mesure à partir d'une indication sont mises en boîte noire. Dans les procédures d'étalonnage de la boîte noire, les paramètres supplémentaires sont négligés, le fonctionnement interne de l'instrument est simplifié.

L'étalonnage de la boîte noire est utile lorsque le comportement de l'appareil est déjà bien compris. L'estimation de valeurs de la quantité qui en résulte n'est pas corrigée de l'influence des facteurs extrinsèques susceptibles d'affecter le comportement de l'instrument. Ces facteurs locaux peuvent être liés aux interactions entre les parties de l'instrument, l'objet mesuré et l'environnement. Les modèles de boîte noire fournissent des résultats dans une variété de circonstances, mais avec une faible précision.

Les procédures d'étalonnage de la boîte blanche représentent le processus de mesure plus en détail. Le modèle boîte blanche d'un processus de mesure implique des hypothèses concernant la grandeur destinée à être mesurée, l'échelle à laquelle elle est mesurée, ses relations avec d'autres grandeurs, les composants de l'instrument de mesure et leurs interactions mutuelles, l'objet mesuré, y compris son interaction avec l'instrument, les effets d'arrière-plan et leurs interactions avec l'objet et l'instrument, les opérateurs humains, les procédures de traitement des données.

Dans les représentations en boîte blanche, des paramètres supplémentaires sont inclus qui médiatisent la relation entre les indications et les résultats. Les paramètres sont supposés entrer dans diverses dépendances les uns avec les autres ainsi qu'avec la quantité mesurée et les indications de l'instrument. De telles dépendances sont spécifiées à la lumière des théories de base et testées par des expériences secondaires.

Un test consiste à enregistrer les indications produites par l'instrument en réponse à un ensemble d'objets de référence. Ces valeurs sont connectées à la fonction vers l'avant d'un instrument de test et utilisées pour prédire ses indications. Ces prédictions sont ensuite comparées aux indications réelles produites par l'instrument de test. Les écarts entre les indications réelles et prévues peuvent être traités comme aléatoire. Les indications observées peuvent également s'écarter des indications prédites parce que ces prévisions sont basées sur des estimations inexactes de paramètres supplémentaires et des effets d'arrière-plan. Lors de l'évaluation de l'incertitude, la fonction d'étalonnage vers l'avant, finalement inversée pour obtenir la fonction d'étalonnage à rebours, est itérativement raffinée pour vérifier sa compatibilité avec les indications observées.

Une fois suffisamment amélioré pour tenir compte des écarts, le modèle de la boîte blanche est projeté au-delà des circonstances d'étalonnage.

Une hypothèse de constance est nécessaire pour obtenir une fonction d'étalonnage de boîte blanche en inversant la fonction vers l'avant. La fonction est censée fournir des résultats de mesure fiables uniquement lorsque des paramètres supplémentaires se situent dans les plages de valeurs spécifiées. Les modèles de boîte blanche spécifient étroitement les facteurs locaux, mais leurs conséquences ne peuvent être projetées que dans ce cadre étroit.

Qu'il soit obtenu par un étalonnage de la boîte noire ou de la boîte blanche, un résultat de mesure est un prédictor basé sur un modèle des indications de l'instrument, et l'incertitude de mesure est l'incertitude associée à une telle prédiction basée sur un modèle. Tal a en conséquence caractérisé l'étalonnage comme une activité de modélisation dans laquelle les scientifiques représentent un processus de mesure sous des hypothèses théoriques et statistiques idéalisées, utilisent ces hypothèses pour faire des prédictions sur les états finaux du processus, testent de manière itérative ces prédictions par rapport aux indications observées et s'appuient sur ces modèles pour dessiner des inférences à rebours aux meilleurs prédictors d'indications.

L'étalonnage repose sur des normes de mesure. Les étalons métrologiques ont un rôle épistémique particulier à jouer dans l'étalonnage, mais pour Tal ce rôle est plus modeste qu'on ne le suppose généralement. L'étalonnage est parfois effectué avec succès en l'absence d'étalons de mesure clairement spécifiés, par comparaison directe entre les instruments de mesure.

Les normes métrologiques fonctionnent comme des outils de médiation pour assurer la cohérence entre les modèles de différents processus de mesure et les théories d'arrière-plan qui informent leur construction.

Peu importe que la procédure de référence soit ou non une norme métrologique sanctionnée, car l'incertitude associée aux normes métrologiquement sanctionnées est évaluée par les mêmes types d'inférences que l'incertitude de toute autre procédure de mesure.

Lors de l'étalonnage, une procédure de référence est utilisée pour représenter les valeurs de la grandeur destinée à être mesurée. Pour que différents instruments mesurent le même type de quantité, les instruments doivent être modélisés en fonction du même paramètre dans une théorie d'arrière-plan. Un ensemble d'instruments de mesure sont comparés les uns aux autres. Il est logique d'appeler l'instrument le plus précis, la référence et les autres les instruments de test.

L'incertitude des procédures de test et de référence est finalement évaluée sur la base des mêmes types de considérations, à savoir en fonction de la cohérence mutuelle des résultats de mesure obtenus par différentes procédures et des hypothèses du modèle avec les connaissances établies. Les normes de mesure ne sont pas nécessairement les procédures les plus précises disponibles pour déterminer les valeurs d'un type de grandeur donné. Il ne fait aucune différence épistémique que l'on étalonne par rapport à un étalon métrologique ou par rapport à une autre procédure de mesure.

Le maintien de la cohérence nécessite des comparaisons fréquentes, ce qui est pratiquement difficile lorsque les instruments sont nombreux et éloignés les uns des autres. Un vaste réseau d'instruments de mesure peut se réduire en un ensemble d'instruments localement cohérents, mais mutuellement incompatibles, chacun employant une politique différente pour maintenir l'accord entre les résultats. Les normes métrologiques jouent un rôle important dans la garantie d'une cohérence à grande échelle entre les résultats de mesure.

Des normes métrologiques relient des parties distantes du réseau en légiférant sur la façon dont un concept de quantité abstrait doit être appliqué. Les normes sont donc nécessaires pour légiférer sur une politique cohérente de répartition des erreurs systématiques sur de vastes réseaux de comparaisons d'instruments. La cohérence globale est restaurée en fixant les valeurs des constantes. On constate donc que l'étalonnage est l'activité de modélisation d'un processus de mesure d'une manière qui soit cohérente avec les connaissances sur les concepts de quantité pertinents et rend l'application de ces concepts cohérente à travers différents types d'objets mesurés, de procédures de mesure et de circonstances externes.

L'étalonnage ne peut pas constituer un test des résultats de mesure sans aucune hypothèse théorique ou statistique d'arrière-plan, dit Tal. L'étalonnage est mieux considéré comme impliquant un test de cohérence implicite, c'est-à-dire un test de l'invariance des résultats de mesure à travers différents instruments et circonstances, et à travers différentes façons d'appliquer les théories.

Les procédures d'étalonnage constituent des tests implicites pour la satisfaction d'une condition de robustesse généralisée. Étant donné plusieurs processus divers utilisés pour mesurer des quantités connexes, les incertitudes attribuées à leurs résultats sont adéquates si et seulement si les résultats de mesure sont mutuellement cohérents, les incertitudes sont dérivées de modèles adéquats.

Les résultats de mesure qui réussissent ce test sont invariants au contexte. L'invariance contextuelle des résultats de mesure explique comment les résultats de mesure peuvent assumer le statut de connaissance objective. Par ce type de cohérence, l'étalonnage renvoie des prédictions basés sur un modèle d'un processus local, vers des revendications de connaissances sur l'objet mesuré indépendamment de tout processus de mesure particulier. En réussissant le test de cohérence, ces résultats de mesure deviennent de bons prédicteurs des résultats d'autres processus de mesure.

Les opérations d'étalonnage testent non seulement la cohérence et la précision prédictives des modèles, mais également la portée prédictive des théories sous-jacentes à ces modèles. L'augmentation de la portée prédictive est en soi une vertu épistémique. L'étalonnage vise à établir la cohérence entre les résultats de mesure ainsi qu'entre les modèles et les connaissances d'arrière-plan. L'étalonnage est une activité complexe consistant à construire, à dériver des prédictions, à répartir les incertitudes et à tester de manière itérative des modèles d'un processus de mesure.

De telles inférences ne confèrent pas de certitude. Plus le réseau d'instruments est varié et plus chaque instrument est rigoureusement modélisé et testé, plus les scientifiques peuvent être confiants dans l'objectivité et la précision des résultats de leurs mesures. La cohérence explique comment il est possible d'évaluer la fiabilité des instruments de mesure malgré l'inaccessibilité des valeurs réelles des grandeurs. Les résultats de mesure sont des prédicteurs rendus objectifs par la cohérence.

L'exigence de modéliser les résultats en termes de la même quantité équivaut à une exigence de cohérence généralement valable entre les modèles spécifiés en termes de ce type de quantité. Dans le cadre de l'approche basée sur un modèle, les affirmations sur l'individuation quantitative et les affirmations sur l'exactitude des mesures ne peuvent être établies que par un soutien mutuel (Tal 2019). Le concept d'erreur systématique est au moins aussi épistémiquement riche et digne d'attention philosophique que le concept de quantité. La sous-détermination laisse la place aux scientifiques pour unifier les concepts de quantité.

4.2-Les cas paradigmatiques d'étalonnage

On trouve un exemple important d'étalonnage dans les études d'attribution qui se concentrent généralement sur les façons dont le changement climatique a rendu un événement météorologique plus grave ou plus susceptible de se produire.

L'attribution a reçu moins d'attention que la prédiction dans la littérature philosophique. L'inférence s'appuie fortement à la fois sur les connaissances d'arrière-plan et sur les statistiques. Les modifications apportées aux techniques statistiques dans les études d'attribution s'apparentent à l'étalonnage, où un instrument ou un modèle utilisé dans une procédure de mesure est modifié dans le but de produire des résultats de mesure plus précis, plus exacts([Dethier 2022](#)).

Les changements d'outils inférentiels et d'instruments physiques impliqués dans la mesure sont entendus comme ayant les mêmes implications épistémologiques. Les cas paradigmatiques d'étalonnage trouvés dans des discussions telles que Tal([Tal 2017](#)) et Bokulich([Bokulich 2020](#)) décrivent les changements apportés aux modèles statistiques comme des altérations d'un instrument. Le nouveau modèle est meilleur que l'ancien dans la mesure où il est plus fiable pour autoriser des inférences précises.

Une procédure est une mesure lorsqu'il s'agit d'attribuer des valeurs à des quantités d'intérêt sur la base d'interactions entre des instruments physiques et le système à représenter. Tal a inspiré les récentes propositions selon lesquelles l'attribution de valeurs ne peut pas être effectuée sans un modèle tacite. Un scientifique est justifié de tirer des conclusions à partir de lectures instrumentales sur la valeur d'une quantité d'intérêt, s'il tient compte des hypothèses d'arrière-plan.

L'étalonnage consiste à ajuster un outil afin que le résultat de la mesure soit plus précis. Les modèles statistiques utilisés dans la mesure peuvent subir des altérations similaires à l'étalonnage. Dans la littérature récente, sur la philosophie de la mesure, on remarque en particulier deux interprétations de l'étalonnage.

Selon Tal([Tal 2017](#)), les résultats d'un processus d'étalonnage sont des fonctions qui retracent inversement les lectures instrumentales des résultats. L'étalonnage est une question d'identification des fonctions appropriées. Bokulich([Bokulich 2020](#)), en revanche, s'écarte explicitement de la conception de Tal en considérant que l'étalonnage n'est pas une question de modélisation, mais de modification du processus de mesure. Là où Tal comprend que l'étalonnage consiste à identifier les fonctions qui relient les lectures aux résultats, pour Bokulich, il s'agit d'accorder le processus de mesure pour tenir compte de ces informations.

Pour Tal, l'étalonnage consiste à déterminer comment les lectures sur une échelle se rapportent à la quantité cible lorsque des paramètres auxiliaires sont fixés d'une façon appropriée. Pour Bokulich, la collecte d'informations est une étape différente de leur mise en pratique.

Elle désigne l'étalonnage comme l'étape d'introduction de modifications théoriques à l'instrumentation physique en tenant compte des représentations tirées de sources de preuves discordantes ou indépendantes. Elle soutient que la littérature philosophique ne parvient pas à distinguer les tests de cohérence à la fois de l'étalonnage et de la consilience. La consilience fait référence à la convergence de plusieurs sources de données indépendantes sur une hypothèse particulière.

Tal ([Tal 2017](#)) définit l'étalonnage comme une sorte de test de cohérence. Pour Bokulich, les tests de cohérence précèdent les arguments d'étalonnage ou de consilience et mettent en évidence la façon dont les scientifiques apprennent à partir de sources de données discordantes. Plutôt que d'intercaler les méthodes, les scientifiques choisissent d'utiliser les discordances entre les mesures comme ressource pour réviser les connaissances scientifiques d'arrière-plan.⁵ La diminution des écarts devient une preuve de la fiabilité de la théorie. Cependant, utiliser une méthode pour étalonner une autre signifie que ces méthodes ne sont plus indépendantes; par conséquent, la consilience ne fournit plus le même poids probant pour l'exactitude.

L'étalonnage au sens de Bokulich consiste à modifier la façon dont nous estimons une certaine quantité. Cela peut impliquer des changements dans les outils inférentiels utilisés dans le processus de mesure. Ce qui rend l'étalonnage réussi, c'est si les modifications apportées au modèle statistique améliorent la représentation des probabilités. Un bon modèle statistique est celui qui représente avec précision la relation entre les données et la quantité cible.

L'approche de Deborah Mayo ([Mayo 2005](#)) cadre bien avec la littérature récente sur l'évaluation des modèles. Mayo soutient que l'on a des preuves d'une hypothèse dans la mesure où l'hypothèse a passé un test sévère. L'étalonnage consisterait alors à construire un modèle plus précis du système cible. L'instrument dont il est question est un modèle statistique.

⁵ Ce point renforce les idées plus larges de Nora Boyd, Boyd, N. M. (2021). Epistemology of Experimental Physics. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press. sur l'importance des preuves enrichies.

Les prétentions à la détection de phénomènes non observables et théoriquement prédits, consistent à affirmer que la procédure de détection est fiable et que les résultats de la procédure correspondent aux prédictions théoriques pertinentes. La simulation peut soutenir ces deux affirmations([Tal 2011](#)). Les simulations servent à former des inférences qui descendent clairement d'un modèle théorique des phénomènes à des modèles possibles de données, dans la direction opposée aux inférences décrites par Bogen et Woodward([Bogen 1988](#)).

Une analyse épistémologique globale des simulations informatiques devrait préciser les conditions dans lesquelles les simulations peuvent compléter ou remplacer les méthodes empiriques traditionnelles telles que l'étalonnage.

4.3-Le privilège épistémique de la mesure

Finalement, on peut se demander si l'approche des modèles nous permet de prendre les résultats de mesure comme des indications fiables de l'état du monde.

D'un point de vue purement conceptuel, nous pouvons distinguer trois composantes distinctes d'une procédure de mesure: les instruments physiques qui fournissent les données, la compréhension théorique de la cible qui rend les données significatives et le modèle statistique qui relie les deux.

Hasok Chang n'est pas en accord avec Tal sur sa conclusion qu'une prédiction basée sur un modèle est une mesure. Un certain nombre de philosophes des sciences ont fait valoir qu'il existe des différences importantes entre la robustesse dans la modélisation et dans les contextes expérimentaux, et beaucoup d'entre eux ont affirmé que la première n'est pas confirmatrice.

Nancy Cartwright([Peschard 2018](#)) soutient que la propriété de robustesse exige que l'accord sur une hypothèse soit évalué de manières différentes dans des contextes expérimentaux et de modélisation. Un grand nombre de philosophes ont soutenu que l'analyse de la robustesse, en tant que stratégie de test d'hypothèses impliquant la construction de modèles, au mieux ne confirme que les affirmations concernant les modèles. Ils ont fait valoir que la robustesse entre les modèles ne parvient pas à confirmer car elle ne fournit pas de preuves empiriques, mais clarifie simplement la nature des modèles. La robustesse à travers différentes configurations expérimentales, en revanche, est censée fournir des preuves empiriques et donc une confirmation. Les modèles sont des constructions théoriques, pas des informations empiriques, et seules ces dernières confirment.

Corey Dethier ne reconnaît pas de différence entre la modélisation et les contextes expérimentaux. Appuyé par le travail de Wayne Myrvold, il soutient que si nous maintenons fixes les probabilités pertinentes, il n’y a aucun effet discordant à modifier si les termes du formalisme représentent des lectures instrumentales ou des rapports modèles([Dethier 2022](#)).

Les modèles jouent souvent un rôle crucial dans les travaux récents sur la mesure, tels que Margaret Morrison et Eran Tal. Si les rapports de modèles ne servent pas de preuve, bon nombre de ces utilisations de modèles échouent. Tout le monde n’est pas d’accord pour dire que les simulations doivent être considérées comme des expériences.

Une façon de repousser l’idée que les modèles fournissent une confirmation est de considérer qu’ils encodent les connaissances et l’idéalisations préalables plutôt que de servir comme des expériences. Le plus ancien argument remonte à Nancy Cartwright, qui insistait sur le fait que, contrairement à ce qui est le cas lorsque les expériences ou les mesures concordent, différents modèles ne constituent pas des instruments indépendants faisant des choses différentes. Il y a un certain sens dans lequel au plus un modèle dans un ensemble de modèles du même phénomène peut être correct. La variation entre les modèles doit recevoir une analyse très différente de la variation entre les instruments, où l’inexactitude d’une lecture instrumentale n’empêche pas l’exactitude d’un autre.

La robustesse entre les expériences apporte toujours de nouvelles preuves empiriques, la robustesse entre les rapports de modèles ne le fait que parfois, et les deux ne doivent donc pas être analysés dans le même cadre. Plusieurs expériences fournissent plus de données, contrairement à plusieurs modèles. Les groupes de modèles partageront toujours un ensemble d’idéalisations, ce qui signifie que la robustesse entre les modèles n’a de valeur de confirmation que lorsque nous pouvons supprimer toutes les idéalisations. Nous n’avons aucune autre information sur les modèles, comme des informations indiquant que les modèles, bien qu’idéalisés, sont très fiables.

Tant la définition d’un mesurande que la caractérisation d’un processus de mesure dépendent de modèles construits sur la base de théories pertinentes. La question de la dépendance théorique se pose et de comment la vérité dans la mesure doit être imaginée. L’étalonnage de tels processus suppose généralement qu’un modèle appuyé par une théorie est disponible. Les activités de modélisation sont étroitement liées à la construction d’instruments de mesure. Un nouvel antiréalisme est apparu, soulignant que ce qui est mesuré et quels processus comptent comme des mesures, dépendent de manière hasardeuse des hypothèses théoriques([Ohnesorge 2023](#)).

Suivant Bas Van Fraassen([Peschard 2018](#)), Alessandro Giordani et Luca Mari([Giordani 2021](#)) définissent l'instrument comme étant modélisé pour pouvoir interagir avec les objets et les connaissances obtenues basées sur un modèle comme étant dépendantes de la théorie.

Puisque les modèles sont exploités pour comprendre le comportement des systèmes empiriques, la mesure est le processus clé pour permettre la comparaison entre ce qui est prédit par la théorie et les données sur le comportement des systèmes([Giere 2004](#)).

Giordani et Mari différencient les quantités générales et les quantités individuelles. L'instrument est modélisé comme capable d'interagir avec des objets ayant des quantités individuelles qui sont des instances d'une quantité générale. Selon eux, les arguments antiréalistes échouent à maintenir la distinction entre le sens et le référent d'un terme.

Le référent d'un terme est l'entité à laquelle le terme se réfère, tandis que son sens est le mode de présentation du référent (Gottlob Frege 1848-1925). Ils ne parviennent pas à différencier une grandeur effective, et le sens modélisé, qui présente une grandeur modélisée dans une théorie. Les grandeurs modélisées sont idéales et dépendantes quant à leur identité, de la façon dont elles sont conceptualisées dans une théorie. La différence de dépendance théorique entre grandeurs modélisées et grandeurs effectives est essentielle([Teller 2017](#)). Les résultats de mesure peuvent être interprétés différemment à la lumière de différentes théories et peuvent donc être attribués à des instances de différentes grandeurs modélisées.

Le fait qu'un modèle ne puisse être construit qu'en utilisant des concepts caractérisés par des lois dans une théorie n'implique pas que l'entité qui est modélisée ne puisse exister que relativement à cette théorie. Même si nous concevons des instruments et comprenons leur fonctionnement en les modélisant à la lumière de nos théories, ils fonctionnent indépendamment de l'existence de telles théories. Même si aucun modèle n'existait, l'instrument continuerait à fonctionner. La grandeur véritable convienne à une des instanciations possibles de la grandeur modélisée. Suivant Giordani et Mari, la quantité individuelle modélisée existe et est identifiée de manière unique comme étant identique à la quantité individuelle effective. Dès lors que le mesurande est défini comme la grandeur avec laquelle l'instrument de mesure interagit à un instant donné, il n'y a pas de problème de référence. L'inconvénient est que l'information acquise sur le mesurande est entièrement contextuelle, et donc non transférable hors du contexte dans lequel a lieu la mesure.

Une deuxième option adoptée dans les contextes scientifiques consiste à définir la grandeur individuelle modélisée suivant la référence au modèle de l'objet mesuré, la rendant ainsi différente de la grandeur effective. Giordani et Mari affirment que la complexité du monde est apprivoisée précisément lorsque nous utilisons un cadre conceptuel. Il est impossible de répertorier toutes les grandeurs d'influence affectant le comportement d'un instrument de mesure.

Pourtant, ils prétendent que ces impossibilités ne sont pas suffisantes pour empêcher de réussir à se référer aux vraies grandeurs caractérisant un objet selon un modèle du mesurande et un modèle du processus de mesure.

Philosophes et métrologues ont réfuté l'idée que le privilège épistémique de la mesure dans la pratique scientifique s'explique par sa neutralité théorique. Au contraire, ils font maintenant explicitement appel au rôle que jouent les théories dans la mesure. Miguel Ohnesorge ([Ohnesorge 2023](#)) soutient que le privilège épistémique de la mesure précède la théorie d'arrière-plan et s'explique mieux par sa fonction préthéorique. La cible de Miguel Ohnesorge est le récit de Alessandro Giordani et Luca Mari, son argument s'applique également aux propositions similaires avancées par Eran Tal et Bas van Fraassen.

L'intérêt théorique pour la mesure a longtemps été motivé par l'idée que les opérations de mesure fournissent des notions détachées avec une signification et des preuves théoriquement neutres. Le rôle de la théorie dans la mesure a été l'un, sinon le thème dominant des travaux métrologiques et philosophiques récents. Ce travail s'inspire presque exclusivement d'exemples de métrologie contemporaine ([Tal 2017](#)) largement basés sur des études de mesures établies de longue date dans des cadres théoriques solidement établis. L'identification des inférences qualifiées de mesures dépendrait de la théorie ([Van Fraassen 2012](#)); ([Giordani 2021](#)).

Luca Mari, Alessandro Giordani, ont élaboré une épistémologie de la mesure chargée de théorie. La mesure se voit attribuer un statut épistémique particulier dans la pratique scientifique, un privilège traditionnellement lié à sa neutralité théorique. Les procédures de mesure sophistiquées reposent sur des caractérisations théoriques du lien entre les indicateurs de mesure et un résultat de mesure quantitative ([Tal 2019](#)). Celles-ci attribuent une grande fiabilité aux résultats de mesure si plusieurs théories mutuellement cohérentes sont impliquées dans le processus de mesure ([Courtenay 2021](#)). De telles observations minent la neutralité théorique.

Ces interprétations expliquent le privilège épistémique de la mesure en vertu de la structure sophistiquée de son processus inférentiel. Malgré tout, l'abstraction du modèle permet aux scientifiques de définir une unité qui dépasse le contexte local. Les modèles de processus de mesure spécifiques, facilitent la sensibilité d'une mesure à l'instanciation particulière de la quantité en question. Eran Tal soutient que l'objectivité de la mesure qui s'ensuit est le résultat de sa robustesse.

La robustesse est assurée par les métrologues en reliant un modèle théorique abstrait d'une grandeur à des hypothèses de modélisation locales de processus de mesure spécifiques. Bas van Fraassen, a soutenu que les mesures assument leur fonction privilégiée en fondant empiriquement une quantité abstraite en vertu des hypothèses théoriques générales.

Un aspect crucial de l'argumentation des métrologues et des philosophes n'est pas réalisé, à savoir un cadre théorique général partagé pour caractériser une grandeur cible. Pour Miguel Ohnesorge, la recherche est possible en l'absence d'un accord théorique. Dans les premières étapes d'une enquête, le choix de poursuivre un problème de mesure spécifique peut ne pas être étayé par un modèle théorique. Il peut se justifier en vertu de l'établissement d'une coordination épistémique.

Les points de vue épistémologiques des métrologues supposent que l'intégration des mesures dans des cadres théoriques généraux explique sa fonction épistémique privilégiée dans la science. L'analyse historique suggère que l'inverse est vrai. Organiser une enquête autour d'un problème de mesure, souscrit implicitement au privilège épistémique de la mesure. Plutôt que d'inscrire les mesures dans un cadre théorique partagé, on contraint la théorisation à la capacité d'expliquer les écarts de mesure. En l'absence d'une théorie d'arrière-plan partagée, la capacité de préciser les écarts empiriques comme des erreurs de mesure répond à des engagements implicites autonomes. Cette révision itérative des mesures peut conduire au développement ultérieur des connaissances théoriques générales([Chang 2004](#)).

Pour Kenneth F. Schaffner([Schaffner 1969](#)), la version syntaxique des théories scientifiques doit relier les termes théoriques de la théorie à ceux d'une théorie antérieurement significative. Dans la version sémantique l'interprétation est donnée à travers l'analogie d'un modèle de la théorie. Schaffner reconnaît de règles de correspondance qui ont pour fonction de relier des concepts nouveaux à des concepts théoriques déjà bien définis, assimilables aux axiomes de connexion de Reichenbach. Schaffner ajoute des règles qui selon lui doivent relier des concepts nouveaux, ou des concepts employés dans des contextes nouveaux, avec une signification théorique antécédente.

Les entités théoriques doivent avoir une signification théorique antécédente. C'est ce qui permet d'utiliser des théories empruntées pour inférer des conséquences observationnelles. Mais prétendre qu'il s'agit d'un modèle qui permet cela plutôt que d'attribuer cette tâche à la signification théorique antécédente conduit à un borbier d'analogies contradictoires, souligne Gabriel Giovannetti ([Giovannetti 2018](#)).

À la recherche de solutions

La structure mathématique qui persiste malgré le changement de théorie est plus susceptible d'être objective et de se référer à la réalité ([Patton 2023](#)). La vision du « réseau de croyances » de Quine ne rend pas les affirmations mathématiques ou logiques plus épistémiquement certaines ou plus susceptibles d'être vraies que les affirmations basées sur l'observation. Les éclaircissements philosophiques du rôle des équations aux dérivées partielles non linéaires dans l'explication scientifique peut impliquer un recours important à des informations sur des contextes expérimentaux. Les équations non linéaires peuvent difficilement correspondre à la réalité.

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires décrivant le comportement d'un fluide. Elles ne sont pas directement résolubles dans la plupart des contextes physiques d'intérêt. La théorie Navier-Stokes bénéficie d'un soutien expérimental considérable et est capable de générer des explications et des prédictions efficaces dans le régime cible. Les équations seules ne sont ni réussies ni complètes.

Une explication philosophique de la façon dont les théories atteignent les objets met l'accent sur le rôle de connexion des modèles entre les théories et les phénomènes. Ce récit accepte tacitement une distinction entre théorie et observation. Pour que les modèles fonctionnent comme médiateurs, il n'est pas nécessaire qu'ils soient considérés comme des représentations vraies ou objectives.

Alisa Bokulich ([Bokulich 2017](#)) a proposé qu'un modèle idéalisé ou même contrefactuel puisse servir de médiateur entre la théorie et le système cible, tant que l'isomorphisme requis entre le modèle et le système cible est atteint. Les modèles ne seraient donc ni le phénomène cible ni une partie de la théorie.

Cependant, si les explications mathématiques peuvent être des modèles, alors les modèles font partie d'une théorie d'arrière-plan. De nombreuses explications mathématiques sont basées sur des équations qui sont considérées comme faisant partie d'une théorie. À ce compte les équations pourraient elles-mêmes être considérées comme des modèles. Les modèles considérés comme des médiateurs impliquent un engagement à une séparation entre les théories idéalisées et les choses matérielles. Si une explication n'est pas en termes de modèle distinct de la théorie, elle ne répond pas aux critères de Bokulich pour une explication par modèle.

Une structure mathématique elle-même peut être montrée comme étant isomorphe aux relations d'intérêt dans le système cible. Il peut être démontré qu'elle est valide lorsqu'elle est appliquée à ce système dans le domaine d'application du modèle, satisfaisant ainsi les critères d'explication de Bokulich. Mais les termes non linéaires compliquent la résolution des équations différentielles : trouver l'existence et l'unicité des solutions dans un domaine. De nombreux chercheurs utilisent des formes linéarisées des équations pour trouver des solutions dans un domaine restreint.

Lydia Patton démontre que les solutions simulées de Bazant et Moffatt([Bazant M 2005](#)) aux équations de Navier-Stokes répondent aux exigences de Bokulich en matière d'explications. Elles permettent l'articulation des systèmes fluides en tant que structures dont on peut montrer qu'elles sont isomorphes aux systèmes cibles physiques, et on peut démontrer qu'elles s'appliquent valablement à de tels systèmes. La génération de solutions exactes aux équations différentielles non linéaires dans des situations simulées peut accomplir l'un des critères de Bokulich.

La dynamique des fluides est une théorie réussie. Son extension à la modélisation a été fournie par la formulation d'équations aux dérivées partielles. La théorie de la dynamique des fluides de Navier et Stokes ne prend pas en charge directement la dérivation de prédictions dans des domaines pertinents à partir des équations de la théorie. Les solutions aux équations reposent sur la compréhension de situations empiriques et simulées. Cette agencement guide la recherche d'explications scientifiques et l'évaluation de l'accord des phénomènes avec une théorie dans de nouveaux contextes expérimentaux. Les solutions ne sont réalisables que dans des situations simulées et elles sont basées sur une compréhension empirique des situations physiques.

La plupart des travaux en dynamique des fluides sur la base des équations de Navier-Stokes ne consistent pas à donner des solutions exactes aux équations. Ce procédé utilise la simulation des phénomènes pertinents en utilisant ou non des modèles comme médiateurs([Morrison 1999](#)), mais indépendamment des équations elles-mêmes.

Les équations peuvent dans certains cas fournir directement des explications dans des domaines physiques d'intérêt, sans aucune médiation nécessaire. Autrement, des modèles indépendants sont nécessaires pour assurer la médiation entre les théories abstraites et les phénomènes physiques observables. Les solutions aux équations impliquent une compréhension significative de la situation empirique, expérimentale et mathématique dans laquelle les équations ont été formulées.

Le problème est de savoir comment caractériser les transitions entre des mesures imprécises et déterminées de manière finie, et la formulation mathématiquement rigoureuse d'un système d'équations aux dérivées partielles. Une valeur heuristique clé des solutions simulées est d'établir des normes pour les solutions physiques réelles. Le compte rendu heuristique de l'explication structurelle fournit une explication de la façon dont les théories scientifiques peuvent réussir, et pourtant les équations de ces théories ne peuvent pas être résolues dans les domaines cibles de la théorie.

5.1-Mettre une théorie à l'épreuve

Il est tout aussi important de trouver des moyens de mettre une théorie à l'épreuve que de confirmer cette théorie. Trouver un moyen de contrôler les tests de la théorie nécessite de montrer lesquelles de ses propositions sont indépendantes les unes des autres. La confirmation est distincte du test, et la révision de la base formelle d'une théorie peut la rendre plus largement testable empiriquement([Patton 2020](#)).

L'astronomie multimessagers est un catalyseur pour un raisonnement approfondi sur les limites et le potentiel du cadre théorique de la relativité générale. Nicolas Yunes et Frans Pretorius([Yunes Nicolas 2009](#)) ont cherché à savoir si les recherches basées sur des modèles de l'interféromètre géant LIGO encodent des hypothèses fondamentales, en particulier l'hypothèse selon laquelle la théorie d'arrière-plan de la relativité générale est une description définitive des phénomènes détectés dans la recherche. Leurs méthodes sont similaires aux études sur la confirmation et les tests qu'on retrouve dans Carnap et Hempel([Patton 2020](#)).

Tirer des conclusions des résultats de LIGO soulève le problème bien connu de la dépendance à la théorie dans la modélisation. Si un modèle dynamique utilisant des équations différentielles suppose que le phénomène sous-jacent a une certaine structure, il peut ou non être possible de détecter des écarts par rapport à cette hypothèse lors des tests. Une tradition carnapienne fournit un compte rendu flexible des tests et de la confirmation de la théorie, qui permet d'élargir le cadre empirique d'une théorie.

La réduction des phrases théoriques aux phrases d'observation dans Carnap, nécessite de préciser les relations entre les vocabulaires théorique et observationnel. Il n'y a pas de manière générale de relier les équations de la relativité générale au vocabulaire observationnel de l'interférométrie.

Suivant Carnap, les termes théoriques sont sémantiquement non interprétés et ne sont définis qu'implicitement par les axiomes et les postulats de la théorie pertinente. Les termes théoriques et les phrases reçoivent une interprétation partielle en fonction des liens qu'ils établissent avec les observables en présence de règles de correspondance appropriées. Carnap a adopté la position selon laquelle les théories sont des cadres qui peuvent recevoir de multiples interprétations.

Contre ce point de vue, Hempel a fait valoir qu'il ne peut y avoir de formulation des affirmations théoriques de sorte que les variables théoriques sont entièrement non interprétées. Les termes encodent non seulement des symboles et des relations logiques et mathématiques, mais aussi des connaissances empiriques accumulées. Pour Hempel, le scénario dans lequel les termes et concepts théoriques sont intégrés, est peuplé de termes qui sont interprétés à l'aide des connaissances scientifiques et du savoir-faire accumulés avant la conception d'une nouvelle théorie. Hempel a introduit un ensemble de trois vocabulaires: théorique, observationnel et préthéoriques.

Lorsque nous considérons le test d'une théorie plutôt que sa confirmation, nous sommes poussés à définir des termes théoriques de manière de plus en plus formelle afin de spécifier les relations abstraites qui existent entre les termes, même si les valeurs de ces termes doivent être contraintes par preuves obtenues à partir d'observations empiriques. Les preuves empiriques peuvent limiter la plage de valeurs d'une variable, et cette variable peut encore ne pas être interprétée.

Le philosophe Howard Stein a fait valoir que le problème fondamental est qu'il n'y a pas de relation directe entre deux vocabulaires, observationnel et théorique, qui permette la réduction de l'un à l'autre (Patton 2020). Il n'y a pas de partie de la physique fondamentale dans laquelle il soit possible de déduire des faits observables à partir de la théorie. Nous ne pouvons pas construire un langage dans lequel un vocabulaire observationnel plus restreint est contenu dans un vocabulaire théorique universel, qui saisira toutes les relations inférentielles nécessaires à la confirmation et au test de la théorie. La principale difficulté n'est pas celle de savoir comment laisser la théorie à l'extérieur de la porte du laboratoire, mais celle de savoir comment faire entrer le laboratoire dans la théorie.

La détection des ondes gravitationnelles par le LIGO est citée comme une évidence en faveur de la relativité générale. Analyser si le cadre proposé pour l'analyse de la théorie montre que la théorie de la relativité générale a été testée par les données et les inférences qui en découlent est distinct de l'affirmation selon laquelle les observations peuvent être utilisées pour confirmer la théorie.

Les résultats de LIGO permettent des tests qui sondent le régime où le champ gravitationnel est fort, la courbure de l'espace-temps est grande et les vitesses sont comparables à la vitesse de la lumière. Un cadre d'hypothèses est encodé dans les méthodes actuelles d'astronomie des ondes gravitationnelles. Yunes et Pretorius([Yunes Nicolas 2009](#)) construisent un ensemble paramétré de modèles qui permettent de tester plus rigoureusement les hypothèses sur les écarts par rapport aux prédictions et à la structure de la théorie. La suppression des obstacles à des tests empiriques plus larges, qui ont été encodés dans la structure formelle d'une théorie, peut élargir la portée empirique d'une théorie.

L'astronomie multimessagers est la recherche de signaux provenant d'événements astronomiques en utilisant plusieurs sites de détection, en recherchant des signaux provenant d'un système cible. Russell Hulse et Joseph Taylor Jr. ont découvert en 1974 le pulsar binaire dont l'orbite a révélé de diminuer en accord remarquable avec l'émission de rayonnement gravitationnel, comme l'avait prédit Einstein. Les données issues des techniques LIGO se matérialisent par des changements dans les longueurs des bras de l'interféromètre. Sur la base d'hypothèses sur les ondes gravitationnelles frappant l'interféromètre, les physiciens déduisent la forme de ces changements.

Des banques de modèles sont générées à l'aide d'estimations des paramètres physiques des trous noirs. Il y a trois étapes dans une fusion de trous noirs : la spirale, dans laquelle les trous noirs entrent dans les champs gravitationnels les uns des autres et commencent à tourner les uns autour des autres de plus en plus rapidement; la fusion, dans laquelle les trous noirs fusionnent; et le *ring down*, dans lequel les trous noirs ont fusionné et la dynamique est maintenant celle d'un seul corps.

Les équations de champ d'Einstein pour la relativité générale ne peuvent pas être résolues dans la région de champ fort de la gravitation. La solution complète des équations d'Einstein est nécessaire pour décrire avec précision l'évolution. Ceci est accompli en utilisant la relativité numérique. La relativité numérique est une technique qui permet de simuler la forme d'onde qui émanerait d'une coalescence de trou noir avec des paramètres système spécifiques.

La période orbitale d'un système de trous noirs binaires est le temps qu'il faut à un trou noir pour effectuer une orbite autour de l'autre. Si la théorie de Newton était correcte, la période orbitale serait constante. Une forme d'onde à partir de laquelle on peut confirmer une période orbitale non constante exclut la gravitation newtonienne et est cohérente avec la relativité générale.

Des formes d'onde simulées utilisant des estimations des paramètres du système sont utilisées pour construire un ensemble de formes d'onde candidate qui sont soumises à un filtrage. Les paramètres physiques sont déduits de la forme d'onde qui est sélectionnée comme la meilleure confirmée à partir d'une banque de modèles. Les paramètres physiques estimés sont bornés par un ensemble de contraintes déterminées par l'évaluation bayésienne de l'intervalle de confiance dans lequel la détection peut être confirmée.

Le processus de recherche de formes d'onde candidate à confirmer est chargé d'hypothèses théoriques. Des paramètres physiques hypothétiques sur la relativité générale elle-même, sont intégrés dans les méthodes de modélisation et de simulation de LIGO. Yunes et Pretorius distinguent un biais théorique fondamental du biais de modélisation. Le biais fondamental est l'hypothèse que les équations de champ d'Einstein sont valides dans le régime de champ fort. Les formes d'onde pourraient s'écarter considérablement des prédictions de la relativité générale dans le champ fort si la relativité générale ne décrit pas adéquatement le système dans cette région. Toute information inattendue que les signaux peuvent contenir sera filtrée, les écarts seront masqués par les modèles eux-mêmes.

Si l'ensemble du cadre de modélisation construit n'est pas adapté pour tester une théorie, mais seulement pour la confirmer, alors on ne met pas en péril les affirmations de la théorie d'arrière-plan. Tester nécessite de construire un cadre dans lequel on peut montrer si les hypothèses d'un modèle sont indépendantes ou dépendantes de la théorie testée. L'argument de Yunes et Pretorius est que ce processus de recherche modélisée contient des caractéristiques qui appuient l'hypothèse que la relativité générale est correcte. Un résultat de cinq sigmas peut masquer des informations sur les ondes gravitationnelles qui sont incompatibles avec la théorie de la relativité générale.

Yunes et Pretorius proposent comme alternative un cadre post-einsteinien de définition des paramètres conçu pour mesurer les écarts génériques par rapport aux prédictions de la relativité générale. Le but de la définition des paramètres est de générer des prédictions d'onde hypothétiques. Ces formes d'onde hypothétiques peuvent ensuite être utilisées pour détecter les écarts par rapport aux hypothèses et prévisions théoriques.

Suivant Carnap, les termes qui jouent un rôle spécifique dans une structure peuvent être rendus abstraits, ce qui transforme la théorie elle-même en une structure générique avec de multiples manifestations possibles et rend la théorie plus largement testable empiriquement.

On peut en conséquence construire un instrument plus sensible pour tester la théorie à partir de la théorie elle-même.

5.2-La cinématique d'une théorie fonde la modélisation des mesures

On ne peut pas comprendre la structure et la nature de nos connaissances en physique sans une analyse de la façon dont les instruments de mesure et les dispositifs expérimentaux sont modélisés. La vision sémantique traite les modèles comme ayant un contenu empirique tout en niant que ces modèles doivent représenter des expériences réelles pour avoir un tel contenu. La vue syntaxique introduit des principes de coordination ou des règles de correspondance pour relier les deux langages séparés de la théorie et de l'observation.

Une relation sémantique qui ne peut être connue dans notre situation épistémique réelle n'a aucune utilité dans la science. Selon Erik Curiel, nous avons besoin d'un outil pour mettre une situation précisément caractérisable dans le monde de l'expérience en contact substantiel et physiquement significatif avec les structures mathématiques de nos théories([Curiel 2020](#)). Nous n'avons qu'une faible compréhension mathématique des solutions des équations de Navier-Stokes, et de nombreux phénomènes caractéristiques de la dynamique des fluides, comme la turbulence([Patton 2023](#)).

Une composante cruciale de ce contenu épistémique consiste à modéliser une expérience, à fournir une représentation de quelque chose comme un appareil de mesure. Elle permet d'interpréter le modèle comme un modèle d'expérience ou d'observation. Le contenu épistémique d'une théorie scientifique repose en grande partie sur les significations exprimées dans l'articulation solide des connaissances expérimentales.

Cela exige que nous soyons capables de construire des représentations adéquates d'expériences réelles dans le cadre de nos théories scientifiques, c'est-à-dire des représentations de systèmes physiques et d'appareils expérimentaux les uns par rapport aux autres, et pas seulement des représentations de systèmes physiques en abstraction de la pratique expérimentale. La façon dont ces modèles sont construits et appliqués va bien au-delà de ce que l'on peut prétendre saisir par le seul formalisme théorique d'une théorie. La théorie doit être capable de représenter les fins détails de l'appareil tel qu'il doit être utilisé dans l'expérience. Ce n'est qu'à partir des aspects pratiques de la connaissance scientifique que l'on peut déterminer le régime d'applicabilité d'une théorie.

La pertinence et l'adéquation du modèle à de nombreux objectifs donnés sont déterminées en grande partie par le type de connaissances jamais articulable strictement dans le formalisme théorique, qui ne peuvent être obtenues que par la compréhension de la partie pratique de la théorie. Des connaissances qui atteignent les instruments appropriés et adéquats pour sonder différents caractéristiques et composants du système.

Les grandeurs physiques modélisées par les équations d'une théorie ont un régime dans lequel elles sont à la fois bien définies et ont des valeurs stables par rapport aux fluctuations. Ce régime lui-même fait partie du noyau de la théorie. Il détermine ce que peuvent être la portée du contenu empirique de la théorie. Spécifier un régime d'applicabilité pour une théorie requiert nécessairement des connaissances qui ne peuvent être acquises en partie que par la construction de modèles d'expériences. On ne peut pas déterminer le régime d'applicabilité par l'examen des structures formelles.

Une théorie doit inclure toutes les pratiques et tous les principes qui permettent de mettre en contact de manière significative la structure théorique formelle et l'expérience pratique afin que la première puisse être utilisée pour interpréter la seconde, et la seconde pour contraindre la première. Cela comprendra des règles pour relier les résultats expérimentaux aux propositions formelles. La mesure est toujours au moins en partie médiatisée par une théorie. Seules les connaissances acquises à l'aide d'instruments bien compris peuvent contribuer de la manière la plus forte au contenu épistémique d'une théorie.

Qu'un modèle d'expérience fournisse une représentation d'un appareil de mesure, même dans la forme la plus simple et la plus abstraite, permet d'interpréter le modèle comme un modèle d'expérience ou d'observation. Une sémantique qui ne capture que des connaissances potentielles et impossibles à connaître pour les humains est inutile en tant que sémantique.

Un postulat d'interprétation physique qui encoderait de telles connaissances devrait faire inévitablement référence à des faits qui ne sont connus que par l'expérimentation, et donc exiger la connaissance de la façon dont l'observateur et les appareils de mesure sont représentés dans la théorie. En principe, on devrait toujours pouvoir réaliser des expériences de nature différente, avec des instruments modélisés par des théories différentes, afin de déterminer si la théorie en question apporte ou non une contribution inéliminable au contenu épistémique de la connaissance, et ainsi tenter d'isoler cet apport.

Pour Erik Curiel, nous devons avoir la capacité de construire des modèles explicites de situations expérimentales complètes incluant les instruments et les méthodes de leur déploiement afin de représenter des observations réelles. Nous n'avons pas de compte rendu formel du contenu épistémique des théories de la physique minimalement adéquat pour rendre compte de leur application empirique réelle.

Curiel([Curiel 2020](#)) appelle génériques la structure et les entités au plus haut niveau d'une théorie. La structure générique n'a pas de valeurs définies pour les quantités qui apparaissent comme des constantes dans les équations de mouvement de la théorie. Les solutions aux équations génériques du mouvement sont des représentations formelles des évolutions dynamiquement possibles que de tels systèmes peuvent manifester.

On obtient une structure spécifique en fixant les valeurs de toutes les constantes dans une structure générique. Celle-ci définit une famille particulière d'évolutions dynamiquement possibles. Un parcours singulier dans cette famille est un modèle individuel. Curiel([Curiel 2020](#)) désigne un modèle concret comme une concentration de résultats recueillis expérimentalement de manière à permettre son identification avec un modèle individuel⁶.

La récente détection d'ondes gravitationnelles par LIGO montre clairement où la théorie entre dans la conception de l'expérience et la manipulation de données. Ce sont seulement les concepts préthéoriques de contrainte, de déformation, d'accélération relative, qui fondent la construction des instruments et la structuration et l'analyse des données utilisées pour tester les prédictions. L'équation de champ d'Einstein n'entre en jeu que pour produire les prédictions à comparer aux résultats observés. Le cadre conceptuel de la relativité générale intervient dans l'interprétation des résultats par l'identification d'un modèle de données structuré avec un modèle individuel.

Utiliser le formalisme ne donne aucune raison de croire en la capacité de représenter des systèmes dans le régime d'applicabilité de la théorie. La structure conceptuelle de la relativité générale, plus proprement sa cinématique, a réellement guidé la conception de l'instrument.

⁶ Cette idée porte une comparaison évidente avec la distinction entre données et phénomènes établie par Bogen et Woodward Bogen, J., and James Woodward (1988). "Saving the Phenomena." *The Philosophical Review* 97: 303–352.

L'expérience n'exclut pas la possibilité que d'autres théories que la relativité générale puissent également produire des prédictions correspondant aux données structurées.

Chaque théorie a un seul régime d'applicabilité délimité par des échelles caractérisées par des valeurs de différentes combinaisons de ses grandeurs physiques. L'un des marqueurs d'une théorie physique est l'existence d'un ensemble d'échelles caractéristiques pour ses grandeurs physiques, en dehors desquelles toutes les grandeurs physiques de la théorie perdent simultanément leur définition univoque. Toutes les structures cinématiquement et dynamiquement pertinentes de la théorie se décomposent au sens où la théorie devient inadéquate. Les échelles de décomposition ne peuvent jamais être déterminées par l'analyse du formalisme sans l'apport des connaissances acquises par la portée croissante de l'expérimentation. En dynamique des fluides de Navier-Stokes, lorsque le fluide s'approche de la turbulence, les valeurs de toutes ses quantités commencent à varier rapidement dans le temps et ne peuvent finalement plus être mesurées.

La distinction la plus fondamentale est entre les parties cinématiques et dynamiques d'une théorie. Les contraintes cinématiques sont toutes ces caractéristiques du traitement d'un système par une théorie qui restent les mêmes, quels que soient les types d'interaction qu'il a avec son environnement. En mécanique newtonienne, la vitesse est toujours la dérivée temporelle de la position. Dans la théorie de la relativité, cela inclut la vitesse de la lumière. Dans la théorie de Navier-Stokes, les viscosités de masse du fluide. Les grandeurs dynamiques sont celles qui sont autorisées à varier au fur et à mesure que le système évolue, telles que la position.

Toute théorie postule aussi des relations dynamiques entre ses grandeurs, les équations du mouvement ou équations de champ. Celles-ci ont la propriété caractéristique que fait dépendre leur forme spécifique des interactions que le système a avec son environnement.

Mettre la théorie et l'expérience en contact physiquement éclairant exige avoir la capacité d'identifier des modèles individuels et concrets([Curiel 2020](#)). La théorie est adéquate pour traiter un système donné si toutes les grandeurs que la théorie attribue à un système sont bien définies et satisfont conjointement toutes les contraintes cinématiques de la théorie. Si les contraintes cinématiques ne sont pas satisfaites, on n'a aucune raison du tout de penser que le système en question est un système que la théorie peut traiter. Le régime de pertinence d'une théorie est la famille des systèmes physiques dont les états, en conjonction avec leurs interactions avec leurs environnements, sont bornés par les échelles de décomposition de la théorie.

Le régime de pertinence d'une théorie est un sous-ensemble du régime d'applicabilité, dans lequel les équations dynamiques de la théorie sont précises de manière prédictive dans leur modélisation du comportement de la famille de systèmes en question.

Une théorie peut traiter de manière appropriée une famille de phénomènes même lorsque les équations du mouvement ne sont pas satisfaites. Si les contraintes cinématiques exigées par une théorie ne tiennent pas, le système est d'un type au-delà de la portée de la théorie. Si les équations du mouvement ne sont pas satisfaites, cela peut indiquer seulement que l'on n'a pas tenu compte de tous les couplages avec son environnement. La satisfaction des contraintes cinématiques est requise comme condition préalable à l'application appropriée d'une théorie dans la modélisation d'un type de système. On ne peut même pas formuler la deuxième loi de Newton si la vitesse n'est pas la première dérivée temporelle de la position.

Les contraintes cinématiques jouent un rôle analogue à celui proposé par Hans Reichenbach et Michael Friedman ([Friedman 1983](#), [Friedman 2001](#), [Cassirer 2000](#)) pour ce qu'ils appellent l'a priori relativisé d'une théorie. La satisfaction des contraintes cinématiques doit être vérifiée expérimentalement pour s'assurer que la théorie représente le système avec adéquation. Satisfaction de l'a priori relativisé, au sens néo-kantien, fonde la possibilité de l'investigation empirique dans un sens plus fort. Les contraintes cinématiques sont constitutives des systèmes dont traite la théorie, également d'une manière analogue à l'a priori relativisé des néo-kantiens.

Ce sont les contraintes cinématiques, et non les équations du mouvement, qui guident l'expérimentateur dans la conception d'instruments pour mesurer les quantités que la théorie attribue aux systèmes qu'elle traite ([Curiel 2017](#), [Curiel 2020](#)). De cette manière, les contraintes cinématiques fournissent le fondement de l'opérationnalisation du sens des termes théoriques.

Toutes les assertions d'une théorie traitant de la dynamique du système, communément appelées prédictions, peuvent être fausses. Les modèles de systèmes dans le régime de pertinence, mais pas dans le régime d'applicabilité peuvent ne pas être précis. Les équations de mouvement de la théorie cessent d'être précises bien avant qu'une quantité ne perde sa définition dans la théorie et bien avant que les contraintes cinématiques de la théorie cessent d'être satisfaites. On ne peut pas rechercher les conditions de vérité de certaines des phrases de la théorie tant qu'on n'en sait pas assez sur la signification de ses termes pour s'assurer de la vérité des contraintes cinématiques.

Toute sémantique de la structure des théories qui rejette les modèles dans lesquels le terme est encore bien défini ne pourra rendre compte de cette partie de la signification du terme.

Curiel s'oppose à une conception de la façon dont le formalisme peut être conçu, capturant la structure de la connaissance scientifique, comme séparable de toutes les préoccupations pratiques.⁷ Une telle sémantique ne peut pas tenir compte des phénomènes concernant les théories, car les modèles prédictifs imprécis ne peuvent pas être des mondes ou des objets possibles.

Pour savoir si un système tombe dans le régime d'applicabilité de la théorie, il faut d'abord être en mesure de vérifier si le système satisfait ou non les contraintes cinématiques de la théorie, avant de savoir si il tombe dans le régime de pertinence de la théorie. Le régime doit être inclus dans la sémantique de la théorie. Ce n'est que la cinématique d'une théorie, les parties qui ne sont pas responsables des prédictions, qui entrent dans la modélisation de la mesure.

5.3-Philosophie de la mesure et détections directes et dérivées

La distinction entre mesures directes et dérivées a une importance épistémique, car les choix sur la façon de modéliser les processus de mesure sont liés aux types d'interventions que l'on peut effectuer pour tester l'adéquation des modèles. Désigner LIGO une détection directe avait pour but de la distinguer de précédentes détections d'ondes gravitationnelles par Hulse, Taylor et Weisberg (1975, 1982)([Elder 2023](#)).

La décroissance de la période orbitale d'un pulsar binaire repérée par Hulse-Taylor a été déterminée à partir des changements dans les temps d'arrivée d'impulsions électromagnétiques, conformément à la décroissance prévue due au rayonnement gravitationnel. Les interféromètres LIGO et Virgo subissent également une interaction physique avec les ondes gravitationnelles. L'onde gravitationnelle modifie d'une très petite grandeur la longueur des deux bras perpendiculaires de 4 km de longueur de l'interféromètre. La déformation est mesurée en utilisant un photodétecteur pour enregistrer le changement relatif de phase de la lumière laser envoyée le long des deux bras.

⁷ Cette certitude de Curiel a beaucoup en commun avec celles de Patrick Suppes sur le rôle des modèles formels de type tarskien et la nécessité d'analyser la pragmatique des preuves expérimentales. Suppes est souvent caricaturé comme le formaliste par excellence. Selon une sémantique exigeant une précision prédictive, comme celle d'Alfred Tarski, l'idée de régime de pertinence n'a pas de sens.

Allan Franklin a effectué un examen détaillé des détections LIGO-Virgo et Hulse-Taylor-Weisberg d'ondes gravitationnelles et il ne parvient pas à différencier ce qui rend une observation directe ou indirecte en physique. Bas van Fraassen a soutenu que quelque chose n'est littéralement observé que si elle est perçue à travers les sens et sans aide ([Van Fraassen 2008](#)). Bogen et Woodward ([Bogen 1988](#)) considèrent que l'observation est liée à des processus qui peuvent être considérés comme des extensions de la perception. Bogen et Woodward ont ciblé les philosophes engagés dans des discussions sur la charge théorique de l'observation et ceux comme van Fraassen qui adoptent une vision stricte de l'observation. La théorie représentationnelle de la mesure se concentre sur la construction des rapports qui relient structures empiriques et numériques.

D'un point de vue permissif, les instruments sont considérés comme comparables à la perception ordinaire. La collaboration LIGO-Virgo n'a pas observé une fusion de trous noirs binaires au sens strict, mais elle l'a observée dans un sens permissif. En astrophysique, où la perception humaine ordinaire seule est d'une utilité très limitée, la plupart sinon toutes les détections et observations prennent la forme d'une sorte de mesure.

Une vision contemporaine de la mesure a émergé dans les travaux de Tal([Tal 2017](#)) et Parker([Parker 2017](#)). Ils mettent l'accent sur les aspects appliqués de la mesure comme l'étalonnage. Selon ce point de vue, la mesure est une procédure, en partie une interaction physique, en partie une inférence basée sur un modèle, à travers laquelle nous générons une représentation sélective de l'état d'un système physique.

Parker poursuit en classant les mesures selon les couches d'inférence impliquées pour passer de l'indication de l'instrument au résultat de la mesure. Elle décrit trois principaux types de mesure : directe, dérivés et complexes. La mesure directe est la valeur de la lecture brute de l'instrument. Une mesure dérivée est une mesure où il y a une couche supplémentaire d'inférence. Une mesure complexe est une mesure où plusieurs mesures directes ou dérivées sont utilisées ensemble.

L'interféromètre produit des données de déformation des ondes gravitationnelles, sous forme de séries temporelles, considérées comme la lecture brute de l'instrument. La conversion de la lumière détectée au niveau du photodétecteur en données de déformation, dépend de l'étalonnage. L'étalonnage ne peut pas être effectué à l'aide d'ondes gravitationnelles réelles. Le processus d'étalonnage consiste à modéliser la réponse de l'interféromètre aux ondes gravitationnelles à l'aide de lasers qui déplacent les miroirs dans chaque bras.

Le filtrage adapté est une technique de traitement dans laquelle les corrélations entre les données reliées aux interférences et aux formes d'onde sont recherchées. La comparaison des données conduit à des formes d'onde reconstruites. Une détection confirmée nécessite la coïncidence de signaux correspondants sur au moins deux détecteurs, une estimation bayésienne et des simulations de relativité numérique.

Si nous considérons que le paramètre d'intérêt est la déformation, alors il semble que nous ayons besoin de plus d'une mesure du paramètre d'intérêt, soit une série de mesures sur la durée de passage des ondes gravitationnelles. Chaque détecteur produit ses propres données de déformation. La détection par LIGO-Virgo doit alors être classée comme une mesure complexe dans le schéma de Parker. La détection de pulsars binaires par Hulse-Taylor-Weisberg est classée de la même manière dans le schéma de Parker. Dans le cas LIGO-Virgo, nous détectons les ondes gravitationnelles elles-mêmes, tandis que dans le cas Hulse-Taylor-Weisberg nous détectons un effet aval, soit des ondes électromagnétiques à partir desquelles l'existence d'ondes gravitationnelles est déduite.

Les ondes gravitationnelles, comme les ondes électromagnétiques, se déplacent à la vitesse de la lumière. Cela signifie que les ondes gravitationnelles émises par les binaires Hulse-Taylor interagissent avec les radiotélescopes essentiellement de la même manière qu'elles interagissent avec les interféromètres LIGO. Il semble probable que les couches d'inférence nécessaires pour prétendre à une détection d'ondes gravitationnelles soient au moins aussi nombreuses que dans le cas Hulse-Taylor-Weisberg. Selon Franklin, une observation ne peut être directe si elle s'appuie trop sur d'arguments statistiques. Il existe de forts parallèles entre les arguments statistiques avancés pour la détection du boson de Higgs et les arguments en faveur de la signification statistique du signal d'onde gravitationnelle.

Pour reconnaître comment nous en venons à considérer un instrument comme un appareil de mesure approprié d'un type particulier, nous le faisons généralement sur la base des tests de cohérence([Bokulich 2020](#)) pour nous assurer que nous comprenons le comportement de l'instrument sous une gamme de conditions. Dans le cas de LIGO-Virgo, l'introduction d'un faux signal à l'aide de lasers a permis de penser que les procédures de détection fonctionnaient. Des tests de cohérence et des interventions d'étalonnage nous permettent de justifier notre confiance dans son issue comme étant représentative d'un paramètre d'intérêt dans le système cible.

C'est précisément parce que nous construisons et manipulons nos appareils de mesure, que nous sommes essentiellement capables de les traiter simplement comme détecteurs d'un certain type.

5.4-Un problème de circularité épistémique

Les ondes gravitationnelles sont des phénomènes prédits par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Nous manquons de solutions analytiques aux équations de champ, différentielles partielles non linéaires, d'Einstein. Des approches de modélisation sont utilisées pour assurer la médiation entre les équations dynamiques et les données expérimentales, et rendre probatoires les expériences des interféromètres LIGO-Virgo. Les descriptions des fusions de trous noirs binaires sont confrontées à un problème de circularité épistémique([Elder 2023](#)).

Les binaires compacts sont bien modélisés par approximation post-newtonienne pour la spirale initiale, où les vitesses caractéristiques et l'intensité du champ gravitationnel restent faibles en termes relativistes. Au-delà de la spirale initiale, la fusion binaire compacte doit être décrite dans le régime dynamique du champ fort, où les vitesses sont élevées et le champ gravitationnel est fort. Ici, le manque de solutions analytiques complètes devient problématique.

Les progrès de la relativité numérique ont été cruciaux pour les expériences LIGO-Virgo. Ces simulations résolvent les équations d'Einstein. La relativité numérique conçoit des modèles produits par des simulations coûteuses en calcul et limitées par les ressources. Les succès originels ont été rapportés par Frans Pretorius.

La charge théorique des modèles des observations LIGO-Virgo crée une circularité justificative. La précision des modèles doit être établie à l'aide des observations de LIGO-Virgo, mais ces observations supposent la précision des modèles.

Les méthodes de recherche les plus efficaces pour trouver des ondes gravitationnelles reposent sur des hypothèses sur les types de signaux recherchés. Les modèles sont obtenus en considérant la gamme de systèmes source qui pourraient produire des ondes gravitationnelles. Les recherches modélisées utilisant le filtrage adapté semblent être un cas clair d'observation chargée de théorie. Ce qui peut être vu dans les données est déterminé par les modèles utilisés dans le processus d'observation. La charge théorique de ces observations conduit à se demander si les LIGO-Virgo observent les véritables signaux d'ondes gravitationnelles dans les données.

Faire des inférences sur les propriétés du système source implique d'estimer les valeurs des paramètres caractérisant le système. L'estimation des paramètres est effectuée dans un cadre bayésien. Des distributions de probabilité a priori doivent être spécifiées pour tous les paramètres. Cette analyse inclut des paramètres supplémentaires pour modéliser les incertitudes d'étalonnage. Avec l'estimation des paramètres, nous avons un cas d'observation chargée de théorie. Les observations de fusions binaires sont basées sur ce que la théorie a à dire sur leur comportement.

Ces observations sont médiatisées par des modèles. Les modèles comblent le fossé entre la théorie et les données, ils agissent comme des instruments de médiation. Un cas clair d'observation chargée de théorie, puisque cette technique repose sur une connaissance préalable de ce que sera la forme du signal d'onde gravitationnelle. Allan Franklin appelle cela la charge théorique de l'expérience.

On peut caractériser les sources de biais comme étant dues à l'imprécision du modèle par rapport à la théorie sous-jacente, dans le cas d'un biais de modélisation, et à l'imprécision de la théorie par rapport au système cible, dans le cas d'un biais fondamental. Yunes et Pretorius ([Yunes Nicolas 2009](#)) ont discuté de ce qu'ils appellent un biais fondamental dans la méthodologie de l'astrophysique des ondes gravitationnelles: l'hypothèse de la validité de la relativité générale et les équations de champ d'Einstein aux conditions extrêmes présentes lorsque deux trous noirs fusionnent.

Tout test empirique semble nous impliquer dans un schéma de justification circulaire. Nous ne pouvons tester les prédictions de la relativité générale que si nous connaissons les propriétés des objets que nous observons, mais nous ne pouvons estimer ces propriétés qu'en supposant que nos modèles relativistes généraux de ces objets sont précis. Pour les fusions de trous noirs binaires, notre seule façon d'en savoir plus sur ces objets est via des modèles qui présupposent l'exactitude de la relativité générale. Cela pourrait être compris comme une sorte de régression de l'expérimentateur, exprimée en termes de modèles. Allan Franklin soutient que la confiance dans la compréhension de la réponse d'un détecteur est établie par la procédure d'étalonnage. Les systèmes de trous noirs binaires sont des systèmes astrophysiques distants, ce qui signifie qu'il n'est pas possible de les manipuler de quelque manière que ce soit. L'analogie de l'étalonnage n'est pas possible, car nous ne pouvons pas tester la réponse de l'interféromètre à une fusion de trous noirs binaires avec des propriétés connues.

L'étalonnage consiste en l'utilisation de lasers pour pousser les masses d'essai de l'interféromètre, imitant ainsi l'effet d'une onde gravitationnelle passante. Le manque d'interventions ou d'accès empirique indépendant combiné à la nouveauté des régimes étudiés rend le problème du biais théorique particulièrement aigu, amenant le problème de circularité au-delà des problèmes plus génériques de la charge théorique dans la science empirique.

Pluralisme opérationnel et étoiles d'étalonnage

Le pluralisme opérationnel est supporté par l'introduction d'opérations de mesure alternatives qui impliquent différents indicateurs physiques ([Ohnesorge 2022](#)). Les procédures de mesure et les modèles théoriques sont modifiés de manière itérative pour tenir compte des écarts entre prédiction et mesure. Si elles sont coordonnées avec succès, les mesures convergent dans l'espace des résultats possibles permis par notre meilleur modèle théorique de leur cible. La coordination est beaucoup plus difficile à réaliser lors de la mesure des paramètres de grands systèmes physiques partiellement inaccessibles.

Miguel Ohnesorge ([Ohnesorge 2022](#)) a analysé un problème fondamental de mesure géo-scientifique, la mesure de l'aplatissement polaire de la Terre. Il a introduit la notion de coordination coriace pour désigner des situations dans lesquelles les scientifiques ne peuvent ni prédire ni contrôler expérimentalement les perturbations pertinentes du processus de mesure. Les perturbations du processus de mesure sont des effets physiques qui ne sont pas inclus dans le modèle initial du processus de mesure. Il soutient que la coordination coriace peut être résolue par une méthodologie évolutive et itérative qu'il appelle le pluralisme opérationnel ou le cohérentisme dynamique.

La controverse sur la forme de la Terre consistait à dériver la figure géométrique générale de la Terre et certaines limites quantitatives de ses paramètres à partir d'hypothèses sur l'attraction gravitationnelle, la distribution de la densité intérieure de la planète et son mouvement de rotation. La géodésie mathématique visant à déterminer dans quelles conditions, des corps fluides homogènes en rotation uniforme, dont les particules constitutives s'attirent selon la loi du carré inverse de la gravité, peuvent se trouver dans un état d'équilibre hydrostatique.

Les tentatives de définition de l'équilibre hydrostatique ont commencé avec Isaac Newton (1642-1727) et Christian Huygens (1629-1695).

Newton en a fait un problème mathématique en introduisant un paramètre empirique représentant le rapport approximatif entre la force centrifuge et l'accélération gravitationnelle à l'équateur. Il a soutenu, qu'un sphéroïde approximativement ellipsoïdal, est la seule figure d'équilibre possible.

Huygens a proposé des modèles d'équilibre ellipsoïdal, qui peuvent être dérivés de sa théorie selon laquelle la gravité n'est pas une force universelle agissant sur toutes les particules de matière, mais est dirigée vers le centre des planètes.

Alexis Clairaut (1713-1765) a indiqué en 1743, qu'une densité croissante vers le centre se traduirait par une ellipticité plus petite, contrairement à ce que Newton avait supposé.

Pour produire des preuves de la loi universelle du carré inverse et de la précision globale de leur modèle d'ellipsoïde, les géodésiens physiques ont dû confronter des valeurs pour les paramètres du modèle. Les variations latitudinales de la force de gravité et les longueurs des arcs méridiens triangulés indiquent la courbure de la Terre. La magnitude des indicateurs fut évaluée à différentes coordonnées déterminées astronomiquement. L'aplatissement polaire fut déduit de l'ellipticité du modèle qui tient compte des mesures d'oscillations locales de pendules et des variations d'arcs méridiens. La définition même de l'aplatissement polaire reposait sur le modèle d'ellipsoïde dérivé théoriquement. Les conflits locaux entre les paramètres mesurés et prédits des gravités et des courbures de surface ont mis en évidence les lacunes du modèle ellipsoïde.

Les régularités reliant l'ellipticité aux variations de gravité et de courbure de la surface, avaient été définies par rapport au modèle théorique de l'ellipsoïde. D'autre part, malgré les mesures d'arcs méridiens et d'oscillations de pendules, il n'y avait pas de données suffisantes expliquant la distribution et les causes des écarts par rapport à la courbure et la gravité de surface. Des mesures convergentes des paramètres définissant le modèle ellipsoïde conforme à la gravitation newtonienne manquaient toujours.

Les perturbations non anticipées résultaient principalement de l'ignorance de la répartition irrégulière de la densité topographique et souterraine de la Terre, qui se traduisait par des incohérences entre les données de différentes régions. Les géodésiens n'avaient pas suffisamment de connaissances théoriques sur l'intérieur hétérogène de la Terre et la distribution de sa densité topographique. Leurs indicateurs étaient inévitablement exposés à de multiples perturbations résultant de la différence entre la Terre physique et le modèle idéalisé utilisé dans les mesures. La coordination entre des indicateurs physiques et les modèles du système cible est précisément la fonction désignée de l'étalonnage.

L'ellipsoïde est un modèle de la terre coordonné avec la gravitation newtonienne basée sur les principes de l'équilibre planétaire. Ce modèle, à son tour, est coordonné avec les variations mesurées d'oscillations des pendules et aux arcs méridiens. Une coordination coriace se produit si les perturbations résultant des idéalizations ne peuvent pas être validées expérimentalement comme conformes aux prédictions appuyées par les hypothèses théoriques.

La première tentative pour déterminer l'ellipticité de la terre à partir de ses effets perturbateurs sur l'orbite de la lune avait été entreprise dans le troisième volume de *Mécanique Céleste* ([Laplace 1967](#)) par Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). Une perturbation longitudinale de la lune était proportionnelle au sinus de la longitude du nœud de la lune. Un nœud lunaire est le moment précis où la Lune traverse le plan de l'orbite de la Terre autour du soleil. Les deux nœuds de l'orbite de la lune marquent les points auxquels elle se rapproche le plus de l'équateur terrestre. L'effet variait avec la proximité de l'orbite de la lune avec le gonflement équatorial de la terre. En 1783, Laplace a trouvé la perturbation latitudinale correspondante et a soutenu que les deux phénomènes peuvent être expliqués par l'impact que l'aplatissement polaire de la Terre a sur le champ de gravité terrestre. Ces perturbations longitudinales et latitudinales causées par l'ellipticité terrestre pourraient être utilisées comme indicateur de mesure de l'ellipticité terrestre.

Le deuxième volume de *Mécanique Céleste* de Laplace a été le travail pionnier dans l'exploration des possibilités d'utilisation de la précession comme mesure de l'ellipticité. La précession fait référence à un mouvement circulaire périodique dans l'orientation du plan qui croise l'orbite terrestre autour du soleil en chaque point. Newton avait expliqué l'ampleur de la précession en faisant appel à l'attraction lunaire et solaire sur le gonflement équatorial ellipsoïdale de la terre. Il a indiqué l'impact différent que la traînée luni-solaire a sur le mouvement de rotation de la Terre à différentes latitudes.

Le mouvement de l'axe de rotation ne s'explique pas par l'aplatissement de la terre, mais par l'inégalité entre les moments d'inertie autour de son axe polaire et équatorial. Pour un ellipsoïde solide de densité homogène, cette inégalité varie avec la différence de son ellipticité. Si elle est appliquée à la Terre réelle, l'ampleur de l'inégalité est affectée par des hétérogénéités dans sa distribution de densité intérieure.

Les déviations de la direction de la gravité donnent des estimations quantitatives de la différence du champ de gravité terrestre dans un réseau de triangulation et celui d'un ellipsoïde. De telles déviations peuvent être déterminées en comparant les coordonnées astronomiques déterminées localement en un certain point dans un réseau de triangulation avec les coordonnées auxquelles le même point est attribué à une surface de référence ellipsoïdale. Pour mesurer de manière fiable l'ellipticité de la Terre, il faut multiplier le nombre de stations astronomiques sur les réseaux de triangulation, de sorte que l'ellipsoïde puisse être orienté de telle manière que la quantité totale des déviations restantes compensées pour l'équilibre gravitationnel due à la croûte terrestre puisse être statistiquement minimisée.

Indicators	Potential Sources of Systematic Error
Latitudinal Variations in Pendulum lengths	<i>Concentration in specific regions, altitude reduction, island, and coast anomalies</i>
Latitudinal Variations in Lengths of Meridional Arcs	<i>Deflections of the vertical during orientation, concentration in specific regions</i>
Lunar Perturbations	<i>Data collected over large periods of time and at different observatories, unaccounted perturbations of the lunar orbit</i>
Precessional Constant	<i>Heterogenous interior density distribution of the earth</i>

Figure 2 - Cinq procédures de la mesure de l'aplatissement polaire de la Terre(Ohnesorge 2022)

L'augmentation du nombre d'indicateurs de mesure physiquement distincts joue un rôle crucial dans la résolution des coordinations coriaces (Ohnesorge 2022). Il faut isoler les perturbations qui se chevauchaient en étudiant leur impact sur des indicateurs de mesure physiquement distincts. Les valeurs du pendule avaient joui d'une position épistémique privilégiée sur les triangulations à partir d'arcs méridiens. En comparant les deux procédures à la valeur d'ellipticité déterminée par les perturbations lunaires et les limites d'ellipticité impliquées par la précession, elles ont convergé assez étroitement tout en étant en désaccord avec les valeurs du pendule.

Deux sources d'erreur auraient pu expliquer les mesures discordantes des pendules : les effets de la compensation souterraine et la répartition insuffisante des stations pendulaires. La convergence à la lumière de différentes sources d'erreur plaide contre des valeurs discordantes. Les géodésiens étaient ainsi parvenus à un premier consensus provisoire sur l'aplatissement polaire de la Terre, impliquant quatre procédures de mesure convergentes avec différentes sources d'erreur.

Après avoir pris en compte les effets que les distributions de densité souterraines ont sur les erreurs de mesures géodésiques du pendule, toutes les principales mesures d'ellipticité impliquant les différents indicateurs avaient convergé. Les géodésiens avaient identifié un intervalle de convergence unique et établi des hypothèses bien étayées pour expliquer les écarts antérieurs. Cela a fourni une preuve importante de la loi universelle du carré inverse de Newton utilisée dans les dérivations du modèle ellipsoïde.

Les géodésiens ont résolu leur difficile problème de coordination, atteignant une convergence entre les mesures de l'aplatissement polaire de la Terre et expliquant les erreurs précédentes dans les mesures du pendule et de l'arc. Ils ont surmonté de multiples perturbations qui se chevauchent et qu'ils ne pouvaient ni prédire théoriquement ni exclure de leurs mesures, en introduisant des mesures supplémentaires basées sur différents indicateurs physiques ([Ohnesorge 2022](#)).

Ils ont introduit cinq procédures de mesure avec des indicateurs physiquement distincts. Ils ont identifié des valeurs aberrantes à partir d'un intervalle de convergence partagé et analysé les perturbations affectant uniquement la mesure discordante. Des sensibilités d'erreur spécifiques de la mesure discordante ont été utilisées pour expliquer les discordances détectées.

Un intervalle de convergence ajusté conduit à l'identification de nouvelles valeurs aberrantes, qui motivent de nouvelles hypothèses sur les sources d'erreur correspondantes. Les intervalles de convergence sur des sources d'erreur distinctes sont justifiés en fonction de leur contribution aux itérations suivantes.

Le pluralisme opérationnel dépend du fait que plusieurs indicateurs soient suffisamment différents dans leur constitution physique et dans l'applicabilité contextuelle qui en résulte.

6.1-Les premières données du télescope spatial James Webb et l'évolution de son processus d'étalonnage.

James Webb est un nouveau télescope spatial qui a été lancé en décembre 2021. Au cours des six mois qui ont suivi, il a passé avec succès toutes les phases de mise en service. Le miroir primaire de 6,5 m. de JWST est formé de 18 segments de miroir hexagonaux en béryllium plaqué en or, qui permettent au télescope d'observer à la fois dans le proche infrarouge et dans le moyen infrarouge. Quatre instruments scientifiques (NIRCam, NIRSpec, MIRI, NIRISS) et une caméra de guidage (FGS) sont concurremment intégrés.

La vision infrarouge de James Webb aide le télescope à remonter le temps, car la lumière des galaxies plus anciennes et plus éloignées est décalé vers les longueurs d'onde infrarouges. En physique et en astronomie, le décalage vers le rouge se produit lorsque la lumière visible d'un objet est décalée vers l'extrémité rouge du spectre. Les astronomes utilisent les décalages vers le rouge pour mesurer l'expansion de l'univers, et pour déterminer la distance aux objets les plus éloignés.

L'étalonnage se fait généralement en observant une étoile bien comprise. Les astronomes examinent les données recueillies par les divers instruments du télescope, telles que la luminosité de l'étoile dans différentes longueurs d'onde de lumière, et les comparent aux mesures de la même étoile provenant d'autres télescopes. Il est spécialement laborieux pour les accomplissements qui nécessitent des mesures précises de la luminosité des objets astronomiques.

Pour essayer d'uniformiser toutes les mesures, le Space Telescope Science Institute de Baltimore travaille sur un plan détaillé pour pointer Webb vers plusieurs types d'étoiles bien comprises et les observer avec chaque détecteur, dans chaque mode, pour chaque instrument du télescope([Gordon 2022](#)). Le programme observe un échantillon d'étoiles d'étalonnage qui ont été largement examinées sur la base principalement des observations du télescope spatial Hubble, du télescope spatial Spitzer et de la *Satellite Transiting Exoplanet Survey*. Ils utilisent plusieurs étoiles de trois types différents pour permettre de quantifier les incertitudes statistiques et systématiques.

Les observations des étoiles d'étalonnage unies aux prédictions des densités de flux et la luminosité par rapport à la distance sont utilisées pour calculer les facteurs d'étalonnage qui convertissent une mesure en unités instrumentales vers les unités physiques. Une mesure par pixel moyen, l'unité de base de la définition d'une image, corrige les différences de réactivité entre les pixels.

L'unité physique naturelle pour l'étalonnage est la luminosité de surface. Répondre à la plupart des questions scientifiques nécessite des mesures de densités de flux et de luminosité de surface. La densité de flux mesurée à partir d'une source astronomique dépend de la luminosité intrinsèque de la source et de sa distance. L'unité de luminosité de surface indique la précision des mesures de source ponctuelle. Une méthode courante d'étalonnage consiste à améliorer des mesures de la densité de flux d'une étoile en unités instrumentales en la comparant à la prédiction de sa densité de flux, souvent basée sur un modèle d'atmosphère stellaire. Les étoiles sont les sources les plus souvent utilisées pour l'étalonnage du flux, ainsi que d'autres sources étalon en laboratoire. La source d'étalonnage de flux idéale est celle qui a été directement étalonnée par rapport aux normes de laboratoire à toutes les longueurs d'onde et fréquences d'intérêt de la lumière.

Des mesures liées aux normes de laboratoire doivent être référées à des cibles observables par presque tous les modes d'observation du télescope spatial James Webb. Ces mesures doivent être utilisés pour fournir des prédictions de densités de flux à toutes les longueurs d'onde. Le transfert des mesures d'étoiles brillantes vers des étoiles plus faibles nécessite des instruments capables d'observer des étoiles avec une large gamme de densités de flux avec une précision relative élevée. La conception du programme d'étalonnage de flux absolu du James Webb s'appuie directement sur les programmes d'étalonnage de Hubble et Spitzer qui ont tous deux des liens directs avec les mesures standard du laboratoire et les plages de longueurs d'onde qui chevauchent James Webb.

L'étalonnage de Hubble est défini par comparaison des trois spectres d'étoiles naines blanches, soit les rayures d'absorption de l'hydrogène, avec les densités de flux de l'étoile la plus brillante Vega. L'étalonnage du flux de Spitzer a été déterminé indépendamment pour des étoiles primaires conformes avec les prédictions des densités de flux et des cibles variées par longueur d'onde. Les densités de flux ont été fixées par des modèles adaptés à la photométrie et à la spectroscopie au sol. Le programmes d'étalonnage de Hubble et Spitzer sont en accord quant aux mesures empiriques.

Le programme d'étalonnage de flux absolu du James Webb englobe tous les modes d'observation. Les étoiles d'étalonnage sont sélectionnées pour être traçables aux longueurs d'onde optiques et infrarouges, permettant aux densités de flux d'être transférées à toutes les longueurs d'onde observées. James Webb fonctionne avec des instruments qui ont de nombreuses capacités similaires à celles des grands télescopes au sol, ce qui nécessite une approche d'étalonnage croisé.

Le principe de ce programme est de fournir un étalonnage de flux absolu robuste et multi-instruments pour toutes observations du James Webb où les incertitudes statistiques de l'étalonnage peuvent être quantifiées. Ce programme observera un réseau d'étoiles d'étalonnage avec tous les instruments, à la fois en mode photométrique et spectroscopique ([Doyon 2012](#)), à différents niveaux de densité de flux, croisé entre des instruments ayant différentes gammes de sensibilité. L'observation d'étoiles avec différents types spectraux permettra de tester les biais systématiques dans la compréhension des étoiles telles qu'encodées dans les modèles d'atmosphère stellaire.

L'objectif de l'étalonnage du flux absolu est d'avoir un étalonnage aussi précis que possible en utilisant une quantité raisonnable de temps d'observation. Atteindre le niveau de précision requis nécessite plusieurs étoiles d'étalonnage, des modèles atmosphériques stellaires de haute qualité et le transfert avec précision des mesures liées aux sources de laboratoire vers des sources plus faibles observables. Des étoiles d'étalonnage de chaque type sont nécessaires pour tenir compte des problèmes avec les étoiles jugées impropres après analyse des observations. Les modèles seront limités par des observations archivées de Hubble et Spitzer de l'échantillon d'étoiles d'étalonnage.

L'étalonnage moyen est établi en observant un plus grand échantillon d'étoiles possible avec chaque filtre et détecteur de longueurs d'onde possible, incluant à la fois la photométrie et la spectroscopie. L'incertitude minimale des observations utilisant des mesures répétées de la même étoile est faite après correction de tous les effets instrumentaux connus. Compte tenu de la large gamme de sensibilité, plusieurs étoiles peuvent être utilisées avec des observations qui se chevauchent.

L'échantillon d'étoiles d'étalonnage a été choisi afin de fournir des étoiles de chaque type pour chaque mode d'instrument. La gamme des densités de flux des étoiles d'étalonnage couvre les densités de flux minimales et maximales ciblées dans ce programme. Les densités de flux mesurées pour les mêmes étoiles accordent différents instruments avec des longueurs d'onde qui se chevauchent.

Le plan complet détaillé prendra plusieurs années pour être pleinement exécuté, à la fois en raison de la nécessité de surveiller l'étalonnage du flux pendant toute la durée de vie de la mission du télescope, et parce que le temps total d'observation nécessaire est au-delà de ce qui est raisonnable pour un étalonnage absolu dans n'importe lequel cycle de l'année.

Les observations des différents types d'étoiles fourniront des indications si l'un des types a un comportement non idéal. Les spectres de toutes les étoiles d'étalonnage sont comparés aux sensibilités instrumentales. Un algorithme simple a été utilisé pour sélectionner les étoiles, jusqu'à ce que tous les modes soient couverts.

L'échantillon d'étoiles d'étalonnage comprend des étoiles chaudes, des naines A et des analogues solaires. L'utilisation d'étoiles chaudes est motivée par le fait que ces étoiles ont des atmosphères simples dominées par le transport radiatif ou transfert par rayonnement.

Tableau 1 - Modes d'observation du télescope spatial James Webb([Gordon 2022](#))

Table 1. JWST Observing Modes Summary		
Instrument	Mode	Details
NIRCam	Imaging	29 filters, 0.6–5 μm
	Coronagraphy	5 masks, 1.8–5 μm
	Slitless spectroscopy	2.4–5 μm
NIRSpec	MOS spectroscopy	9 dispersers, 0.6–5.3 μm
	IFU spectroscopy	9 dispersers, 0.6–5.3 μm
	Fixed slit spectroscopy	9 dispersers, 0.6–5.3 μm
NIRISS	Wide field spectroscopy	2 gratings, 0.8–2.2 μm
	Single object spectroscopy	1 grating, 0.6–2.8 μm
	Aperture masking interferometry	4 filters, 2.8–4.8 μm
FGS	Imaging	12 filters, 0.8–5.0 μm
	Imaging for Guiding	open, 0.5–5.5 μm
MIRI	Imaging	9 filters, 5–28 μm
	Coronagraphy	4 masks, 5–12, 23 μm
	Low resolution spectroscopy	5–12 μm
	IFU spectroscopy	12 gratings, 4.9–28.8 μm

Le transport par rayonnement est le phénomène physique de transfert d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Trois des naines blanches qui sont à la base de l'étalonnage du

flux de Hubble et de Spitzer sont incluses, car elles ont des atmosphères simples dominées par le transport radiatif.

Les analogues solaires sont similaires à notre Soleil, qui est l'étoile dont nous avons les connaissances les plus étendues, et ils sont les principaux étalonneurs pour les observations au sol.

L'utilisation de plusieurs étoiles du même type a une longue histoire dans l'étalonnage du flux absolu. L'étoile Vega a été utilisée pour les observations basées sur un modèle atmosphérique stellaire. Elle a un disque de débris circumstellaire avec une émission importante au-dessus de la photosphère stellaire. La photosphère est la couche d'une atmosphère stellaire qui émet le rayonnement continu transportant la majeure partie de l'énergie lumineuse de l'étoile.

Les critères qui font d'une étoile un bon étalonneur de flux absolu sont un mélange de propriétés de l'étoile elle-même. Les propriétés stellaires commencent par le fait que l'étoile est une étoile unique ou en binaire large pour éviter les biais dans la mesure de la densité de flux de l'étoile. Les binaires proches nécessitent des modèles plus complexes pour tenir compte des spectres mixtes complexes et de l'échauffement possible par leur compagnon.

Pour la spectroscopie, les facteurs d'étalonnage sont donnés en fonction de la longueur d'onde. Le signal de référence est attribué à la longueur d'onde moyenne du pixel. La connaissance de la forme spectrale de la source est nécessaire pour calculer la longueur d'onde effective et corriger la densité de flux pour la différence entre les formes spectrales réelles de la source et de référence. La correction des couleurs aligne la forme spectrale avec la densité de flux correcte à la longueur d'onde de référence.

6.2-Outils et étalonnages pour la photométrie et l'astrométrie ponctuelles de précision

NIRCam de James Webb, la caméra principale de l'observatoire, relève simultanément le cosmos dans deux gammes infrarouges différentes. NIRCam possède des capacités coronagraphiques et spectroscopiques. La coronagraphie bloque la lumière d'une étoile afin que les objets proches de l'étoile puissent être observés. NIRCam est le principal outil d'alignement. NIRISS prend en charge les opérations dans trois modes d'observation. Il dispose d'une caméra utilisable en parallèle avec NIRCam pour fournir des capacités d'imagerie supplémentaires. Il comporte un

spectrographe sans fente, où toute la lumière tombant sur la caméra sera dispersée dans son spectre. Contrairement à un spectrographe ordinaire, la source lumineuse d'un spectrographe sans fente n'est pas une fente étroite.

NIRISS utilise la spectroscopie de transit, une technique qui permet à Webb d'étudier la composition chimique de l'atmosphère d'une exoplanète lorsqu'elle passe devant son étoile hôte. Avec NIRISS, les astronomes étudieront si oui ou non les spectres de planètes lointaines présentent des rayures caractéristiques de molécules telles que l'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxygène dans leur atmosphère.

NIRISS a été déployé par la technologie spatiale canadienne de pointe dirigée par le professeur René Doyon de l'Université de Montréal ([Doyon 2023](#)). Chacun des instruments de James Webb contient un ensemble de miroirs et d'autres éléments optiques qui redirigent et concentrent la lumière des étoiles recueillie par le miroir principal. NIRISS prend en charge les observations parallèles avec NIRCам. Cela permet de comparer les données des deux instruments différents.

Le capteur de guidage qui accompagne l'instrument permettra à James Webb de rester constamment verrouillé ou pointé, avec une très grande précision, sur une cible céleste spécifique, même en mouvement. NIRCам se compose de 8 détecteurs à ondes courtes séparés et de 2 détecteurs à ondes longues. Ils fonctionnent avec le même ensemble de filtres à bande étroite, moyenne et large.

Les points zéro de flux absolu NIRCам actuels ont été dérivés des données de mise en service. Le point zéro d'un système photométrique est défini comme la magnitude d'un objet qui produit un comptage par seconde sur un détecteur. La mise en service du James Webb était destinée à fournir un premier passage à l'étalonnage du flux absolu. Un programme d'étalonnage est en cours pour fournir des mesures plus robustes qui incluent des normes de flux imagées sur chacun des 10 détecteurs. Le point zéro est utilisé pour étalonner un système à une magnitude standard, car le flux détecté à partir des étoiles varie d'un détecteur à l'autre. C'est le réglage du point zéro qui détermine le lien entre les comptages observés et un système photométrique standard. La première différence fondamentale entre les systèmes photométriques concerne leurs jeux de filtres.

Le programme *Resolved Stellar Populations Early Release Science* est utilisé pour optimiser les performances photométriques de l'instrument NIRCам ([Boyer 2022](#)). Ce programme scientifique

a obtenu 27,5 heures d'imagerie NIRCam et NIRISS de trois cibles, sélectionnées pour effectuer les premières observations scientifiques après l'achèvement de la mise en service.

L'exploration des capacités astrométriques et photométriques des instruments de JWST sur la base des données collectées ont pour objectif de développer les outils nécessaires pour obtenir une photométrie et une astrométrie de haute précision des étoiles dans des environnements encombrés. Les observations de l'amas globulaire M92, très pauvre en métaux et situé à une distance de 8,5 kpc du Soleil, sont utilisées comme étalon pour les études de populations stellaires extragalactiques. Un kiloparsec (kpc) est une mesure de distance égale à 3 260 années-lumière. Les amas galactiques sont les plus grands objets de l'univers maintenus ensemble par leur gravitation.

Les points zéro sont acquis au système de données de référence d'étalonnage, un sous-ensemble de filtres expérimenté sur la galaxie Grand Nuage de Magellan. Les points zéro pour les filtres restants ont été dérivés en interpolant les spectres d'étoiles standard. Une équipe a utilisé les données du Grand Nuage de Magellan pour dériver les décalages de flux entre les détecteurs et les a reliés à l'étalonnage de flux absolu. Les décalages de flux entre les détecteurs à ondes courtes sont dérivés à l'aide de trois techniques: deux basées sur des fonctions de luminosité pour chaque détecteur de l'amas M92 et une sur les données du Grand Nuage de Magellan. Les observations du Grand Nuage de Magellan disponibles sont utilisées pour déterminer les décalages avec les fichiers obtenus pour l'amas M92. Les données de l'amas M92 démontrent clairement un décalage de flux significatif entre les huit détecteurs à ondes courtes NIRCam dans l'étalonnage James Webb.

Les fonctions d'étalement ponctuel ([Nardiello 2022](#)) sont utilisées pour supprimer les étoiles voisines autour d'une étoile d'intérêt afin que l'on puisse effectuer une photométrie d'ouverture simple sur l'étoile cible. Les PSF décrivent la distribution bidimensionnelle de la lumière dans le plan focal du télescope pour les sources ponctuelles astronomiques. La photométrie de la PSF s'est avérée utile pour déterminer la magnitude d'étoiles dans les champs encombrés. Des modèles des fonctions d'étalement ponctuel pour les filtres ont été développés pour déterminer la précision photométrique de NIRCam pour les étoiles dans les régions centrales encombrées de l'amas globulaire pauvre en métal M92.

Des procédures sont utilisées pour dériver des PSF pour chacun des filtres NIRCam et pour extraire les premiers catalogues photométriques JWST d'étoiles dans M92. Ces données ont été utilisées pour construire les premiers diagrammes couleur-magnitude d'un amas globulaire. Un processus

itératif détermine les PSF pour les filtre et le détecteurs à travers le champ de vision. Les images NIRISS et FGS sont également utilisées pour les études de domaines encombrés.

Chaque pixel est vérifié par le pipeline d'étalonnage en langage Python du télescope spatial James Webb, qui traite les données de tous les instruments, en appliquant diverses corrections pour produire des données de sortie prêtes pour la science. Dériver un modèle correct pour une PSF sous-échantillonnée est une tâche difficile, car des PSF incorrectes peuvent introduire des erreurs systématiques dans l'extraction des positions et des flux d'étoiles.

Dans le traitement d'image, la convolution est le processus de transformation d'une image en appliquant une matrice de valeurs. Cette approche a été utilisée pour dériver les PSF de la bibliothèque de référence de Hubble, qui représentent à ce jour l'état de l'art pour la photométrie et l'astrométrie à source ponctuelle. Pour dériver un modèle de PSF bien échantillonné, il est nécessaire de contraindre précisément les positions et les flux pour un ensemble d'étoiles. Une approche itérative est nécessaire pour dériver du modèle de PSF les positions et flux des étoiles, améliorant à chaque itération les deux ensembles jusqu'à ce qu'une convergence soit atteinte.

Des modèles de PSF sont obtenus pour chaque image de manière totalement empirique, en moyennant un échantillon d'étoiles brillantes. Elles sont suffisamment bonnes pour mesurer en première approximation les positions et les flux des étoiles, mais elles ne sont pas suffisantes pour des mesures photométriques et astrométriques de haute précision, en particulier dans des environnements surpeuplés. Ces fonctions initiales ont été utilisées pour mesurer les positions et les flux d'étoiles isolées dans chaque image. Un algorithme modélise les étoiles progressivement plus faibles grâce à un processus itératif, en ajustant simultanément les positions et les flux de chaque étoile et de ses voisines amassées. Les positions et flux des étoiles sont utilisés pour définir un catalogue maître qui sert de référence pour modéliser le modèle les PSF effectives pour un détecteur et un filtre donnés. Un catalogue contient entre 1500 et 6000 étoiles.

Connaissant le flux et la position de chaque étoile dans chaque exposition, chaque pixel représente un échantillonnage de la PSF en un point du réseau bidimensionnel qui définit la PSF effective. Étant donné le grand nombre d'étoiles dans chaque catalogue, il y a de l'ordre de millions d'échantillonnages ponctuels utilisés pour déterminer un modèle effectif. À mesure que le modèle effectif s'améliore, les échantillonnages ponctuels et la dispersion des PSF effectives s'améliorent. L'amélioration du modèle est particulièrement perceptible dans la répartition des erreurs de la

phase pixel, c'est-à-dire la différence entre les positions attendues et les positions mesurées des étoiles, obtenus à l'aide du modèle effectif à chaque itération.

Si le modèle des PSF effectives était constant dans le temps, il pourrait en principe être utilisé pour dériver les positions et les flux d'étoiles dans toutes les images obtenues avec NIRC*am*. Cependant, l'expérience passée avec le télescope spatial Hubble montre que, même dans des conditions idéales et stables, les PSF sont connues pour varier avec le temps.

Pour un ensemble de détecteurs et de filtres donné, on commence par la bibliothèque des PSF effectives mesurées à partir d'un ensemble de données initiales d'observations de l'amas M 92, et on la perturbe pour tenir compte des variations qui émergent dans les données. Une procédure itérative similaire, en utilisant le modèle des PSF effectives de la bibliothèque initiale, permet de mesurer les positions et les flux d'un ensemble d'étoiles isolées. Les positions et les flux de ces étoiles sont rééchantillonnés sur une grille utilisée pour perturber les PSF effectives de la bibliothèque d'origine. Cette procédure est répétée pour converger vers une grille de modèles perturbée de manière optimale. Les variations, soustrayant itérativement des modèles stellaires, s'améliorent significativement après les perturbations. La perturbation des PSF effectives de la bibliothèque est nécessaire pour obtenir les meilleures mesures photométriques et astrométriques.

Avec la bibliothèque de matrices de modèles des PSF effectives déterminées pour l'ensemble complet de filtres et de détecteurs et l'ensemble de données, les positions et les flux d'étoiles sont discernés dans chaque image individuelle, en adoptant le logiciel d'ajustement. Toutes les positions des sources sont harmonisées en un système de référence pour dériver un catalogue final d'étoiles dans chaque variation de contraste d'image. Chaque catalogue comprend les positions des pixels de référence des étoiles, leurs magnitudes et incertitudes instrumentales, et le Qfit moyen. La procédure de nettoyage Qfit garantit la qualité en mesurant la valeur des résidus. La statistique Qfit est utilisée pour identifier et rejeter les mauvaises détections en photométrie ponctuelle.

Lors d'une première tentative d'étalonnage des variations détectées sur différents détecteurs dans les observations de l'amas M92, il était clair qu'il y avait des décalages photométriques significatifs du point zéro. Les décalages photométriques sont corrélés aux points zéro de flux absolu adoptés par le pipeline James Webb pour étalonner les détecteurs individuels. Les points zéro utilisés dans le pipeline d'étalonnage sont encore loin d'être parfaits.

Les catalogues infrarouges de M 92 révélés par les données James Webb peuvent être croisés avec les données de Hubble.

Comme presque tous les anciens amas galactiques, M 92, héberge de multiples populations stellaires caractérisées par différentes abondances d'éléments légers et d'hélium. Plusieurs populations stellaires ont été discernées dans les catalogues croisés de M 92. Une méthode d'étalonnage des grandeurs instrumentales pour les détecteurs et filtres NIRCam individuels à l'aide de modèles théoriques et d'observations Hubble antérieures de M 92 a ainsi été démontrée. Il fournit des mesures des points zéro photométriques pour les détecteurs et filtres individuels.

6.3-Les images d'étalonnage de l'astéroïde de la ceinture principale

Des observations ont été menées pour tester les performances des filtres de l'instrument MIRI, mais l'équipe d'étalonnage a considéré qu'ils avaient échoué en raison d'un pointage de télescope décalé. Un astéroïde, le plus petit observé à ce jour, a été détecté par des astronomes utilisant ces données de l'étalonnage. L'astéroïde a une dimension de moins d'un kilomètre, à une distance de plus de 100 millions de kilomètres dans la ceinture principale située entre Mars et Jupiter.

Les observations d'étalonnage ratées peuvent être scientifiquement utiles([Müller 2023](#)). Les modèles actuels prédisent l'occurrence d'astéroïdes jusqu'à de très petites tailles. Pour confirmer que l'objet détecté est un astéroïde nouvellement découvert, davantage de données de position relatives des étoiles d'arrière-plan sont requises. Les observations ratées ont été utilisées pour établir et tester une nouvelle technique pour contraindre l'orbite d'un objet et pour estimer sa taille. La validité de la méthode a été démontrée en utilisant les observations MIRI combinées aux données des télescopes au sol. Une nouvelle méthode appelée STM-ORBIT a été développée pour estimer la taille et l'orbite de l'astéroïde sans connaître sa véritable position.

Les méthodes radiométriques, les mesures infrarouges des astéroïdes, sont cruciales pour la détermination des caractéristiques physiques et thermiques de petits corps dans le système solaire dans son ensemble. Cependant, les méthodes radiométriques classiques ne peuvent être appliquées que si la position d'un objet au moment de l'observation est connue. Les observations en mode d'imagerie MIRI de l'astéroïde connu 10920, de la ceinture extérieure, ont été utilisées pour valider la méthode. L'astéroïde 10920 a été découvert en 1998, on connaît très peu sur ses caractéristiques physiques. Une séquence de mesures multi-filtres a été exécutée le 14 juillet 2022. Les images ont

montré un objet qui se déplaçait par rapport à 10920. Toutes les observations comprenaient une faible source mobile, tandis que l'astéroïde cible 10920 beaucoup plus lumineux, était à moitié en dehors de l'image MIRI.

Les sources connectées à la solution basée sur Gaia ont montré une contrepartie détectable dans l'exposition MIRI. Gaia est l'interféromètre astrométrique pour l'astrophysique. Son objectif est de créer la carte tridimensionnelle la plus précise de la Voie lactée. Un modèle de forme simple s'est avéré très efficace lors de l'ajustement de données éparses telles que celles fournies par Gaia.

Les solutions radiométriques utilisent un paramètre de rayonnement pour obtenir la forme spectrale de l'astéroïde qui dépend de la rotation, des caractéristiques thermiques de la surface de l'objet, du régime de longueur d'onde et de la géométrie observée. Des corrections sont basées sur les différences de la forme spectrale de l'astéroïde par rapport au spectre de référence Vega, qui a été utilisé pour établir l'étalonnage photométrique. Les étoiles observées dans le cadre du programme d'étalonnage photométrique couvrent la gamme de flux MIRI similaire à celle de l'astéroïde 10920. Le nouvel objet a été détecté dans tous les filtres MIRI. Les flux MIRI pour l'astéroïde 10920 de la ceinture principale et le nouvel astéroïde sont en accord dans une gamme de longueurs d'onde.

Les prédictions de modèles de flux MIRI aux longueurs d'onde couvrent une large gamme proche du pic d'émission thermique de l'objet. Les flux infrarouges, associés aux longueurs d'onde, sont influencés par les propriétés thermiques. À des longueurs d'onde longues, proches du pic d'émission thermique, les flux sensibles aux propriétés thermiques, suivent de près les changements de l'objet. La luminosité et l'arrière-plan de l'objet augmentent.

10 000 orbites couvrent un espace de paramètres similaire à ceux de 10920. Chacune des solutions d'orbite possibles est accompagnée de paramètres pour une géométrie d'observation et une portée d'observations spécifiques. Les solutions orbitales possibles sont évaluées pour calculer les prédictions de flux aux longueurs d'onde de référence MIRI. Des prédictions sont faites pour une gamme d'albédos ou proportions de la lumière incidente qui est réfléchi. Des ajustements placent 10920 au bord de la ceinture principale extérieure au moment des observations. Ce n'est pas suffisant pour déterminer une orbite, mais cela rend très probable son emplacement.

Les positions et les flux MIRI permettent en conséquence de contraindre la distance d'un objet inconnu au moment de l'observation et sa taille sans connaître l'orbite réelle de l'objet. Il est

essentiel pour le succès de la méthode de disposer de détections dans la gamme de longueurs d'onde la plus large possible, ou plus précisément que les mesures permettent d'estimer la température de l'objet. La détermination de la taille et de la localisation d'objets sans une orbite connue ne sera possible que par des spectres infrarouges thermiques proches du pic d'émission.

6.4-La performance scientifique du télescope spatial James Webb par rapport aux attentes de pré-lancement

L'imageur et spectrographe sans fente NIRISS possède quatre modes qui lui permettent d'étudier le rayonnement dans le proche infrarouge, invisible à l'œil humain, de différents objets célestes. Il sert à étudier la composition de l'atmosphère des exoplanètes, grâce à la méthode dite du transit. Si la planète possède une atmosphère, cette dernière va filtrer une partie de la lumière provenant de l'étoile et en modifier le spectre.

L'Institut Trottier de recherche sur les exoplanètes (iREx) regroupe des chercheurs et des chercheuses de l'Université de Montréal et de l'Université McGill. Le directeur de l'iREx, René Doyon, professeur au département de physique de l'Université de Montréal a codirigé l'équipe qui a conçu le NIRISS et il a participé au cours de la période de la mise en service([Doyon 2023](#)).

De nombreuses observations de spectroscopie peuvent reposer uniquement sur l'acquisition d'étoiles guides pour obtenir le pointage scientifique nécessaire. Lors de la mise en service, certaines observations avaient un décalage de pointage beaucoup plus important en raison de problèmes de correspondance lorsque les données de Gaia ont été combinées pour produire le catalogue d'étoiles guide. Les décalages seront atténués par les futurs étalonnages.

Vers la fin de la mise en service, les performances scientifiques de chaque mode d'instruments scientifiques ont été examinées par rapport aux critères développés avant le lancement pour des paramètres tels que la sensibilité, la qualité de l'image, la longueur d'onde, l'étalonnage astrométrique. Les instruments scientifiques du James Webb ont une sensibilité nettement meilleure que ce qui était prévu avant le lancement. Ce résultat est dû à des PSF plus précises et à l'utilisation d'un étalonnage de flux.

Les observations du champ d'étalonnage astrométrique du JamesWebb dans le Grand Nuage de Magellan, prises juste après l'achèvement de l'alignement optique multi-instruments, démontrent

la qualité de l'image dans tous les instruments. Cela a servi de test d'opérations parallèles coordonnées de l'imagerie NIRCcam + MIRI, la spectroscopie NIRSpec + l'imagerie NIRCcam, ainsi que de l'imagerie NIRCcam + NIRISS et de l'imagerie NIRCcam + FGS. De nombreuses combinaisons de filtres et de modèles de pointage ont été optimisées en parallèle. Les utilisateurs doivent noter la dérivation de l'étalonnage des fichiers de données utilisés dans leurs publications.

L'étalonnage est accessible au public. Les utilisateurs peuvent télécharger et réexécuter le pipeline d'étalonnage avec des paramètres personnalisés adaptés à leurs besoins, ou même modifier ou ajouter des étapes au pipeline d'étalonnage. Un outil Python convertit les coordonnées des pixels bruts de chaque détecteur en positions sans distorsion et place également les dix détecteurs de NIRCcam dans un système de référence commun([Nardiello 2023](#)).

La caractérisation de la distorsion géométrique d'un imageur est d'une importance primordiale pour évaluer son utilisation pour l'astrométrie de haute précision. Cette démarche est particulièrement importante dans le cas des caméras d'un instrument hors atmosphère. Sans utiliser le catalogue astrométrique du télescope spatial Hubble pour dériver la correction de la distorsion géométrique NIRCcam, les nouvelles observations sont étalonnées en l'absence d'un champ astrométrique standard. L'exploitation des données Gaia existantes limite les termes d'une solution à la distorsion géométrique. Des catalogues de positions et de flux ont été extraits à partir d'images étalonnées NIRCcam. Une liste d'étoiles brillantes a été utilisée pour perturber les PSF de manière à prendre en compte les variations temporelles de leurs valeurs effectives. Le logiciel a mesuré le flux et les positions des étoiles en ajustant les PSF de la bibliothèque, et a calculé la moyenne des résidus normalisés qui sont finalement ajoutés aux fonctions de la bibliothèque. La routine a effectué onze tours d'itérations, et à chaque itération, les résidus ont été utilisés pour ajuster les dernières fonctions obtenues. Le paramètre QFIT quantifie essentiellement la différence entre le modèle des PSF adopté et les étoiles observées sur les images.

Pour dériver les coefficients polynomiaux de la distorsion géométrique pour chaque filtre, une série d'itérations a été effectuée en utilisant Gaia comme cadre maître, jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. Les catalogues d'ondes corrigés ont été exploités pour construire un cadre maître sans distorsion. Les transformations amènent les positions mesurées par chaque détecteur d'une image donnée dans un système de référence commun. Il en a résulté des paramètres de transformation de chaque détecteur en un référentiel commun, indépendamment du filtre adopté. Les échelles

absolues sont comparées au cadre de référence astrométrique de Gaia afin de parvenir à l'échelle de la solution de la distorsion géométrique du détecteur pour toutes les images collectées.

James Webb ainsi que Hubble sont en orbite autour du Soleil, provoquant des variations d'échelle dues à l'aberration de vitesse. Le pipeline d'étalonnage inclut pour chaque image le facteur d'échelle d'aberration de vitesse attendu.

Des positions et variations transformées obtenues par chaque détecteur une moyenne a été faite pour obtenir un catalogue d'étoiles plus robuste. Cela a été itéré en affinant les transformations en utilisant comme système de référence le nouveau catalogue contenant une moyenne des positions. Les points zéro photométriques de chaque détecteur ont été obtenus et comparés pour chaque filtre.

En appliquant la correction de la distorsion géométrique dérivée aux positions des sources, et en comparant ces positions avec celles mesurées dans un ensemble de données d'archivage Hubble, il a été possible de détecter des mouvements stellaires. L'amas M92 n'est pas une cible idéale pour une démonstration de ses membres en raison de la densité extrêmement faible des sources galactiques et extragalactiques. La correction a été testée en estimant la dispersion de mouvement interne propre pour M92, ce qui a également produit une vérification de la précision de l'astrométrie NIRCcam. Le résultat est remarquable, compte tenu du fait que dans le processus, une transformation globale des données Hubble en cadres maîtres James Webb a été utilisée. En exécutant une approche par transformations des erreurs résiduelles ont pu être supprimées.

Les données Hubble collectées lors du programme d'étalonnage ont été adoptées pour détecter la dispersion du mouvement interne des étoiles dans le Grand Nuage de Magellan. Ces catalogues ont été mis en correspondance avec le catalogue Gaia de la même région en utilisant des transformations globales pour orienter toutes les positions des étoiles dans un même système de référence. Les mêmes transformations ont été effectuées avec les catalogues corrigés James Webb. Les déplacements convertis démontrent que la correction de la distorsion géométrique NIRCcam permet d'obtenir des résultats de haute précision comparables à ceux obtenus avec Hubble. Les observations ont été exploitées pour étalonner les dix détecteurs NIRCcam. Les positions ont été utilisées pour mesurer les mouvements corrects des objets dans un champ au cœur de l'amas globulaire galactique M92. Il était possible de mesurer la dispersion interne des étoiles au sein du système extragalactique Grand Nuage de Magellan.

Conclusion

Une méthodologie évolutive et itérative réunit le pluralisme opérationnel au cohérentisme dynamique et s'applique à toute forme de coordination qui joint des concepts théoriques aux procédures empiriques pour les mesurer. Un concept métrique auquel ne correspond aucun ensemble cohérent d'opérations de mesure est un concept privé de sens. Cette même exigence avait poussé Hans Reichenbach à voir dans les principes de coordination des propositions synthétiques révisables. La révolution de Henri Victor Regnault a été une révolution dans la physique expérimentale. Il était évident que les méthodes de mesure existantes reposaient sur des régularités théoriques, le genre qu'il espérait tester de manière concluante par des mesures.

Le pluralisme opérationnel est supporté par l'introduction d'opérations de mesure alternatives qui impliquent différents indicateurs physiques. Les procédures de mesure et les modèles théoriques sont modifiés de manière itérative pour tenir compte des écarts entre prédiction et mesure. Si elles sont coordonnées avec succès, les mesures convergent dans l'espace des résultats possibles permis par le meilleur modèle théorique de leur cible. Pour appliquer avec succès le pluralisme opérationnel, les scientifiques doivent non seulement viser à atteindre la convergence, mais développer des hypothèses pour expliquer les valeurs aberrantes en vertu de perturbations affectant uniquement des indicateurs de mesure spécifiques.

Le privilège épistémique de la mesure précède la théorie d'arrière-plan et s'explique mieux par sa fonction préthéorique. Suivant Carnap, les termes qui jouent un rôle spécifique dans une structure peuvent être rendus abstraits, ce qui transforme la théorie elle-même en une structure générique avec de multiples manifestations possibles et rend la théorie plus largement testable empiriquement. La version syntaxique des théories scientifiques doit relier les termes théoriques à ceux d'une théorie antérieurement significative. Dans la version sémantique, l'interprétation est donnée à travers l'analogie d'un modèle de la théorie. Les entités théoriques doivent avoir une signification antécédente. Prétendre qu'un modèle permet d'inférer des conséquences observationnelles plutôt que d'attribuer cette tâche à la signification théorique antécédente conduit à des analogies contradictoires.

De nombreuses explications mathématiques sont basées sur des équations qui sont considérées comme faisant partie d'une théorie. À ce compte les équations pourraient elles-mêmes être considérées comme des modèles. Les modèles considérés comme des médiateurs impliquent un engagement à une séparation entre les théories idéalisées et les choses matérielles.

Les contraintes cinématiques jouent un rôle analogue à celui proposé par Hans Reichenbach et pour ce qu'il appelait l'a priori relativisé d'une théorie. La satisfaction des contraintes cinématiques doit être vérifiée expérimentalement pour s'assurer que la théorie représente le système avec adéquation. Satisfaction de l'a priori relativisé, au sens néo-kantien, fonde la possibilité de l'investigation empirique dans un sens plus fort. Les contraintes cinématiques sont constitutives des systèmes dont traite la théorie, également d'une manière analogue à l'a priori relativisé des néo-kantiens.

La densité de flux mesurée à partir d'une source astronomique dépend de la luminosité intrinsèque de la source et de sa distance. L'unité de luminosité de surface indique la précision des mesures de source ponctuelle. Une méthode courante d'étalonnage consiste à améliorer des mesures de la densité de flux d'une étoile en unités instrumentales en la comparant à la prédiction de sa densité de flux, souvent basée sur un modèle d'atmosphère stellaire.

Références bibliographiques

Bazant M, M. K. (2005). "Exact Solutions of the Navier-Stokes Equations Having Steady Vortex Structures." Journal of Fluid Mechanics **541**: 55–64.

Bogen, J., and James Woodward (1988). "Saving the Phenomena." The Philosophical Review **97**: 303–352.

Bokulich, A. (2017). Models and explanation. Handbook of model-based science. B. T. Magnani L. Dordrecht, Springer: 103–118.

Bokulich, A. (2020). "Calibration, Coherence, and Consilience in Radiometric Measures of Geologic Time." Philosophy of Science **87**: 425–456.

Boyd, N. M. (2021). Epistemology of Experimental Physics. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press.

Boyer, M. L. e. a. (2022). "The JWST Resolved Stellar Populations Early Release Science Program: NIRCcam Flux Calibration." arXiv Cornell University Ithaca, New York astro-ph.IM.

Bridgman, P. W. (1960). The Logic of Modern Physics. New York, Macmillan.

Carnap, R. (2015). Logique Inductive Et Probabilité : 1945-1970. Paris, Librairie Philosophique J. Vrin.

Cassirer, E. (2000). La Théorie De La Relativité D'einstein : Éléments Pour Une Théorie De La Connaissance. Paris, Cerf.

Chang, H. (2004). Inventing Temperature : Measurement and Scientific Progress. Oxford, Oxford University Press.

Chang, H. (2007). "Scientific Progress: Beyond Foundationalism and Coherentism." Royal Institute of Philosophy Supplement **61**: 1-20.

Collins, H. (1994). "A Strong Confirmation of the Experimenters' Regress." Studies in History and Philosophy of Science **25**: 493–503.

Corry, L. (2004). David Hilbert and the Axiomatization of Physics (1898-1918): From Grundlagen Der Geometrie to Grundlagen Der Physik. Dordrecht, Kluwer.

Courtenay, N. d. (2021). "On the Philosophical Significance of the Reform of the International System of Units: A Double-Adjustment Account of Scientific Enquiry." Perspectives on Science **September**: 1–118.

Curiel, E. (2017). "Kinematics, dynamics, and the structure of physical theory." arXiv physics.

Curiel, E. (2020). "Schematizing the Observer and the Epistemic Content of Theories." Studies in History and Philosophy of Modern Physics.

Dethier, C. (2022). "Calibrating Statistical Tools: Improving the Measure of Humanity's Influence on the Climate." Studies in History and Philosophy of Science **94**: 158–166.

Dethier, C. (2022). "The Unity of Robustness: Why Agreement Across Model Reports Is Just As Valuable As Agreement among Experiments." Erkenntnis

Doyon, R. e. a. (2012). The Jwst Fine Guidance Sensor and Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph (Niriss). Proceedings of the International Society for Optical Engineering.

Doyon, R. e. a. (2023). "The Science Performance of JWST as Characterized in Commissioning." Publications of the Astronomical Society of the Pacific.

Duhem, P. (1914). La Théorie Physique : Son Objet, Sa Structure 2. Paris: M. Rivière, Bibliothèque De Philosophie Expérimentale,.

Eberhardt, F. (2022). "A Contemporary Example of Reichenbachian Coordination." Synthese : An International Journal for Epistemology, Methodology and Philosophy of Science **200**.

Eisenthal, J., and Lydia Patton (2022). "Reichenbach's Empirical Axiomatization of Relativity." Synthese : An International Journal for Epistemology, Methodology and Philosophy of Science **200**.

Elder, J. (2023). Black Hole Coalescence: Observation and Model Validation. Working Toward Solutions in Fluid Dynamics and Astrophysics What the Equations Don't Say. L. P. E. Curiel. Cham, Switzerland, Springer: 79–104.

Elder, J. (2023). On the "Direct Detection" of Gravitational Waves.

Feest, U. (2016). "The Experimenters' Regress Reconsidered: Replication, Tacit Knowledge, and the Dynamics of Knowledge Generation." Studies in History and Philosophy of Science **58**: 34–45.

Franklin, A. (1994). "How to Avoid the Experimenters' Regress." Studies in the History and Philosophy of Science A **25**: 463–491.

Franklin, A. (1997). "Calibration." Perspectives on Science **5**: 31–80.

Friedman, M. (1983). Foundations of Space-Time Theories : Relativistic Physics and Philosophy of Science. Princeton, N.j., Princeton University Press.

Friedman, M. (2001). The Dynamics of Reason. 1999 Kant Lectures at Stanford University. Stanford, CA, CSLI Publications.

Giere, R. N. (2004). "How Models Are Used to Represent Reality." Philosophy of Science **71**: 742–752.

Giordani, A., and Luca Mari (2021). "On Theory Dependence of Truth in Measurement." Perspectives on Science **29** 757–781.

Giovannetti, G. (2018). La théorie coordinative de la connaissance et son lien avec les problèmes épistémologiques de la mesure dans les écrits empiristes-logiques de la première moitié du XXe siècle, Aix-Marseille Université.

Gordon, K. D. e. a. (2022). "The JamesWebb Space Telescope Absolute Flux Calibration Program Design and Calibrator Stars." Cornell University astro-ph.IM.

Hempel, C. (2012). Éléments d'épistémologie. Paris, Armand Colin.

Kenble, E. C. F. B. (1970). Percy Williams Bridgman, 1882 - 1961 A biographical memoir. New York, Columbia University Press.

Laplace, P.-S. d. (1967). Traité De Mécanique Céleste. Bruxelles, Culture et civilisation.

Livengood, J., Adam Edwards (2022). "Calibrating Chromatography: How Tswett Broke the Experimenters' Regress." The British Journal for the Philosophy of Science **73**: 685–710.

Mayo, D. (2005). Evidence as passing severe tests: highly probable versus highly probed hypotheses. Scientific Evidence Philosophical Theories & Applications. P. Achinstein. Baltimore, The Johns Hopkins University Press: 95-127.

Milkov, N., and Volker Peckhaus. (2013). The Berlin Group and the Philosophy of Logical Empiricism. Boston, Dordrecht: Springer.

Morrison, M. (1999). Models as autonomous agents. Models as mediators. M. M. Morgan M. Cambridge, Cambridge University Press: 38-65.

Müller, T. G. e. a. (2023). "Asteroids seen by JWST-MIRI: Radiometric size, distance, and orbit constraints." Astronomy & Astrophysics

Nardiello, D. e. a. (2022). "Photometry and astrometry with JWST -- I. NIRCcam Point Spread Functions and the first JWST colour-magnitude diagrams of a globular cluster." arXiv:2209.06547
Cornell University Ithaca New York

Nardiello, D. e. a. (2023). "Photometry and Astrometry with Jwst-Ii: Nircam Distortion Correction." Astronomische Nachrichten **344**.

Norton, J. D. (2021). The Material Theory of Induction. Calgary, Alberta, University of Calgary Press. .

Ohnesorge, M. (2022). "Pluralizing Measurement: Physical Geodesy's Measurement Problem and Its Resolution." Studies in History and Philosophy of Science **96**: 51–67.

Ohnesorge, M. (2023). "The Epistemic Privilege of Measurement: Motivating a Functionalist Account." Philosophy of Science **1**: 1–16.

Olsson, E. J. (2021). Coherentist Theories of Epistemic Justification. Stanford Encyclopedia of Philosophy. Stanford, CA 94305, Stanford University.

Olsson, E. J. (2022). Coherentism. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press.

Padovani, F. (2011). "Relativizing the Relativized a Priori: Reichenbach's Axioms of Coordination Divided." Synthese : An International Journal for Epistemology, Methodology and Philosophy of Science **181**: 41-62.

Padovani, F. (2015). "Measurement, Coordination, and the Relativized a Priori." Studies in History and Philosophy of Modern Physics: 123–128.

Padovani, F. (2017). Coordination and Measurement: What We Get

Wrong About What Reichenbach Got Right. Selected Papers, European Studies

in Philosophy of Science. M. M. e. al. University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom, Springer. **Epsa15 Selected Papers : The 5th Conference of the European Philosophy of Science Association in Düsseldorf.**: 49–60.

Padovani, F. (2021). From Physical Possibility to Probability and Back Reichenbach's Account of Coordination. Logical Empiricism and the Physical Sciences : From Philosophy of Nature to Philosophy of Physics. S. Lutz, and Adam Tamas Tuboly. Abingdon, Routledge: 336-353.

Parker, W. S. (2017). "Computer Simulation, Measurement, and Data Assimilation." British Journal for the Philosophy of Science **68** 273–304.

Patton, L. (2014). "Hilbert's Objectivity." Historia Mathematica **41**: 188–203.

Patton, L. (2020). "Expanding Theory Testing in General Relativity: Ligo and Parametrized Theories." Studies in History and Philosophy of Modern Physics **69**: 142–153.

Patton, L. (2023). Fishbones, Wheels, Eyes, and Butterflies: Heuristic Structural Reasoning in the Search for Solutions to the Navier-Stokes Equations. Working Toward Solutions in Fluid Dynamics and Astrophysics : What the Equations Don't Say. L. Patton, and Erik Curiel, Springer: 57-77.

Perovic, S. (2017). "Experimenter's Regress Argument, Empiricism, and the Calibration of the Large Hadron Collider." Synthese : An International Journal for Epistemology, Methodology and Philosophy of Science **194**: 313–332.

Peschard, I. F., and Bas C Van Fraassen (2018). The Experimental Side of Modeling. Minneapolis, University of Minnesota Press.

Reichenbach, H. (1958). The Philosophy of Space and Time New York, Dover.

Reichenbach, H. (1965). The Theory of Relativity and a Priori Knowledge. Berkeley, University of California.

Reichenbach, H., and Maria Reichenbach (1969). Axiomatization of the Theory of Relativity. Berkeley, University of California Press.

Rowe, D. E. (2018). A Richer Picture of Mathematics : The Göttingen Tradition and Beyond. Cham, Switzerland, Springer.

Schaffner, K. F. (1969). "Correspondence Rules " Philosophy of Science **36**: 280-290.

Tal, E. (2011). "From data to phenomena and back again: computer-simulated signatures." Synthese : An International Journal for Epistemology, Methodology and Philosophy of Science **182**: 117–129.

Tal, E. (2013). "Old and New Problems in Philosophy of Measurement." Philosophy Compass **8**: 1159–1173.

Tal, E. (2017). "Calibration: Modelling the Measurement Process." Studies in History and Philosophy of Science **65-66**: 33-45.

Tal, E. (2017). A Model-Based Epistemology of Measurement. Reasoning in Measurement. N. a. A. N. Mößner. New York, Routledge: 233–253.

Tal, E. (2019). "Individuating quantities." Springer Nature **176**: 853–878.

Teller, P. (2017). "Modeling Truth." Philosophia : Philosophical Quarterly of Israel **45**: 143–161.

Thagard, P. (2000). Coherence in Thought and Action. Cambridge, Mass., MIT Press.

Thagard, P. (2009). Philosophy of Technology and Engineering Sciences, Elsevier.

Van Fraassen, B. C. (2008). Scientific Representation : Paradoxes of Perspective. Oxford, Clarendon Press.

Van Fraassen, B. C. (2012). "Modeling and Measurement: The Criterion of Empirical Grounding." Philosophy of Science **79**: 773–784.

Yunes Nicolas, a. P. F. (2009). "Fundamental Theoretical Bias in Gravitational Wave Astrophysics and the Parametrized Post-Einsteinian Framework." Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology **80**.