



# Revue du Laboratoire Africain de Démographie et des Dynamiques Spatiales

Numéro 14, Décembre 2025  
(Volume 1)

*“Mieux comprendre l'espace”*

ISSN : 2707-0395

Site web : [www.revuegeovision.laboraddys.org](http://www.revuegeovision.laboraddys.org)

Courriel : [revuegeovision@gmail.com](mailto:revuegeovision@gmail.com)

WhatsApp : +225 07 09 76 62 78

## ADMINISTRATION DE LA REVUE

### Directeur de publication

**MOUSSA Diakité**, Professeur Titulaire, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

### Rédacteur en chef

**LOUKOU Alain François**, Professeur Titulaire, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

### Rédacteur en chef adjoint

**ZAH Bi Tozan**, Maître de Conférences, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

### Secrétariat de rédaction

**DIARRASSOUBA Bazoumana**, Maître de Conférences, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

### Secrétariat administratif et technique

**FOFANA Bakary**, Géographe, Institut de Géographie Tropicale (IGT)/Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan-Côte d'Ivoire)

### Comité scientifique et de lecture

**Pr MOUSSA Diakité**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Pr BÉCHI Grah Félix**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**PhD : Inocent MOYO**, University of Zululand (Afrique du Sud) / Président de la Commission des études africaines de l'Union Géographique Internationale (UGI)

**Pr AFFOU Yapi Simplicie**, Université Félix Houphouët Boigny Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire)

**Pr ALOKO N'guessan Jérôme**, Université Félix Houphouët Boigny Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire)

**Pr ASSI-KAUDJHIS Joseph P.**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Pr BIGOT Sylvain**, Université Grenoble Alpes (France)

**Professor J.A. BINNS**, Géographe, University of Otago (Nouvelle-Zélande)

**Pr BOUBOU Aldiouma**, Université Gaston Berger (Sénégal)

**Pr BROU Yao Téléphore**, Université de La Réunion (La Réunion-France)

**Pr Momar DIONGUE**, Université Cheick Anta Diop (Dakar-Sénégal)

**Pr Emmanuel EVENO**, Université Toulouse 2 (France)

**Pr KOFFI Brou Émile**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Pr KONÉ Issiaka**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Pr Nathalie LEMARCHAND**, Université Paris 8 (France)

**Pr Christof GÖBEL**, Universidad Autonoma Metropolitana (UAM), Mexico/Mexique

**Pr Guénola CAPRON**, Universidad Autonoma Metropolitana (UAM), Mexico/Mexique

**Pr Pape SAKHO**, Université Cheick Anta Diop, (Dakar-Sénégal)

**Pr SOKEMAWU Koudzo Yves**, Université de Lomé (Togo)

**Dr Ibrahim SYLLA**, Université Cheick Anta Diop, (Dakar-Sénégal)

**Pr LOUKOU Alain François**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Pr VEI Kpan Noel**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Pr DIOMANDÉ Béh Ibrahim**, Université Alassane Ouattara (Bouaké- Côte d'Ivoire)

**Dr (MC) ZAH Bi Tozan**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Dr (MC) SORO Nambegue**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Dr (MC) KOFFI Kan Émile**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Dr (MC) ETTIEN Dadjia Zenobe**, Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire)

**Dr (MC) ADJAKPA Tchékpo Théodore**, Université d'Abomey-Calavi (Benin)

**Dr (MC) ABDOULAYE Djafarou**, Université d'Abomey-Calavi (Benin)

## INDEXATIONS INTERNATIONALES



<https://reseau-mirabel.info/revue/17310/Geovision>



<https://aurehal.archives-ouvertes.fr/journal/read/id/150985>



[www.sudoc.fr/241026326](http://www.sudoc.fr/241026326)



TOGETHER WE REACH THE GOAL

Journal details : <http://sjifactor.com/passport.php?id=23386>

✓ *Impact Factor 2025 : 5.46*  
✓ *Impact Factor 2024 : 2.782*  
✓ *Impact Factor 2023 : 3.169*

## INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Dans le souci d'uniformiser la rédaction des communications, les auteurs doivent se référer aux normes du Comité Technique Spécialisé (CTS) de Lettres et Sciences Humaines/CAMES. En effet, le texte doit comporter un titre (Times New Roman, taille 12, Lettres capitales, Gras), les Prénom(s) et NOM de l'auteur ou des auteurs, l'institution d'attache, l'adresse électronique de (des) auteur(s), le résumé en français (250 mots), les mots-clés (cinq), le résumé en anglais (du même volume), les keywords (même nombre que les mots-clés). Le résumé doit synthétiser la problématique, la méthodologie et les principaux résultats. Le manuscrit doit respecter la structure d'un texte scientifique comportant : Introduction (Problématique ; Hypothèse compris) ; Approche méthodologique ; Résultats et Analyse ; Discussion ; Conclusion ; Références bibliographiques. Le volume du manuscrit ne doit pas excéder 15 pages, illustrations comprises. Les textes proposés doivent être saisis à l'interligne 1, Times New Roman, taille 11.

**1. Les titres des sections du texte doivent être numérotés de la façon suivante :** 1. Premier niveau (Times New Roman, Taille de police 12, gras) ; 1.1. Deuxième niveau (Times New Roman, Taille de police 12, gras, italique) ; 1.2.1. Troisième niveau (Times New Roman, Taille de police 11, gras, italique).

**2. Les illustrations :** les tableaux, les cartes, les figures, les graphiques, les schémas et les photos doivent être numérotés (numérotation continue) en chiffres arabes selon l'ordre de leur apparition dans le texte. Ils doivent comporter un titre concis, placé au-dessus de l'élément d'illustration (centré ; taille de police 11, gras). La source (centrée) est indiquée en dessous de l'élément d'illustration (Taille de police 10). Ces éléments d'illustration doivent être annoncés, insérés puis commentés dans le corps du texte.

**3. Notes et références :** 3.1. Éviter les références de bas de pages ; 3.2. Les références de citation sont intégrées au texte citant, selon les cas, ainsi qu'il suit : -Initiale (s) du Prénom ou des Prénoms et Nom de l'auteur, année de publication, pages citées. Exemple : (B. FOFANA, 2021, p.28) ; -Initiale (s) du Prénom ou des Prénoms et Nom de l'Auteur (année de publication, pages citées). Exemple : B. FOFANA (2021, p.28).

**4. La bibliographie :** elle doit comporter : le nom et le (les) prénom (s) de (des) auteur(s) entièrement écrits, l'année de publication de l'ouvrage, le titre, le lieu d'édition, la maison d'édition et le nombre de pages de l'ouvrage. Elle peut prendre diverses formes suivant le cas :

- *pour un article* : LOUKOU Alain François, 2012, « La diffusion globale de l'Internet en Côte d'Ivoire. Évaluation à partir du modèle de Larry Press », in *Netcom*, vol. 19, n°1-2, pp. 23-42.

- *pour un ouvrage* : HAUHOUOT Asseyo Antoine, 2002, *Développement, aménagement, régionalisation en Côte d'Ivoire*, EDUCI, Abidjan, 364 p.

- *un chapitre d'ouvrage collectif* : CHATRIOT Alain, 2008, « Les instances consultatives de la politique économique et sociale », in Morin, Gilles, Richard, Gilles (dir.), *Les deux France du Front populaire*, Paris, L'Harmattan, « Des poings et des roses », pp. 255-266.

- *pour les mémoires et les thèses* : DIARRASSOUBA Bazoumana, 2013, *Dynamique territoriale des collectivités locales et gestion de l'environnement dans le département de Tiassalé*, Thèse de Doctorat unique, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 489 p.- *pour un chapitre des actes des ateliers, séminaires, conférences et colloque* : BECHI Grah Felix, DIOMANDE Beh Ibrahim et GBALOU De Sahi Junior, 2019, Projection de la variabilité climatique à l'horizon 2050 dans le district de la vallée du Bandama, Acte du colloque international sur « *Dynamique des milieux anthropisés et gouvernance spatiale en Afrique subsaharienne depuis les indépendances* » 11-13 juin 2019, Bouaké, Côte d'Ivoire, pp. 72-88

- Pour les documents électroniques : INS, 2010, *Enquête sur le travail des enfants en Côte d'Ivoire*. Disponible à : [http://www.ins.ci/n/documents/travail\\_enfant/Rapport%202008-ENV%202008.pdf](http://www.ins.ci/n/documents/travail_enfant/Rapport%202008-ENV%202008.pdf), consulté le 12 avril 2019, 80 p.

### Éditorial

Comme intelligence de l'espace et savoir stratégique au service de tous, la géographie œuvre constamment à une meilleure compréhension du monde à partir de ses approches et ses méthodes, en recourant aux meilleurs outils de chaque époque. Pour les temps modernes, elle le fait à l'aide des technologies les plus avancées (ordinateurs, technologies géospatiales, à savoir les SIG, la télédétection, le GPS, les drones, etc.) fournissant des données de haute précision sur la localisation, les objets et les phénomènes. Dans cette quête, les dynamiques multiformes que subissent les espaces, du fait principalement des activités humaines, offrent en permanence aux géographes ainsi qu'à d'autres scientifiques des perspectives renouvelées dans l'appréciation approfondie des changements opérés ici et là. Ainsi, la ruralité, l'urbanisation, l'industrialisation, les mouvements migratoires de populations, le changement climatique, la déforestation, la dégradation de l'environnement, la mondialisation, etc. sont autant de processus et de dynamiques qui modifient nos perceptions et vécus de l'espace. Beaucoup plus récemment, la transformation numérique et ses enjeux sociaux et spatiaux ont engendré de nouvelles formes de territorialité et de mobilité jusque-là inconnues, ou renforcé celles qui existaient au préalable. Les logiques sociales, économiques et technologiques produisant ces processus démographiques et ces dynamiques spatiales ont toujours constitué un axe structurant de la pensée et de la vision géographique. Mais, de plus en plus, les sciences connexes (sciences sociales, sciences économiques, sciences de la nature, etc.) s'intéressent elles aussi à l'analyse de ces dynamiques, contribuant ainsi à l'enrichissement de la réflexion sur ces problématiques. Dans cette perspective, la revue *Géovision* qui appelle à observer attentivement le monde en vue de mieux en comprendre les évolutions, offre aux chercheurs intéressés par ces dynamiques, un cadre idéal de réflexions et d'analyses pour la production d'articles originaux. Résolument multidisciplinaire, elle publie donc, outre des travaux géographiques et démographiques, des travaux provenant d'autres disciplines des sciences humaines et naturelles. *Géovision* est éditée sous les auspices de la Commission des Études Africaines de l'Union Géographique Internationale (UGI), une instance spécialement créée par l'UGI pour promouvoir le débat académique et scientifique sur les enjeux, les défis et les problèmes spécifiques de développement à l'Afrique. La revue est semestrielle, et paraît donc deux fois par an (en anglais et en français).

La rédaction

## AVERTISSEMENT

Le contenu des publications n'engage que leurs auteurs. La Revue Géovision ne peut, par conséquent, être tenue responsable de l'usage qui pourrait en être fait.

**SOMMAIRE**

LE TRANSPORT CLANDESTIN DE VOYAGEURS D'ABIDJAN VERS LE MALI ET LE BURKINA FASO SUITE À LA COVID-19, <b>YAO Beli Didier</b> .....	11
GESTION DURABLE DES TERRES EN MILIEU RURAL AU BENIN : CAS D'UNE EVALUATION FINANCIERE DE LA LUTTE CONTRE LA DEGRADATION DES TERRES AGRICOLES, <b>Alfred Bothé Kpadé DOSSA</b> .....	22
DYNAMIQUE DU SECTEUR INFORMEL ET OCCUPATION ANARCHIQUE DES ESPACES UNIVERSITAIRES DE BADALABOUGOU EN COMMUNE V/BAMAKO (MALI), <b>Abdou BALLO<sup>1</sup>, Charles SAMAKE<sup>2</sup></b> .....	36
INFLUENCE DES COLONATS AGRICOLES SUR LES DYNAMIQUES ECONOMIQUE ET SOCIALE AUX FRONTIERES BENINO-NIGERIANES: CAS DE LA COMMUNE DE TCHAOUROU AU BENIN, <b>M'po Abraham KOUAGOU N'TCHA<sup>1</sup>, Comlan Julien HADONOU<sup>2</sup></b> .....	49
REPRESENTATIONS SOCIO-CULTURELLES DE LA MALADIE ET DE LA SANTE CHEZ LES POPULATIONS RURALES BAOULE DE DJEBONOUA ET BETE DE DALOA : CAS DU PALUDISME EN COTE D'IVOIRE, <b>Kouakou Luc N'GOTTA<sup>1</sup>, Kassi Joseph KOUAME<sup>2</sup>, Koffi Dermane KOUAKOU<sup>3</sup>, Salifou YEO<sup>4</sup></b> .....	65
LA PRODUCTION DE L'ARACHIDE, UN EXEMPLE DE L'AUTONOMISATION DE LA FEMME DANS LA SOUS-PREFECTURE DE KOLIA (NORD DE LA COTE D'IVOIRE), <b>KONE Basoma<sup>79</sup></b>	
LE REMBLAYAGE ET L'OCCUPATION DES SITES MARECAGEUX DANS L'ESPACE URBAIN DE DALOA (CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE) <b>Kokou Gilles Mawéna EKLOU<sup>1</sup>, Djédjé Eric PREGNON<sup>2</sup></b> .....	95
LA GOUVERNANCE LOCALE À L'ÉPREUVE DE LA GESTION DU POUVOIR PAR LE RÉGIME MILITAIRE AU NIGER, <b>WADA Nafiou</b> .....	108
LES DEUX TRAITÉS DE LA MISSION BRITANNIQUE DE 1817 À KUMASI : ANALYSES ET CRITIQUES, <b>SECRE Kouamé Kossonou Frédéric</b> .....	120
LES FINAGES DU BASSIN ARACHIDIER OCCIDENTAL, UNE FABRIQUE DIFFÉRENTIELLE DE L'AUTOROUTE ILA TOUBA, <b>Abdoulaye DIAGNE</b> .....	134
ÉVALUATION SPATIALE DES DYNAMIQUES COTIÈRES EN CASAMANCE : CAS DE CARABANE, DIOGUE ET GNIKINE, <b>ABDOURAHMANE BA<sup>1</sup> ; AMY DIEDHIOU<sup>2</sup> ; ELHADJI ABDOU KARIM KEBE<sup>3</sup></b> .....	145
MARCHE INFORMEL DES MÉDICAMENTS : ACTEURS, LOGIQUES ET STRATÉGIES DANS LA COMMUNE URBAINE DE SIGUIRI, RÉPUBLIQUE DE GUINÉE, <b>Sidiki KOUROUMA<sup>1</sup>, Véronique Vilgué KOIVOGUI<sup>2</sup></b> .....	160
VULGARISATION DE LA GÉOGRAPHIE DES NUISANCES SONORES : UN LEVIER POUR REINVENTER LES SCIENCES SOCIALES EN COTE D'IVOIRE, <b>KONE Tintcho Assetou épse BAMBA</b> .....	175
CONTRIBUTION DE LA GÉOLOCALISATION DES AIRES CACAOYÈRES DANS LA RATIONALISATION DES PAYSAGES FORESTIERS DANS LA SOUS-PRÉFECTURE DE BUYO	

(SUD-OUEST DE CÔTE D'IVOIRE), <sup>1</sup> <b>KOUASSI Yao Dieudonné, KOFFI Kouadio Achille, YAO Kouamé Anicet</b> .....	188
IDENTIFICATION DES FACTEURS D'AUGMENTATION DU PRIX DU PAIN DE MANIOC SUR LE MARCHÉ DE KINTELE (REPUBLIQUE DU CONGO), <b>LINGUIONO Chelmyh Duplosin<sup>1</sup>, MAMA YACOBOW Aboudou Ramanou<sup>2</sup></b> .....	201
FACTEURS DE LA DYNAMIQUE DEMOGRAPHIQUE DE LA VILLE DE SAN-PEDRO (SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE), <b>KOUAKOU Yao Stanislas<sup>1</sup>, WADJA Jean-Bérenger<sup>2</sup></b> .....	214
IMPACT MONÉTAIRE DE LA DÉGRADATION DES SOLS DES MÉNAGES AGRICOLES DANS L'ARRONDISSEMENT DE NATITINGOU IV (BENIN) <b>YATOPA Watoupé Thierry <sup>1</sup> &amp; DOSSA Alfred Bothé Kpadé<sup>2</sup></b> .....	228
VULNÉRABILITE À L'ÉROSION HYDRIQUE DE LA SOUS-PRÉFECTURE DE GAMBOMA DANS LE CENTRE DU CONGO, <b>Léonard SITOU</b> .....	243
DISPARITE ET DETERMINANTS DE L'APPROVISIONNEMENT EN EAU DES POPULATIONS DE LA VILLE DE BOUAKE (COTE D'IVOIRE), <b>Lhey Raymonde Christelle PREGNON</b> .....	258
STRATÉGIES D'ADAPTATION DES PAYSANS EN CÉRÉALICULTURE FACE AUX EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS L'EX-CERCLE DE KITA AU MALI, <b><sup>1</sup>Arouna DEMBELE, <sup>2</sup>Issa FOFANA, <sup>3</sup>Samba Mamadou SIDIBE</b> .....	275
IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES DE L'ELEVAGE DE PINTADES DANS LA SOUS-PREFECTURE DE NIOFOIN (NORD DE LA COTE D'IVOIRE), <b><sup>1</sup>KOUAME Kanhoun Baudelaire, <sup>2</sup>TRAORE Oumar, <sup>3</sup>YOMAN N'goh Koffi Michael</b> .....	289
REGRESSION DU LAC DE KOSSOU ET DYNAMIQUE DE RECOLONISATION DES ANCIENS SITES PAR LES POPULATIONS DEPLACÉES DANS LE DÉPARTEMENT DE BEOUMI : UNE LECTURE GEOGRAPHIQUE DES MUTATIONS SOCIO-TERRITORIALES APRES BARRAGE, <b>Kouamé Thierry GOLI<sup>1</sup>, Zié Doklo TRAORÉ<sup>2</sup>, Kouamé Sylvestre KOUASSI<sup>3</sup></b> .....	300
L'ENCLAVEMENT FONCTIONNEL COMME CONTRAINTE A LA DYNAMIQUE DE L'ECONOMIE AGRICOLE DANS LA SOUS-PREFECTURE DE BONON, <b>KOFFI Guy Roger Yoboué<sup>1</sup>, N'GUESSAN N'Guessan Francis<sup>2</sup>, KOUASSI Konan<sup>3</sup></b> .....	313
INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DE MASSE ET PRATIQUES DE MOBILITE DANS LES METROPOLES DES SUDS : CAS DU BUS RAPID TRANSIT (BRT) À DAKAR (SENEGAL), <b>Malick NDIAYE<sup>1</sup>, Awa FALL<sup>2</sup></b> .....	329
MIGRANTES ET MIGRATIONS EN CÔTE D'IVOIRE : UNE APPROCHE ANALYTIQUE VIA LES PROFILS ET LES RESEAUX À DALOA ET À ANYAMA, <b>Talibet Kouacou Yves-Rhodrigue KONAN</b> .....	344
ÉFFET DE LA PRATIQUE DE L'EPS SUR LES ELEVES EN DIFFICULTES SCOLAIRES COMME MOYEN D'INTEGRATION SOCIALE EN REPUBLIQUE DU CONGO, <b>Audibert Fargean BANCKETH KODIA<sup>1</sup>, Paulin MANDOUMOU<sup>2</sup> et Pascal Alain LEYINDA<sup>3</sup></b> .....	357
SCIENCE ET ETHIQUE : VERS UN RETOUR DES MORALES OBJECTIVES, <b>TUO Zié Emmanuel</b> .....	369

REPRÉSENTATIONS ET ATTITUDES DES POPULATIONS DE SICOGI-MARCHÉ (YOPOUGON) FACE À LA COVID-19, <sup>1</sup> AKPOUE Adjoua Marie Charlotte, <sup>2</sup> NOTE Chantal, <sup>3</sup> N'GUESSAN Kassi Sinaï,.....	379
LES LAVERIES PRIVÉES DE VÉHICULES DANS LE CENTRE ET LE PÉRICENTRE DE LIBREVILLE : DE L'EXPLOSION DE L'OFFRE A LA DIFFICULTÉ DE CIRCULER VERS LE CENTRE-VILLE, <u>Guy Obain</u> BIGOUMOU MOUNDOUNGA .....	388
DE L'EFFICACITÉ DES MATHÉMATIQUES EN PHYSIQUE, <u>Fampiémin SORO</u> <sup>1</sup> , <u>Péson SORO</u> <sup>2</sup> .....	399
DÉTERMINANTS DE LA FAIBLE AUTONOMISATION FINANCIÈRE DES FEMMES RURALES DU DÉPARTEMENT DE DABOU, <u>Mawa TOURÉ</u> <sup>1</sup> , <u>Maxime YAPI</u> <sup>2</sup> , <u>Joseph P. ASSI-KAUDJHIS</u> <sup>3</sup> .....	408
MIGRATIONS CLIMATIQUES ET RECOMPOSITIONS SOCIO-TERRITORIALES : LES DEPLACEMENTS POST SECHERESSES DE 1973 AUTOUR DU SYSTÈME FAGUIBINE ET L'EMERGENCE DU VILLAGE MULTI-COMMUNAUTAIRE D'EHELL (LAC HORO), REGION DE TOMBOUCTOU, <u>Mahamadou ABOCAR</u> <sup>1</sup> * <u>Abdoulkadri Oumarou Touré</u> <sup>2</sup> , <u>Modibo Tangara</u> <sup>3</sup> , <u>Mahamane Alboukader</u> <sup>4</sup> .....	423
LES USAGES COMMUNAUTAIRES DES RESSOURCES FLORISTIQUE ET FAUNIQUE DE QUELQUES FORETS SACREES DES DEPARTEMENTS DU L'OUEME ET DU PLATEAU (BENIN, AFRIQUE DE L'OUEST), <u>Romarc Iralè EHINNOU KOUTCHIKA</u> <sup>1</sup> et * .....	438
ANALYSE DE LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES AGRICOLES FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE SYSTÈME FAGUIBINE, RÉGION DE TOMBOUCTOU, <u>Mahamane ALBOUKADER</u> <sup>1</sup> , <u>Seydou MARIKO</u> <sup>2</sup> , <u>Mahamadou ABOCAR</u> <sup>3</sup> .....	452

## DE L'EFFICACITÉ DES MATHÉMATIQUES EN PHYSIQUE

Fampiémin SORO<sup>1</sup>, Péson SORO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>École Normale Supérieure (Abidjan-Côte d'Ivoire), sfampiemin@yahoo.fr

<sup>2</sup>École Normale Supérieure (Abidjan-Côte d'Ivoire), soropeson@gmail.com

*(Reçu le 10 octobre 2025 ; Révisé le 20 octobre 2025 ; Accepté le 25 novembre 2025)*

### Résumé :

Quelles sont les raisons qui expliquent l'efficacité des mathématiques en physique ? Qu'est-ce qui légitime la relation intime entre la physique et les mathématiques ? Telles sont les questions que nous nous proposons d'analyser dans la présente contribution. À Partir des méthodes historico-critique et herméneutique, nous sommes parvenus à l'idée que la physique utilise les mathématiques pour exprimer les lois de la nature dans un langage dénué de toutes ambiguïtés. Par ailleurs, elle s'en sert pour unifier des entités, en apparence, contradictoires, pour découvrir des théories physiques et pour prédire le comportement et l'existence d'objets physiques.

**Mots-Clés :** Expérience, Mathématique, Méthode, Physique, Raison.

### Abstract:

What explains the effectiveness of mathematics in physics? What justifies the close relationship between physics and mathematics? These are the questions we propose to analyze in this contribution. Using historical-critical and hermeneutic methods, we have arrived at the idea that physics uses mathematics to express the laws of nature in a language devoid of all ambiguity. Furthermore, it uses mathematics to unify seemingly contradictory entities, to discover physical theories, and to predict the behavior and existence of physical objects.

**Keywords:** Experiment, Mathematics, Method, Physics, Reason

### Introduction

Les mathématiques sont une discipline qui fait partie intégrante de la grande famille des sciences formelles, qu'elle occupe conjointement avec la logique. Considérées comme une science ayant « pour objet le nombre, l'ordre (numérique), ou l'étendue », (A. Lalande, 2013, p. 595), les mathématiques tentent de comprendre et d'expliquer les formes, les nombres et les relations qui existent entre ces êtres mathématiques. Elles étudient les propriétés des figures, celles des nombres et elles permettent de faire des calculs ou des opérations. Les mathématiques sont une discipline qui relève essentiellement de l'abstraction. Ces abstractions sont représentées par des symboles dont l'articulation ou la mise en relation de ceux-ci, engendre d'autres abstractions, et ainsi de suite. « Les mathématiques traitent exclusivement des relations des concepts entre eux, sans considérer leurs relations avec l'expérience » (A. Einstein, 2016, p. 107). Entendons par là, qu'elles portent leurs réflexions sur des réalités intelligibles dont la mise en contact avec la réalité concrète semble parfois problématique. De ce fait, les mathématiques, dans leur volonté de tout quantifier semblent se détourner de la réalité.

Or, lorsque nous jetons un regard attentif sur l'évolution de la physique, nous remarquons que les mathématiques y occupent une place de choix. Elles sont présentes dans la physique, car elles représentent pour ladite discipline un instrument efficace dans le processus d'expression et de découverte des théories. Dans un processus d'échange mutuel, la physique confèrent aux concepts mathématiques un contenu empirique, tout en se souciant t'établir une connexion solide entre ces

concepts et le réel. Cela démontre d'une intimité entre la physique et les mathématiques, dont une analyse philosophique permettra d'en saisir les principes fondateurs.

La physique est une discipline scientifique qui fait partie des sciences de la nature et des sciences expérimentales. Elle est une discipline scientifique qui vise la compréhension et l'explication des phénomènes de la nature. Elle étudie, formalise et modélise les phénomènes de la nature dans leurs retranchements les plus reculés : l'infiniment grand, l'infiniment petit et l'infiniment complexe. Dans son processus d'investigation, la physique utilise la méthode expérimentale tout en incluant des modèles mathématiques, représentant des outils de formalisation et de prédiction des théories physiques. Dès lors, quelles sont les raisons qui expliquent cette efficacité des mathématiques en physique ? Qu'est-ce qui légitime cette relation intime entre la physique et les mathématiques ? La réponse à ces questions nécessite pour nous, l'utilisation des méthodes herméneutique et historico-critique. Elles nous aideront à montrer les raisons de cette efficacité des mathématiques en physique. Pour ce faire, nous présenterons d'abord les mathématiques comme langage et principe unificateur pour la physique. Ensuite, nous poursuivrons et terminerons en mettant en relief la puissance créatrice des mathématiques en physique.

## **1. Les mathématiques, moyen d'expression et d'unification en physique**

Dans ce pan de notre analyse, il s'agira de présenter l'idée que la physique utilise les mathématiques dans le but de formaliser les lois de la nature et pour unir des entités naturelles en apparence contradictoires.

### ***1.1. Les mathématiques, langage de la physique***

Lorsque nous remontons à l'histoire des idées en physique, Galilée est présenté comme le père de la physique moderne voire de la physique mathématique. Car, il fut le premier à rompre avec le procédé aristotélicien qui consistait à découvrir et interpréter les phénomènes de la nature grâce à la puissance exclusive des organes de sens. À l'instar de Platon qui pose les mathématiques comme la propédeutique pour accéder aux Formes en soi, Galilée estime que les mathématiques sont l'instrument nécessaire pour saisir le mode de fonctionnement de la nature. Car, estime-t-il, l'univers est d'essence mathématique. « La philosophie est écrite dans ce livre immense perpétuellement ouvert devant nos yeux (je veux dire : l'Univers), mais on ne peut le comprendre si l'on n'apprend pas d'abord à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique (...) » (Galilée 1979, p. 141). Pour Galilée, l'univers n'a rien d'illisible et d'incompréhensible. Sa compréhension exige la connaissance de la langue dans laquelle elle se manifeste. Et, celle-ci est le langage mathématique. Par conséquent, une maîtrise judicieuse du langage mathématique s'impose comme condition sine qua non pour une intellection substantielle de la nature.

La paternité de la mathématisation de la physique accordée à Galilée n'est pas fondée sur des affirmations gratuites ou des opinions. En effet, Galilée, mathématicien et physicien pisan se revendiquait archimédien et platonicien. Dans cette perspective il s'oppose à Aristote qui se contente d'interpréter l'univers par le canal des organes de sens et de la logique. Pour Galilée, ces procédés aristotéliciens sont porteurs d'erreurs et de contradictions internes. Il est donc nécessaire de s'affranchir des sens au profit de la raison. Car, au-delà des propriétés sensibles ou inessentiels des objets se trouvent leurs véritables propriétés que nous ne pouvons appréhender que par la médiation de la pensée. Ce procédé d'investigation a pour objectif de mettre en place la physique mathématique qui est, dans une certaine mesure, la restauration de la vision platonicienne. « En mathématisant la physique, il traduit les observations sensibles en système platonicien plus adapté à ses nouvelles théories », B. Tyburce (2015, p. 55). La physique mathématique de Galilée est plus en accord avec le système platonicien qui pose la réalité des choses au-delà de l'univers sensible. Tout comme Platon, pour Galilée, chaque phénomène sensible possède une véritable réalité que seule la raison pourrait découvrir.

Cet accord du système galiléen avec celui de Platon se perçoit selon leur manière commune de rendre compte de la réalité sensible. Cela dit, Platon ne nie aucunement l'existence des choses sensibles. Elles existent dans le monde sensible. Nous entrons en contact avec elles grâce à nos organes de sens. Mais, la parfaite connaissance et l'explication de ces réalités empiriques exigent l'usage des réalités

intelligibles présentes dans un autre monde, le monde des Idées. Autrement dit, Platon explique le monde sensible par la médiation du monde des Idées. S'inspirant du monde des Idées de Platon, Galilée pose, au-delà de la réalité sensible, une réalité mathématique qui lui permet de rendre compte véritablement de la sensibilité. Selon B. Tyburce, « Par son invention de la physique mathématique, il explique le visible empirique par un invisible mathématique » (2015, p. 38). Cet invisible mathématique, à l'instar des Formes en soi de la philosophie platonicienne, permet une parfaite connaissance du mode de fonctionnement des phénomènes de la nature. Car, la nature, elle-même, est d'essence mathématique.

Dans la mise en place de sa nouvelle physique mathématique, Galilée veut supprimer du champ de la physique le mathématisme sur lequel se fondait la physique avant lui. La physique d'Aristote et de Ptolémée était fondée sur un mathématisme dont le seul objectif était de sauver le mouvement apparent des corps célestes. Dans cette perspective, ils utilisaient des cercles afin d'y adapter le mouvement des étoiles de sorte que, les calculs correspondent à ces structures, tout en étant en accord avec ces apparences. Pour Galilée, ce mathématisme est vide. Car, il ne se souciait pas de certains désaccords que l'on pourrait rencontrer dans la nature. Il est donc impératif de l'exclure du champ de sa nouvelle physique mathématique. E. Namer (1964, p. 370) montre que « Galilée ne voulait plus de ce mathématisme à vide, qui semblait sans rapport avec la réalité ». En d'autres termes, Galilée veut certes un mathématisme, mais un mathématisme en accord avec la réalité, un mathématisme qui n'envisage aucune ligne de démarcation avec l'expérience.

Ce dialogue que Galilée initie entre les mathématiques et l'expérience est le signe de leur collaboration, de leur aide mutuelle dans la recherche de la vérité en science physique. Dans cette optique, ni les mathématiques prises individuellement, ni l'expérimentation prise seule n'ont la possibilité de revendiquer le droit de statuer sur la vérité en physique comme en astronomie. « Le dialogue établit entre l'expérience et les mathématiques, supposait un échange continu entre les faits et leur intelligibilité, sans que ni l'expérience seule, ni les mathématiques séparées ne peuvent s'arroger le droit de décider isolement de la valeur de la connaissance », E. Namer, (1964, p. 371). En d'autres termes, puisque ce sont les mathématiques qui confèrent aux faits leur intelligibilité, il va de soi que la vérité en physique résulte d'une conjugaison entre les mathématiques et l'expérience. En sorte que l'expérience sans les mathématiques est aveugle et les mathématiques sans l'expérience restent vides.

De plus, les mathématiques permettent la transcendance de la connaissance. Elles favorisent le passage de la connaissance de l'empirisme à l'intelligibilité. Cependant cette intelligibilité qu'acquiert la connaissance n'est pas parfaite et éternelle. Bien au contraire, elle est perfectible et peut connaître une remise en cause. C'est pour montrer cette intelligibilité que confèrent les mathématiques à la connaissance qu'E. Namer stipule que : « L'étude des questions naturelles, sans cette rigueur géométrique, maintient la connaissance à un stade empirique et dépourvue de valeur générale et nécessaire » (1964, p. 374). Les réflexions sur la nature nécessitent les mathématiques, en raison de leur rigueur et de la valeur intelligible qu'elles confèrent aux connaissances. Le langage mathématique accorde donc une valeur générale et nécessaire aux savoirs sur la nature.

L'intelligibilité mathématique dont il s'agit, ne préexiste pas aux faits. Elle n'est pas leur essence ou leur nature transcendantale. L'intelligibilité mathématique est le langage approprié et adéquat permettant l'expression des connaissances sur la nature sous forme de lois mathématiques. « L'étude de la nature était inséparable d'un langage approprié, sans ambiguïté, c'est-à-dire celui de la géométrie » (E. Namer, 1964, p. 374). Le langage ordinaire est pauvre, porteur de confusions et de préjugés. Il ne serait donc pas approprié pour traduire la vérité sur la nature. Le langage mathématique au contraire est riche, clair, simple et sans ambiguïté. Ainsi, il est celui de la nature et approprié comme outil d'expression des lois de la nature. Dès lors, qu'en est-il de la puissance unificatrice des mathématiques en physique ?

### ***1.2. Les mathématiques, principe unificateur en physique***

Au-delà de sa capacité à exprimer les lois de la nature, les mathématiques permettent à la physique de réunir des entités ou des phénomènes qui seraient, par nature, contradictoires. Cette capacité

unificatrice des mathématiques en physique fut, pour la première fois, élaborée et présentée par le physicien britannique Isaac Newton. Né en 1642, l'année de décès de Galilée, Newton a permis l'aboutissement de la vision mathématique de la physique classique. Cela s'explique par le fait que Newton a utilisé le langage mathématique pour non seulement traduire les phénomènes de la nature, mais aussi pour réaliser des prédictions. Ainsi, Newton parachève la vision mathématique de la mécanique classique, initiée par Galilée. C'est pourquoi, B. Tyburce affirme : « Newton achève le processus de mathématisation initié par Galilée » (2015, p. 159). En d'autres termes, avec Newton, la science physico-mathématique mise au point par Galilée acquiert une certaine maturité. Car, elle présente une vision mécanique de l'Univers fonctionnant comme un système.

En 1687, Newton publie un ouvrage intitulé *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Le titre de l'ouvrage en dit long sur son contenu qui est essentiellement mathématique. Dans son ouvrage, Newton met le langage mathématique au service de la physique. Car, pour lui, toutes ses découvertes doivent se traduire en langage mathématique. Dans cette logique, il permet à la physique initiée par Galilée de devenir un monument architectural tant et si bien qu'il use des mathématiques pour confirmer et démontrer les principales idées de Galilée. Ce livre de Newton présente ses travaux en mécanique et leur application au mouvement des corps célestes. Il y expose sa célèbre formule de la gravitation universelle, en l'occurrence :  $f_g = \frac{GmM}{r^2}$ . Soulignons que,  $f_g$  est la force de la gravitation,  $G$  une constante gravitationnelle,  $m$  la masse du premier corps, et  $M$  la masse du second corps, et  $r$  la distance qui sépare leurs centres. Elle stipule que la force gravitationnelle est égale au produit de la constante gravitationnelle par la masse du premier corps, par la masse du second corps, divisé par le carré inverse de la distance qui sépare les deux corps. Grâce à cette célèbre formule, Newton remplace l'Univers hiérarchisé d'Aristote par un Univers homogène soumis à une loi universelle. La physique devient, donc, un système bien structuré et harmonieux, grâce à la puissance unificatrice des mathématiques.

La loi de la gravitation découverte par Isaac Newton ne s'applique pas seulement aux planètes. Elle est valable pour le mouvement de tous les corps dans l'univers, parce que, c'est la même loi gravitationnelle qui permet à la Lune, un satellite de la Terre, de rester sur son orbite, et à un corps quelconque de tomber. F. Daninos peut alors soutenir que : « C'est la même attraction universelle qui entraîne la chute d'une pomme ou maintient la Lune en orbite » (2015, p. 46). La gravitation universelle est la cause du mouvement orbital de la Lune et la chute de la pomme. Elle permet de rendre compte avec précision de tous les mouvements des corps que nous observons dans le ciel.

Selon la vision mécanique de l'univers, initiée par Galilée et parachevée par Newton, tous les phénomènes de la nature peuvent se traduire en termes de particules et de forces qui agissent le long de la ligne droite reliant le centre des deux corps. Cette conception mécanique sera ébranlée par les expériences et des investigations réalisées sur le magnétisme et l'électricité. Après la découverte du champ magnétique par le physicien danois Hans Christian Ørsted en 1819 et du champ électrique par le physicien Britannique Michael Faraday en 1831, James Clerk Maxwell est reconnu, dès 1865, pour celui qui parvint à unifier les théories partielles de l'électricité et du magnétisme, grâce au pouvoir unificateur des mathématiques. Après de nombreuses réflexions et recherches, Maxwell put écrire les quatre équations mathématiques qui montrent l'interdépendance du champ électrique et magnétique. « Maxwell démontra mathématiquement que ces forces électrique et magnétique ne proviennent pas de particules agissant les uns sur les autres, mais plutôt de ce que toute charge et tout courant électrique crée un champ dans l'espace l'environnant, champ qui exerce une force sur toute autre charge et tout courant situés dans cet espace » S. Hawking, (2009, p. 51). Les mathématiques permettaient à Maxwell d'unir les théories de l'électricité, du magnétisme et de l'optique. Il montre aussi que les actions réciproques des forces électriques et magnétiques ne sont possibles, selon ses équations, que par la médiation d'un champ. Par ailleurs, les mathématiques n'auraient-elles pas un pouvoir créateur en physique ?

## 2. Du pouvoir créateur des mathématiques en physique

Il s'agira, ici, de mettre en évidence la capacité des mathématiques à permettre aux physiciens de découvrir des théories et des phénomènes physiques.

### *2.1. Les mathématiques au cœur de la découverte et de la création des théories physiques*

Dans le processus de création et de découverte des théories, les physiciens utilisent les mathématiques pures, fondées sur un niveau d'abstraction très élevé. Celles-ci utilisent une méthode fondée sur le raisonnement sans aucun rapport avec les données empiriques. Dans le nouvel esprit scientifique qui commence en 1905, avec la découverte de la théorie de la relativité restreinte par Albert Einstein, les mathématiques pures y sont utilisées non pas comme un instrument pour appréhender la réalité, mais comme un moyen de création et de découverte. La valeur créatrice des mathématiques se justifie non seulement par leurs capacités à créer les concepts et les principes fondamentaux d'une théorie, mais aussi par son aptitude à découvrir une théorie physique. C'est pourquoi, A. Einstein justifie la puissance créatrice des mathématiques en ces termes : « Le principe fondamentalement créateur se trouve dans la mathématique » (2009, p. 173). Einstein affirme ainsi la valeur créatrice des mathématiques. Car, de toutes les disciplines constituées, les mathématiques sont les seules dont la grandeur réside en leur capacité à construire l'édifice harmonieux d'une théorie physique. Cette puissance créatrice des mathématiques est tributaire d'une autre de leur qualité, la simplicité.

Les mathématiques ont une puissance créatrice très élevée dans la mesure où, elles ont cette capacité de simplification des phénomènes de la nature. En effet, pour représenter un phénomène naturel, le physicien peut utiliser parfois un symbole mathématique. La manipulation de ce symbole mathématique en accord avec d'autres symboles permet de parvenir à une intelligence du phénomène en question. Les mathématiques simplifient donc le fait naturel. C'est pour soutenir cette idée qu'A. Einstein martèle que : « La nature représente ce que nous pouvons imaginer en mathématique comme le plus simple » (2009, p. 173). Selon Einstein, les mathématiques ont un rôle de simplification des phénomènes de la nature. Ainsi, la simplicité que confèrent les mathématiques aux phénomènes physiques est d'une grande importance pour la compréhension dudit phénomène. Car, une bonne théorie est celle qui jouit d'une certaine simplicité.

Au regard de cette valeur créatrice des mathématiques, Einstein estime que leur méthode doit être celle du physicien théoricien en général, et en particulier, celle dont il doit se servir pour parvenir à son désir de créer une théorie nouvelle et révolutionnaire. La méthode des mathématiques que le théoricien de la physique doit faire sienne est celle qui consiste à poser les postulats d'une théorie et par raisonnement d'en faire une déduction. « La méthode du théoricien implique qu'il utilise comme base dans toutes ses hypothèses ce qu'on appelle des principes, à partir desquels il peut déduire des conséquences », A. Einstein (2009, p. 169). Selon la vision einsteinienne, la méthode du physicien, qui est principalement une méthode mathématique, se décline en une double tâche. La première consiste à rechercher les postulats qui constituent les bases axiomatiques de la théorie. Et, la seconde consiste à tirer les conséquences qui en résultent.

Pour montrer sa fidélité à la méthode mathématique, Einstein montre qu'elle doit être la boussole qui servira de repère au physicien dans l'accomplissement de cette première tâche, qui est la recherche des fondements axiomatiques de la théorie. Pour Einstein, bien qu'il n'existe aucune méthode permettant d'y parvenir, le physicien doit à l'instar des mathématiques se servir de l'intuition. Les concepts et les lois qui forment les bases axiomatiques de la théorie sont construits de façon intuitive, sans aucun rapport avec l'expérience sensible. Il écrit à ce propos : « Et d'ailleurs, ces concepts et ces principes se découvrent comme des inventions spontanées de l'esprit humain » A. Einstein (2009, p. 170). Les concepts et les principes fondamentaux sont des constructions mathématiques tant et si bien qu'ils sont construits intuitivement et parallèlement aux données expérimentales. Aussi, leur structure est-elle mathématique.

Pour ce qui relève de la seconde tâche du théoricien de la physique, celle de déduire les conséquences de ses postulats posés, cette construction est mathématique. Cela dit, l'élaboration des

conséquences qui résultent de ses bases axiomatiques exige pour le physicien une construction mathématique. Elle consiste à partir d'une déduction pure entendue comme un raisonnement inlassable dans lequel nous trouvons parfois des expériences et des exemples imaginaires. C'est pour justifier cette idée qu'A. Einstein martèle que « il ne manquera pas de réussir par un travail de raisonnement persévérant » (2009, p. 163). Cette persévérance du raisonnement, pour parvenir à la déduction des conséquences découlant des postulats, est une construction mathématique dont la tâche est de découvrir ou créer les déductions afférentes aux postulats de départ.

L'élaboration des principes étant la première tâche du physicien, la théorie de la relativité d'Einstein peut être considérée comme une théorie à principe. Il est possible de ranger les théories physiques selon deux classes distinctes. Nous avons d'une part les théories constructives et d'autre part les théories à principe. Les théories constructives utilisent la méthode synthétique. Elle consiste à simplifier la complexité des phénomènes en un formalisme de base. Quant aux théories à principes, elles utilisent la méthode analytique, dont le mode de fonctionnement consiste à partir de principes. De ces principes, elles déduisent mathématiquement des conséquences. C'est pour montrer l'appartenance de la théorie de la relativité aux théories à principes qu'A. Einstein affirme : « La théorie de la relativité est une théorie à principes » (2016, p. 13). Présentée comme une théorie à principes, l'appréhension de la théorie de la relativité exige une parfaite maîtrise de ses principes.

La théorie de la relativité est foncièrement opposée à la méthode inductive. L'induction en mathématique consiste à partir des faits particuliers pour aboutir à une loi générale. Cette généralisation utilisée de façon abusive est la cause des échecs ou des erreurs qui assaillaient les théories du physicien britannique Isaac Newton. Car, cette tentative de fonder les bases axiomatiques d'une théorie physique en se servant de la méthode inductive était, selon Einstein, une erreur philosophique fondamentale. C'est pourquoi il stipule à juste titre que : « Il n'y a pas de méthode inductive qui puisse conduire aux concepts fondamentaux de la physique » (2016, p. 48). Pour Einstein, la méthode inductive serait incapable de nous conduire à des concepts fondamentaux de physiques inébranlables. En clair, la méthode inductive est inféconde ou stérile.

Les différentes étapes de création de la théorie de la relativité s'enchaînent selon une suite logique. Celle-ci est conforme à la méthode déductive. Car, le raisonnement déductif se fonde essentiellement sur les axiomes et les concepts fondamentaux. De ces principes, il déduit des implications mathématiques. Einstein soutient cette idée lorsqu'il montre que : « La pensée logique est nécessairement déductive, elle est basée sur des concepts hypothétiques et des axiomes » (2016, p. 48). Les axiomes et les concepts hypothétiques représentent la base axiomatique d'une théorie physique et le point de départ du raisonnement logique, entendu comme le raisonnement mathématique.

Le raisonnement mathématique exige donc de partir non pas des faits vers les principes de base, comme le suggérait la physique classique, mais des principes vers les données sensibles. En procédant ainsi, les axiomes des théories physiques sont de plus en plus détachés de l'expérience. Ils acquièrent un niveau d'abstraction très élevé. Ce caractère abstrait des axiomes de base permet une certaine économie : nous pouvons rassembler un grand nombre de faits avec un nombre très restreint d'hypothèses ou d'axiomes. Pour A. Einstein, à l'instar de la théorie de la relativité, cette méthode doit être la caractéristique de toute théorie physique moderne. « Cette théorie de la relativité présente un excellent exemple du caractère fondamental du développement moderne de la théorie. Les hypothèses de départ deviennent de plus en plus abstraites, de plus en plus éloignées de l'expérience. Mais en revanche, on se rapproche beaucoup de l'idéal scientifique par excellence : rassembler, par déduction logique, grâce à un minimum d'hypothèses ou d'axiomes, un maximum d'expériences ». Selon A. Einstein (2009, p. 197), tout théoricien moderne de la physique doit épouser la méthode « rigoureusement mathématiques » (2009, p. 197). Car, cette méthode se présente comme un instrument de découverte et de création de théories physiques. Les équations mathématiques n'ont-elles pas la possibilité de nous révéler le réel physique ?

## ***2.2. Les mathématiques, principe fondateur et de découverte du réel en physique***

Après avoir présenté, en 1925, la formulation logique et cohérente de la mécanique quantique fondée sur des valeurs non-commutables, Heisenberg décide de trouver l'interprétation philosophique de cette nouvelle physique. Convaincu de ce que c'est la théorie qui décide de ce que nous pouvons observer ou pas, Heisenberg estime que plutôt que de poser la question relative à l'aspect de la réalité quantique durant une expérience, il serait plus juste de poser celle relative à la possibilité pour la mécanique quantique de représenter mathématiquement, de façon simultanée la position et la vitesse d'une particule quantique. L'articulation de cette question à la manipulation des équations mathématiques conduisit W. Heisenberg à la découverte de l'un des principes fondamentaux de la mécanique quantique : « les relations d'incertitude » (2018, p. 35). Selon ce principe encore appelé principe d'indétermination, la mécanique quantique montre les limites de notre capacité de connaissance, d'observation et de prédiction. Par la médiation du principe d'incertitude, la mécanique quantique imposait à l'homme ce qui était observable et connaissable. Ainsi, avec la mécanique quantique, notre possibilité de connaissance et d'observation se trouve limitée.

Pour donner une certaine valeur à son principe d'incertitude, Heisenberg décide de lui donner une forme mathématique. Celle-ci doit prendre en compte deux variables : La quantité de mouvement  $p$  de la particule et sa position  $q$ . En plus, une valeur d'incertitude notée  $\Delta$  doit être appliquée à chaque variable. Ainsi, nous aboutissons à l'équation suivante :  $\Delta p \Delta q \geq h/2\pi$ , où  $h$  est la constante de Planck. Telle était la forme mathématique du principe d'incertitude. Cette équation stipule que, l'incertitude de la quantité du mouvement  $\Delta p$  multiplié par l'incertitude de la position  $\Delta q$  est toujours supérieure ou égale à la constante de Planck  $h$  divisée par deux fois pi. Il ressort de cette équation que, la mécanique quantique montre que toute mesure est entachée d'une marge d'erreur ou d'incertitude. Car, toute mesure est imprécise. Heisenberg est convaincu de ce que l'incertitude n'est pas due à une défaillance technologique. Elle est un trait caractéristique de la réalité. Suivant cette logique, Heisenberg établit un lien entre le principe d'incertitude et l'équation fondamentale de la mécanique quantique.

La mécanique quantique, grâce au principe d'incertitude, imposait une limite de mesure infranchissable. En effet, dans la physique classique, il était possible de mesurer avec une précision et de façon simultanée la position et la quantité de mouvement d'un objet. Cependant, la mécanique quantique montre que cela est sans doute valable dans le monde macroscopique, mais impossible dans l'univers atomique. On ne peut mesurer et connaître simultanément la position et la quantité de mouvement d'une particule quantique. Or, comme le souligne W. Heisenberg, « En théorie quantique, le processus est légèrement différent » (2018, p. 36). Elle interdit, à un instant donné, la détermination précise simultanée de la position et de la quantité de mouvement d'une particule. Cette barrière de mesure infranchissable fut imposée par le principe d'incertitude ou d'indétermination. Il montre en substance qu'il est possible de mesurer avec précision soit la position, soit la vitesse d'une particule quantique, mais pas les deux à la fois. Car, la précision de l'une conduit nécessairement à l'indétermination de l'autre. Ainsi, la mécanique quantique limite notre capacité de mesure. Car, « plus la position de l'électron est déterminée avec précision, plus sa quantité de mouvement devient incertaine, indéterminée et imprécise – et vice versa » M. Kumar, (2012, p. 334).

Selon l'interprétation philosophique de la mécanique quantique, le principe d'incertitude disqualifie le déterminisme scientifique au profit de l'indéterminisme. En effet, pour la physique classique, les phénomènes de la nature étaient fondamentalement déterminés. Si nous connaissons l'état présent d'un objet, nous pouvons, grâce aux lois scientifiques, prédire sa position future. Une telle idée ne va pas de soi selon la mécanique quantique. Car, pour elle, nos capacités de prédictions sont extrêmement limitées par le principe d'incertitude. S. Hawking légitime cette idée par l'affirmation suivante : « Le principe d'indétermination limite notre capacité à prédire l'avenir à l'aide des lois scientifiques » (2009, p. 332). Cette incapacité à prédire le futur au moyen des lois scientifiques est confirmée par une preuve expérimentale. Pour prédéterminer les états futurs d'une particule, il faut d'abord connaître, avec précision, ses états initiaux, sa vitesse et sa position. La mesure de la position de la particule perturbe sa vitesse et celle de sa vitesse dérange sa position. Nous ne pouvons, dans cette perspective, prédire avec certitude le futur d'une particule quantique. Par conséquent, la physique

quantique estime que les lois scientifiques sont régies par l'indéterminisme. Cette limitation imposée par le principe d'incertitude est inhérente à la nature.

Selon l'interprétation de Copenhague, la discontinuité qui existe au cœur de la physique quantique, la contraint à ne considérer que des résultats statistiques. En effet, dans la physique classique, les résultats de mesure étaient précis puisque les instruments l'étaient aussi. Cependant, pour les tenants de la mécanique quantique, celle-ci ne présente jamais un seul résultat pour une mesure donnée. C'est dans cette optique que S. Hawking affirme : « La physique quantique a notamment ceci de révolutionnaire qu'elle ne prédit généralement pas un résultat unique pour une mesure donnée, mais un certain nombre de possibilités et qu'elle permet de calculer un taux de probabilité de chacune d'elle » (2009, p. 148). Autrement dit, si nous souhaitons effectuer des mesures sur un ensemble de système similaire, il est impossible de prédire un résultat unique pour tous les systèmes donnés. On peut seulement, selon la mécanique quantique, aboutir, dans certains cas, à un résultat et dans d'autres cas à un autre résultat totalement différent. Ainsi, seuls des résultats probabilistes ou statistiques sont possibles en mécanique quantique.

Conformément à la mécanique quantique, les situations expérimentales de la nature sont des créations. Cela dit, les situations expérimentales n'existent que par la volonté et la puissance créatrice du formalisme mathématique de la mécanique quantique. En d'autres termes, c'est le formalisme mathématique de la physique quantique qui décide de la possibilité d'existence ou non des situations expérimentales. Ainsi, la réalisation d'un fait expérimental dans la nature exige au préalable une condition essentielle, celle de pouvoir s'exprimer dans le formalisme mathématique de la mécanique quantique. Dans cette perspective, seules peuvent se présenter dans la nature des situations expérimentales qui peuvent s'exprimer dans le formalisme mathématique de la physique quantique. En d'autres termes, ce sont les équations de la mécanique quantique qui décident de l'existence ou non d'une réalité expérimentale. Les situations expérimentales n'ont donc pas une existence indépendante des équations mathématiques de la physique quantique. Elles existent par et pour ce formalisme mathématique.

Conformément à son interprétation de la mécanique quantique, Heisenberg s'engage dans une redéfinition de certains concepts, en l'occurrence la position et la quantité de mouvement. Selon la physique classique, la position et la quantité de mouvement d'un objet peuvent exister indépendamment de la mesure. Celles-ci sont des propriétés qui préexistent à la mesure. Or, selon la mécanique quantique, aucune position ou aucune quantité de mouvement d'une particule n'est antérieure à la mesure. Car, c'est la mesure qui leur confère une réalité. « La mesure de la position d'un électron crée un électron-avec-position, tandis que la mesure de la quantité du mouvement d'un électron crée un électron-avec-quantité-de mouvement » M. Kumar, (2012, p. 338). Autrement dit, en dehors de toute mesure, la position et la quantité de mouvement d'une particule ne possèdent aucune existence physique. C'est l'acte même de mesurer qui les fait exister en tant que réalité physique. Ainsi, les propriétés des objets, la quantité de mouvement et la position des particules sont des créations liées à leur observation.

Le 22 mars 1927, Heisenberg expédia une copie de son article à une revue scientifique, le *Zeitschrift für Physik*. Dans le dernier paragraphe de son article intitulé « *Sur le contenu perceptuel de la cinématique et de la mécanique quantique* », Heisenberg montre que la physique quantique n'offre aucun retour à la physique classique. La mécanique quantique substitue l'univers réel de la physique classique par un univers statistique entendu comme un monde de probabilité. Dans cette perspective, la notion de causalité selon laquelle tout effet a une cause n'est plus valable dans l'univers atomique. La mécanique quantique permet un bouleversement total de la physique classique. Selon Heisenberg, la mécanique quantique établit l'échec total de la physique classique. Il n'y a aucune chance de pouvoir restaurer l'univers classique. Toute tentative de le restaurer serait absurde et inutile.

Par ailleurs, l'utilisation des mathématiques par les physiciens a permis de prédire l'existence de Trous noirs. Les trous noirs sont des régions de l'espace-temps desquels aucun corps physique ne peut sortir, pas même la lumière. Après l'élaboration de la théorie de la relativité générale par Einstein en

1915, certains physiciens tenteront de donner des solutions aux équations d'Einstein. En s'investissant à fond dans cette résolution, ils aboutissent à une prédiction mathématique qui pose l'existence d'objets physiques, les trous noirs. Les trous noirs sont, comme nous le disions, des prédictions mathématiques des équations einsteiniennes. Cela suppose clairement que, les trous noirs n'ont pas accédé directement, après leur prédiction, au statut d'objets physiques. Leur existence était simplement décrite par des équations mathématiques. De la sorte, l'existence des trous noirs était fondée sur un modèle mathématique et non sur une observation empirique. « Les trous noirs sont un des rares cas dans l'histoire des sciences pour lesquels une théorie a été développée en détail en tant que modèle mathématique avant que les observations n'aient fourni une preuve de sa validité » S. Hawking, (1989, p. 105). Autrement dit, la formulation mathématique des trous noirs a précédé leur découverte. Dans une perspective épistémologique, un objet physique n'existe pas seulement parce qu'on peut l'observer, mais parce qu'il est mathématiquement descriptible. Les symboles mathématiques sont un puissant outil de découverte d'objets physiques. Ainsi, à l'origine, les trous noirs existaient seulement par des équations mathématiques. Puisque nous parlons de solutions aux équations d'Einstein, il est important de faire une précision. Karl Schwarzschild (1873-1916), physicien et mathématicien allemand, est le premier à trouver une solution exacte aux équations de la relativité générale. Cette recherche des solutions aux équations d'Einstein permet de prédire l'existence de trous noirs immobiles et sphériques et de trous noirs en rotation

## Conclusion

En définitive, les mathématiques sont un puissant outil au service de la physique. Car, elles sont utilisées par le physicien pour exprimer les lois de la nature, pour unifier des entités contradictoires, pour découvrir des théories et pour prédire l'existence d'objets physiques. Les mathématiques et la physique sont deux disciplines inséparables. Elles conjuguent leurs efforts pour permettre à l'humanité d'étancher sa soif de compréhension et connaissance.

## Références bibliographiques

- DANINOS Frank, 2015, « Les grandes théories d'Einstein », in *1915-2015 100 ans de relativité générale EINSTEIN aujourd'hui*, Hors-série, Paris, Sciences et avenir, 35-49 pp.
- EINSTEIN Albert, 2015, *La relativité, la théorie de la relativité restreinte et générale : La relativité et le problème de l'espace*, Trad. Maurice Solovine, Paris, Payot, 219 p.
- EINSTEIN Albert, 2009, *Comment je vois le monde*, Trad. Maurice Solovine et Régis Hanrion, Paris, Flammarion, 245 p.
- EINSTEIN Albert, 2016, *Conceptions scientifiques*, Trad. Maurice Solovine, Paris, Flammarion, 188 p.
- EINSTEIN Albert et INFELD Léopold, 1983, *L'évolution des idées en physique : Des premières conceptions aux théories de la relativité et des quanta*, Trad. Maurice Solovine, Paris, Flammarion, 280 p.
- GALILÉE, 1979, *L'essayeur*, Trad. Christiane Chauviré, Paris, Les Belles Lettres, 310 p.
- HAWKING Stephen, 2009, *Une belle histoire du temps*, Trad. Béatrice Commengé, Paris, Flammarion, 268 p.
- HAWKING Stephen, 1989, *Une brève histoire du temps : Du big bang aux trous noirs*, Trad. Isabelle Naddeo-Souriau, Paris, Flammarion, 202 p.
- HEISENBERG Werner, 2018, *Physique et philosophie*, Trad. Jacqueline Hadamard, Paris, Albin Michel, 285 p.
- KUMAR Manjit, 2012, *Le grand roman de la physique quantique : Einstein, Bohr... et le débat sur la nature de la réalité*, Trad. Bernard Sigaud, Paris, Flammarion, 634 p.
- LALANDE André, 2013, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, Paris, PUF, 1323 p.
- MONNIER Emmanuel, 2015, « La genèse d'une théorie révolutionnaire », in *Einstein et la relativité*, n°1015, Paris, Science et Vie, 43-48 pp.
- NAMER Émile, 1964, « L'intelligibilité mathématique et l'expérience chez Galilée » in *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, tome 17, n° 4, Paris, PUF, 369-384 p.
- TYBURCE Bernard, 2015, *La science selon Galilée, Descartes et Newton*, Paris, Ellipses, 237 p.