



DES MATHS POUR AGIR

Accompagner la prise de décision par la science

Publié en 2023 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France

© UNESCO 2023

ISBN 978-92-3-200276-1



Œuvre publiée en libre accès sous la licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>). Les utilisateurs du contenu de la présente publication acceptent les termes d'utilisation de l'Archive ouverte de libre accès UNESCO (<https://fr.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-fr>).

Titre original : Mathematics for Action: Supporting Science-Based Decision Making.
Publié en 2022 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

Les désignations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les idées et opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et autrices ; elles ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'UNESCO et n'engagent en aucune façon l'Organisation.

Conception graphique : Whistling Thorn Strategies

Conception de la couverture : Whistling Thorn Strategies

Illustrations : sauf indication contraire, Whistling Thorn Strategies

Traduction Française : Christiane Rousseau

Les mathématiques au service du développement durable

Tout ce que nous faisons s'appuie sur une structure mathématique ; et bien que les mathématiques soient souvent considérées comme abstraites, elles restent incontournables pour notre compréhension de la nature et de notre planète, avec leurs dimensions temporelles et spatiales et leur myriade d'incertitudes.

La pandémie de COVID-19 a propulsé la modélisation mathématique au premier plan de l'attention et du débat publics. Des termes tels que « croissance exponentielle » ou « aplatis la courbe » font désormais partie du lexique collectif. Les gouvernements du monde entier s'appuient sur les mathématiques non seulement pour prédire l'évolution de l'épidémie, mais aussi pour comprendre des phénomènes sociaux comme l'hésitation à se faire vacciner.

Les mathématiques ont permis des améliorations considérables dans les prévisions météorologiques et ont des applications dans l'agriculture et la pêche. **Grâce à de nouvelles approches mathématiques, la trajectoire d'un cyclone tropical peut désormais être prédite jusqu'à une semaine à l'avance, ce qui donne aux communautés le temps d'évacuer, de sauver des vies et de réduire les pertes économiques.**

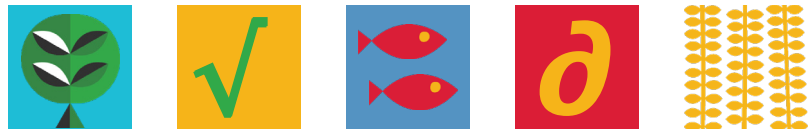
La boîte à outils *Des maths pour agir* présente des histoires passionnantes des mathématiques à l'œuvre. Construite par des mathématiciennes, des mathématiciens ainsi que par des leaders d'opinion du monde entier, elle met en valeur des recherches fascinantes, qui expliquent comment les mathématiques s'attaquent concrètement aux défis les plus pressants du monde.

La boîte à outils fournit des informations décisives à l'intention de celles et ceux qui nous gouvernent, mais aussi de celles et ceux qui tiennent à s'appuyer sur des faits pour répondre à des questions difficiles. Elle ouvre enfin de nouvelles avenues de recherche.



unesco

« Les guerres prenant naissance dans l'esprit des hommes, c'est dans l'esprit des hommes que doivent être élevées les défenses de la paix »



DES MATHS POUR AGIR

Accompagner la prise de décision
par la science

Jean-Stéphane Dhersin
Hans Kaper
Wilfred Ndifon
Fred Roberts
Christiane Rousseau
Günter M. Ziegler
(eds)

REMERCIEMENTS

L'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, les éditeurs et éditrices et les auteurs et autrices remercient les nombreuses personnes et organisations qui ont contribué à la boîte à outils Des maths pour agir, accompagner la prise de décision par la science.

CONSORTIUM D'EXPERTS

Institut Africain des Sciences
Mathématiques (AIMS)

Union mathématique africaine (AMU)

Centre de recherches mathématiques
(CRM)

Centre International de
Mathématiques Pures et Appliquées
(CIMPA)

Société mathématique européenne
(EMS)

Institut National des Sciences
Mathématiques et de Leurs
Interactions (INSMI/CNRS)

Institut de Valorisation des Données
(IVADO)

Commission internationale de
l'enseignement mathématique (CIEM)

Union mathématique internationale
(UMI)

ÉDITEURS ET ÉDITRICE

Jean-Stéphane Dhersin
France

Hans Kaper
États-Unis

Wilfred Ndifon
Rwanda

Fred Roberts
États-Unis

Christiane Rousseau
Canada

Günter M. Ziegler
Allemagne

ÉDITRICE SCIENTIFIQUE, CONCEPTRICE & GRAPHISTE

Barbara Cozzens
Whistling Thorn Strategies

TRADUCTION FRANÇAISE

Christiane Rousseau
Canada



À PROPOS DES AUTEURS ET AUTRICES

Trente-deux mathématiciennes, mathématiciens, scientifiques et leaders d'opinion du monde entier ont collaboré afin de partager leur vision des applications des mathématiques au développement durable.



Javier Amezcua

*Scientifique atmosphérique et océanique
Université de Reading et National Center
for Earth Observation, Royaume-Uni*

Javier Amezcua est membre du National Center for Earth Observation (NCEO) et fait partie du Centre de recherche sur l'assimilation des données à Reading. Ses recherches comprennent l'étude et le développement de méthodes avancées d'assimilation des données, y compris les méthodes hybrides variationnelles d'ensemble en présence d'erreur de modèle, ainsi que les filtres à particules.



Chris Bauch

*Mathématicien
Université de Waterloo,
Canada*

Chris Bauch est titulaire d'une chaire de recherche universitaire au département de mathématiques appliquées. Il étudie les modèles mathématiques et statistiques des interactions entre les systèmes naturels et humains et leur application à des politiques concernant les vaccins, le changement climatique et l'écologie.



Amit Apte

*Mathématicien
Indian Institute of Science Education and
Research, Inde*

Amit Apte est un mathématicien appliqué. Il détient une chaire en science des données à l'IISER, et travaille sur l'assimilation de données et sur les systèmes dynamiques dans les sciences de la Terre. Ses recherches portent sur la compréhension de la dynamique des systèmes complexes à travers l'interaction subtile mais fructueuse entre les données d'observation et les modélisations des systèmes complexes.



Michael Bode

*Mathématicien
Queensland University of Technology,
Australie*

Michael Bode développe des théories et des outils mathématiques pour comprendre les écosystèmes menacés et soutenir la prise de décision et la gestion dans la conservation à grande échelle. Il s'intéresse au comportement et au contrôle des systèmes dynamiques incertains et complexes, et aux aspects spatiaux de l'écologie et de la conservation.



Chris Baker

*Mathématicien
Université de Melbourne,
Australie*

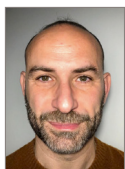
Christopher Baker est chercheur à l'école de mathématiques et de statistiques. Ses intérêts de recherche portent principalement sur l'utilisation de modèles mathématiques pour améliorer la prise de décision, en mettant l'accent sur l'application de la théorie du contrôle optimal à la gestion des espèces envahissantes et sur le développement de modèles d'écosystèmes pour prédire l'impact des actions de gestion sur les espèces.



Inés Caridi

*Physicienne
Université de Buenos Aires,
Argentine*

Inés Caridi travaille à la modélisation des phénomènes sociaux et au développement de nouvelles méthodologies pour des problèmes réels dans un cadre multidisciplinaire, en collaborant avec des experts des domaines médico-légaux et humanitaires. Elle est spécialiste des systèmes complexes.



Alberto Carrassi

Physicien

Université de Reading et NCEO, Royaume-Uni, et Université de Bologne, Italie

Alberto Carrassi se concentre principalement sur l'assimilation de données, particulièrement sur les développements théoriques motivés par des problématiques en science du climat et en environnement. Son activité de recherche se situe au carrefour entre l'assimilation des données, les systèmes dynamiques et, plus récemment, l'apprentissage automatique.



Ian Durbach

Statisticien

Université de Cape Town, Afrique du Sud & Université de St. Andrews, Écosse

Ian Durbach travaille sur la prise de décision en présence d'incertitude. Ses recherches portent sur les processus prescriptifs et descriptifs qui sous-tendent les choix risqués ou incertains. Il s'intéresse tout particulièrement à la frontière entre modèles prescriptifs et descriptifs, et aux approches simplifiées ou heuristiques du problème.



Barbara Cozzens

Scientifique de la conservation

Whistling Thorn Strategies, États-Unis

Barbara Cozzens dirige un cabinet de conseil qui travaille à l'intersection de la recherche, de la politique et de la pratique. Ses domaines d'expertise comprennent la synthèse des données probantes, la prise de décision structurée, la conservation de la biodiversité et du paysage, l'économie environnementale, le développement de stratégies, la communication scientifique et la conception de l'impact sociétal.

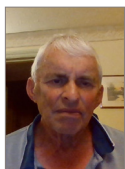


Hans Engler

Mathématicien

Université de Georgetown (émérite), États-Unis

Hans Engler est mathématicien appliqué et statisticien. Il s'intéresse aux modèles mathématiques du climat de la Terre et à l'utilisation de la science des données pour les problèmes de développement durable.



Mike Cullen

Mathématicien

U.K. Met Office (émérite), Royaume-Uni

Mike Cullen a dirigé le groupe de recherche sur l'assimilation des données du Met Office, dont la tâche consistait à combiner les connaissances dynamiques et statistiques pour optimiser les prévisions météorologiques à court terme en exploitant les observations disponibles. Il a également travaillé sur la dynamique atmosphérique théorique et les équations différentielles non linéaires.



Geir Evensen

Mathématicien

NORCE & Nansen Environmental & Remote Sensing Center, Norvège

Geir Evensen a une grande expérience de l'assimilation des données dans les modèles océaniques et météorologiques, ainsi que dans les modèles de réservoirs pétroliers. Il a développé de nouvelles méthodes d'assimilation de données d'ensemble, dont le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF), qui est maintenant opérationnel dans tous les principaux services météorologiques internationaux.



Emmanuel Dufourq

Mathématicien

Université de Stellenbosch et AIMS, Afrique du Sud

Emmanuel Dufourq est titulaire de la Chaire de recherche junior canadienne en sciences du climat à African Institute for Mathematical Sciences (AIMS) et maître de conférences en sciences des données à l'université de Stellenbosch. Ses intérêts de recherche incluent la bioacoustique, la neuro-évolution, l'apprentissage profond, l'intelligence artificielle, l'analyse des sentiments, l'optimisation et les algorithmes évolutionnaires.



Alison Fowler

Météorologue

Université de Reading et NCEO, Royaume-Uni

Alison Fowler s'intéresse à la compréhension de l'incertitude associée aux données d'observation de la Terre et au développement de méthodes pour optimiser les stratégies d'observation. Au fil des années, elle a travaillé en étroite collaboration avec le U.K. Met Office, en appliquant la théorie de l'assimilation des données à une variété de problèmes liés à la prévision météorologique numérique et aux prévisions maritimes.



Merrilyn Goos

*Didacticienne des mathématiques
University of the Sunshine Coast,
Australie*

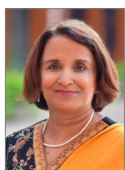
Merrilyn Goos étudie le raisonnement mathématique des élèves, l'impact des technologies numériques sur l'apprentissage et l'enseignement des mathématiques, la formation et le développement professionnels des enseignants de mathématiques, et l'équité entre les sexes dans l'enseignement des STIM. Elle est vice-présidente de la Commission internationale de l'enseignement mathématique.



Bruce Mellado

*Physicien
Université du Witwatersrand, iThemba
LABS & ACADIC, Afrique du Sud*

Bruce Mellado est professeur, chercheur senior à iThemba LABS, et co-président d'ACADIC. Il est un expert du boson de Higgs — une particule subatomique qui donnerait sa masse à la matière — et un des membres de l'équipe qui l'a découvert. Il est actuellement membre du comité consultatif sur la COVID-19 du Premier ministre du Gauteng, et modélisateur en chef pour la province.



Anjum Halai

*Chercheuse en éducation
Faculté des arts et des sciences, Université
Aga Khan, Pakistan*

Anjum Halai s'intéresse à la formation des enseignants de mathématiques, notamment dans le contexte des pays en développement. Ses recherches portent sur les questions de justice sociale en éducation, en particulier pour les élèves marginalisés sur la base du genre ou de la langue. Elle est vice-présidente de la Commission internationale de l'enseignement mathématique.



Wilfred Ndifon

*Chercheur en biologie théorique
AIMS Global Network,
Rwanda*

Wilfred Ndifon, chercheur en biologie théorique, mène des recherches à l'interface des sciences mathématiques et biologiques. Son intérêt principal est d'élucider les mécanismes qui régissent les réponses immunitaires aux maladies. Il travaille aussi aux applications cliniques de ces travaux, dont la conception de meilleurs diagnostics et de vaccins.



Hans Kaper

*Mathématicien
Université de Georgetown,
États-Unis*

Hans Kaper est un mathématicien appliqué qui s'intéresse aux mathématiques des systèmes physiques. Ses recherches actuelles sont axées sur les mathématiques de la planète Terre, en particulier les modèles conceptuels du système climatique de la Terre et les problématiques autour du développement durable, de la biodiversité, de l'alimentation, de l'énergie et de l'eau.



Nadia Raïssi

*Mathématicienne
Université Mohammed V à Rabat,
Maroc*

Nadia Raïssi dirige le Laboratoire d'analyse mathématique et d'applications de l'Université Mohammed V à Rabat. Elle est spécialiste de la théorie du contrôle. La modélisation des pêcheries est l'un de ses domaines d'application préférés.



Jude Kong

*Mathématicien
Université York & ACADIC,
Canada*

Jude Kong est professeur et directeur fondateur du Africa-Canada Artificial Intelligence and Data Innovation Consortium (ACADIC). Il est expert en intelligence artificielle, en modélisation mathématique, en modélisation des maladies infectieuses et en enseignement des mathématiques. Il dirige une équipe interdisciplinaire qui utilise l'IA pour aider les gouvernement et les communautés locales à contenir et à gérer la propagation de la COVID-19 dans neuf pays d'Afrique.



Fred Roberts

*Mathématicien
Université Rutgers,
États-Unis*

Fred Roberts est professeur distingué de mathématiques et directeur du Command, Control, and Interoperability Center for Advanced Data Analysis. Il est spécialiste des applications des sciences mathématiques aux problèmes sociaux, comportementaux, biologiques, épidémiologiques et environnementaux.



Helen Roberts

Statisticienne
Montclair State University,
États-Unis

Helen Roberts a une formation de biostatisticienne. Elle travaille entre autres sur les modèles de croissance de populations, la génétique, et l'utilisation de l'énergie pour la production de nourriture. Elle s'intéresse particulièrement aux moyens d'impliquer les étudiants dans les problèmes de société.



Marc Sedjro

Mathématicien
Togo

Marc Sedjro est l'ancien titulaire de la chaire de recherche allemande en mathématiques appliquées à AIMS en Afrique du Sud, avec spécialisation en équations aux dérivées partielles et en calcul des variations. Il s'intéresse à des problèmes liés à la mécanique des fluides, comme les équations d'Euler compressibles multidimensionnelles, la dynamique des gaz, et les écoulements presque axisymétriques.



Elena Rovenskaya

Mathématicienne informaticienne
Institut international d'analyse des
systèmes appliqués, Autriche

Elena Rovenskaya est directrice de programme et chercheuse principale à l'IIASA. Ses intérêts scientifiques se situent dans les domaines de la théorie du contrôle optimal, de la science de la décision et de la modélisation mathématique de systèmes socio-environnementaux complexes.



Igor Sheremet

Mathématicien
Fondation russe pour la recherche
fondamentale, Russie

Igor Sheremet est le directeur adjoint pour la science à la Fondation russe pour la recherche fondamentale. Il est spécialisé dans l'application d'outils mathématiques avancés à l'évaluation de la résilience des grands systèmes économiques face à des impacts destructeurs.



Christiane Rousseau

Mathématicienne
Université de Montréal (émérite),
Canada

Christiane Rousseau est une spécialiste des systèmes dynamiques. Elle a été l'initiatrice et la coordinatrice de l'initiative internationale Mathématiques de la planète Terre 2013, ainsi que de la Journée internationale des mathématiques.



Mouhamadou Bamba Sylla

Physicien
African Institute for Mathematical
Sciences, Rwanda

Mouhamadou Bamba Sylla est le titulaire de la chaire de recherche AIMS-Canada en science du changement climatique. Ses intérêts de recherche portent sur la modélisation du climat régional, les impacts du changement climatique, les événements extrêmes, les dangers, les risques et la dynamique du changement climatique. Il est un des auteurs principaux du sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat dans le Groupe de travail 1 : *Les éléments scientifiques*.



Andrea Saltelli

Chercheur
Université de Bergen,
Norvège

Andrea Saltelli est chercheur invité au Centre for the Study of the Sciences and the Humanities à Bergen. Il s'intéresse principalement à l'analyse de sensibilité des sorties de modèles, une discipline où les outils statistiques sont utilisés pour interpréter les résultats de modèles mathématiques ou informatiques, et à la vérification de la sensibilité, une extension de l'analyse de sensibilité à l'ensemble du processus de génération de preuves dans un contexte politique.



Michael F. Wehner

Scientifique spécialiste du changement
climatique, Laboratoire national
Lawrence-Berkeley, États-Unis

Michael F. Wehner est un scientifique senior de la Division de la recherche informatique du LBL. Ses recherches actuelles portent sur le comportement des événements extrêmes dans un contexte de changement climatique, en particulier les vagues de chaleur, les précipitations intenses, la sécheresse et les cyclones tropicaux. Il a été un des auteurs principaux des cinquième et sixième rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.





Jianhong Wu

*Mathématicien
Université York & ACADIC,
Canada*

Jianhong Wu est mathématicien, directeur fondateur du Laboratoire de mathématiques industrielles et appliquées à l'Université York et co-président de ACADIC. Il est reconnu pour son expertise et ses contributions en dynamique non linéaire, dans les équations différentielles à retard, en réseaux neuronaux et en reconnaissance des formes, en écologie et épidémiologie mathématiques, et en analyse des données massives.



Laura Wynter

*Mathématicienne et spécialiste des transports
IBM Research, Singapour*

Laura Wynter est à la tête de l'équipe Real World AI d'IBM. Elle est spécialisée dans l'optimisation des réseaux, avec une emphase particulière sur les applications en télécommunications et en transports. Ses domaines d'expertise axés sur la prise de décision efficace en temps réel, tant pour la planification que dans les environnements opérationnels, font usage d'optimisation, de modélisation de l'équilibre et de méthodes statistiques.



TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS xvi

INTRODUCTION xvii



OBJECTIF 1

Éliminer la pauvreté sous toutes ses formes et partout dans le monde

Visualiser la pauvreté : L'IA permet de tracer des cartes précises et de brosser un portrait juste 1

Christiane Rousseau



OBJECTIF 2

Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable

Plus de sécurité alimentaire : Résilience et durabilité des systèmes alimentaires 3

Hans Kaper et Hans Engler



OBJECTIF 3

Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge

Modéliser des épidémies : Prédiction de la propagation d'une épidémie 5

Christiane Rousseau

La puissance des données : Le soutien de l'intelligence artificielle lors de pandémie 7

Jude Kong, Bruce Mellado, et Jianhong Wu

Améliorer les prévisions : Assimilation des observations et des simulations en temps de pandémie 9

Geir Evensen, Javier Amezcua, Alberto Carrassi, et Alison Fowler

Mieux concevoir les vaccins : Les mathématiques accélèrent les innovations médicales 11

Wilfred Ndifon

Modéliser l'hésitation vaccinale : Comprendre les resquilleurs de l'immunité de groupe 13

Chris Bauch





OBJECTIF 4

Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie

Enseigner les mathématiques : L'enseignement des mathématiques pour le développement durable 15
Merrilyn Goos et Anjum Halai



OBJECTIF 5

Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles

Suivre la parité femmes-hommes : Fondements mathématiques des indicateurs d'égalité entre les sexes 17
Barbara Cozzens, Helen Roberts, et Fred Roberts



OBJECTIF 6

Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable

Gérer les ressources en eau : Outils probabilistes pour la vulnérabilité des ressources en eau 19
Helen Roberts et Fred Roberts

Lacs clairs, lacs troubles : États stables alternatifs dans les lacs peu profonds 21
Christiane Rousseau



OBJECTIF 9

Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation

Faire face à l'incertitude : Leçons de sciences sociales pour la modélisation mathématique 23
Andrea Satelli



OBJECTIF 11

Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables

Se préparer à une crise : Améliorer la résilience des systèmes complexes numérisés 25
Hans Kaper, Fred Roberts, et Igor Sheremet





OBJECTIF 12

Établir des modes de consommation et de production durables

Valoriser le capital naturel : Quantifier la valeur des services écosystémiques 27

Hans Kaper

Ressources limitées : Modéliser un approvisionnement durable en alimentation, énergie et eau 29

Elena Rovenskaya



OBJECTIF 13

Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions

Modéliser le climat : La dynamique énergétique d'un monde qui se réchauffe 31

Hans Kaper

Faire face aux climats futurs : Modéliser le climat pour de meilleures décisions... 33

Mouhamadou Bamba Sylla

Prévoir les cyclones : Les mathématiques de la prévision des cyclones tropicaux . 35

Marc Sedjro et Mike Cullen

Événements météo extrêmes : La nouvelle science de l'attribution des événements extrêmes 37

Michael F. Wehner

Comprendre la mousson indienne : Amélioration de la prévisibilité des pluies annuelles d'été 39

Amit Apte



OBJECTIF 14

Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable

Pêcheries durables : Modèles bioéconomiques pour la gestion des pêches 41

Nadia Raïssi



OBJECTIF 15

Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des sols et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité

Mesurer la biodiversité : Utilisation des données pour préserver la nature dans le monde 43

Fred Roberts

Écouter la faune : Classification des sons d'animaux par apprentissage profond45

Emmanuel Dufourq et Ian Durbach

Combattre les envahisseurs : Approches mathématiques de la gestion des espèces envahissantes47

Christopher M. Baker et Michael Bode



OBJECTIF 16

Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et inclusives aux fins du développement durable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous

Préserver la vie privée : Pallier le manque de données par l'apprentissage fédéré 49

Laura Wynter

Retrouver les disparus : Les réseaux complexes permettent de rechercher les personnes disparues51

Inés Caridi



AVANT-PROPOS

Cette boîte à outils présentant *Des maths pour agir* arrive à un moment où les mathématiques deviennent un outil encore plus précieux pour les décideurs. Une gamme croissante de modèles mathématiques nous permet d'analyser dans quelle mesure les phénomènes naturels et ceux que nous avons engendrés nous-mêmes affecteront notre mode de vie, et si nous parviendrons à préserver notre environnement de plus en plus fragile. L'UNESCO souhaite, par le biais de cette boîte à outils, attirer l'attention de tous sur la nécessité de fonder les politiques publiques sur des faits et des évidences qui, de plus en plus, proviendront de la recherche fondamentale.

Mais pourquoi serait-ce à l'UNESCO de produire une telle publication ? Tout simplement parce que l'UNESCO est la seule agence des Nations Unies à avoir un mandat pour les mathématiques. Ce mandat est aussi ancien que le S de science dans le nom de l'UNESCO, qui date de la fondation de l'Organisation en 1946.

En 1962, l'UNESCO a fondé le Centre latino-américain de mathématiques à Buenos Aires, en Argentine, en reconnaissance du besoin d'une base solide en mathématiques dans le monde en développement. Ce fut une époque passionnante pour les mathématiques. Quelques années auparavant, le premier satellite artificiel avait été envoyé dans l'espace. Quelques années plus tard, des êtres humains marchaient sur la Lune pour la toute première fois. Le terme « intelligence artificielle » a été inventé en 1956, trois ans avant que la première puce électronique ne soit brevetée. Au cours des décennies suivantes, la miniaturisation des circuits intégrés aura permis de fabriquer des appareils mécaniques, électroniques et optiques de plus en plus petits. Les téléphones intelligents d'aujourd'hui, qui utilisent des millions de transistors minuscules pour exécuter des processus complexes, n'auraient jamais existé sans les mathématiques.

L'UNESCO est également à l'origine de la création d'une autre institution qui a formé des mathématiciennes et mathématiciens et encouragé la recherche dans les institutions nationales du monde entier au cours des dernières décennies. Je veux parler du Centre international de mathématiques pures et appliquées de Nice, en France, fondé en 1978.

L'UNESCO elle-même s'est consacrée à l'amélioration de la qualité de l'enseignement et de la recherche en mathématiques. Et pourtant, les mathématiques restent une énigme pour la personne de la rue. Il est généralement admis, par exemple, que les mathématiques sont omniprésentes dans le monde d'aujourd'hui, notamment dans les objets technologiques qui nous entourent et dans les processus d'échange et de communication, mais cette présence n'est pas suffisamment visible. Il est donc parfois difficile de voir l'intérêt de développer une culture mathématique au-delà des compétences de base en numératie, mesures et calculs.

C'est pourquoi il est important que l'éducation de base mette les mathématiques au premier plan. C'est d'autant plus important que les exigences en matière de « littératie mathématique » dépassent largement les besoins traditionnellement associés aux connaissances de base en numératie. Les mathématiques sont encore souvent perçues comme une activité presque exclusivement solitaire, déconnectée des problèmes du monde réel et indépendante de la technologie, et comme une activité purement déductive où des preuves formelles parfaitement rigoureuses sont utilisées pour produire théorème après théorème. Ces nombreux malentendus affectent l'enseignement des mathématiques en dressant des obstacles à une éducation mathématique de qualité pour toutes et tous.

C'est pourquoi l'UNESCO a soutenu l'Année mondiale des mathématiques en 2000, afin de mettre en lumière l'impact des mathématiques sur la vie quotidienne. C'est la raison pour laquelle une équipe impulsée par l'UNESCO a conçu une exposition itinérante pour le grand public en 2004, intitulée « Pourquoi les mathématiques ? »

C'est aussi pourquoi la présente boîte à outils a été conçue pour les décideurs politiques. *Des maths pour agir* montre les mathématiques au cœur des politiques fondées sur des données probantes que les gouvernements du monde entier adoptent régulièrement pour s'attaquer à des problèmes socio-économiques ou environnementaux particuliers.

Shamila Nair-Bedouelle

Sous-directrice générale pour les sciences exactes et naturelles



INTRODUCTION

Le monde actuel est confronté à un ensemble de défis complexes et interconnectés sans précédent : l'insécurité alimentaire, les agents infectieux, le changement climatique, la dégradation des sols, la perte de biodiversité, les migrations massives, les conflits ou encore les troubles politiques constituent des obstacles au développement et mettent les sociétés en danger dans le monde entier. Dans le même temps, les projections de croissance démographique et les effets du changement climatique intensifieront ces défis dans le futur.

MATHÉMATIQUES DE LA PLANÈTE TERRE

Il y a près de dix ans, la communauté mathématique a lancé Mathématiques de la Planète Terre 2013 (MPT 2013, MPE 2013 en anglais), une initiative d'une durée d'un an visant à mettre en évidence la puissance des sciences mathématiques et de leurs outils pour s'attaquer à ces problèmes mondiaux. Cette initiative s'est transformée en un partenariat international regroupant plus de 150 sociétés savantes, universités, instituts de recherche et organisations professionnelles sous le patronage de l'UNESCO. MPT 2013 a mis en évidence la nature multidisciplinaire des problématiques de recherche reliées aux enjeux planétaires et le besoin de partenariats multidisciplinaires pour s'attaquer à ces problématiques.

Fin 2013, Mathématiques de la Planète Terre 2013 s'est transformée en Mathématiques de la Planète Terre (Mathematics of Planet Earth, MPE) pour poursuivre les efforts de recherche en cours et maintenir l'élan de l'initiative. La publication — *Des maths pour agir, accompagner la prise de décision par la science* — est l'un des nombreux résultats de ces efforts.

Des maths pour agir est une collection d'articles soulignant le rôle des mathématiques dans la résolution d'enjeux d'importance mondiale. Rédigées par 32 mathématiciennes, mathématiciens et leaders du monde entier, les 26 articles présentent trois types de sujets :

- **Des réussites** — Des concepts et outils mathématiques qui permettent déjà de résoudre des défis quotidiens, tels que le suivi et la prévision de la propagation des épidémies ;

- **Des éclairages apportés par les mathématiques** — Des concepts mathématiques qui permettent de comprendre et de décrire le monde réel ;
- **Des grands défis mathématiques restant à relever** — Des problèmes urgents que les mathématiques peuvent contribuer à résoudre, de la résilience du système alimentaire mondial au changement climatique.

Bien que plusieurs articles partagent des thèmes ou des concepts communs, ils peuvent être lus dans n'importe quel ordre. Ensemble, la collection met l'accent sur la puissance et le potentiel des sciences mathématiques pour relever les défis mondiaux et propose des approches innovantes pour favoriser des modes de décision fondés sur la science.



FEUILLE DE ROUTE DE LA BOÎTE À OUTILS

L'Agenda 2030 pour le développement durable, adopté par tous les États membres des Nations Unies en 2015, fournit un plan d'action commun pour les populations, la planète, la prospérité et la paix. Les 17 objectifs de développement durable structurent l'action des 15 prochaines années dans des domaines d'importance majeure pour l'humanité. Les 26 articles sont organisés en fonction de 13 des 17 objectifs :



Objectif 1 : Éliminer la pauvreté sous toutes ses formes et partout dans le monde. *Visualiser la pauvreté* détaille les nouvelles techniques mathématiques permettant de collecter et cartographier les données sur la pauvreté, de manière précise, plus efficace et moins coûteuse que les méthodes traditionnelles d'enquête.



Objectif 2 : Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable. *Plus de sécurité alimentaire* décrit des approches mathématiques permettant d'identifier les chocs et de concevoir des stratégies optimales d'atténuation et d'adaptation pour renforcer la résilience du système alimentaire mondial.





Objectif 3. Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge. Cinq articles traitent de sujets liés à la pandémie de Sars-CoV-2. *Modéliser des épidémies* fournit les bases de la modélisation mathématique des maladies infectieuses et met en lumière la richesse des enseignements des modèles les plus simples. *La puissance des données* détaille comment l'intelligence artificielle a permis des réponses adaptées aux spécificités locales dans la pandémie en Afrique. *Améliorer les prévisions* décrit comment l'assimilation des données, technique de pointe initialement développée pour les prévisions météorologiques, a été utilisée pour améliorer la précision des prévisions des modèles de la COVID-19. *Mieux concevoir les vaccins* décrit la manière dont les mathématiques ont contribué à accélérer la conception, la phase de tests et le suivi de nouveaux vaccins, notamment les vaccins Sars-CoV-2. Enfin, *Hésitation vaccinale* examine le phénomène connu sous le nom de parasitisme dans le contexte de l'hésitation vaccinale, et ses implications pour les décideurs.



Objectif 4 : Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie. *Enseigner les mathématiques* présente une réflexion sur l'importance de l'enseignement des mathématiques et sur le rôle des enseignants en mathématiques dans l'amélioration des résultats d'apprentissage et l'ascenseur social des élèves.



Objectif 5. Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles. *Suivre la parité femmes-hommes examine les fondements mathématiques et statistiques des indicateurs utilisés pour mesurer et suivre l'évolution des facteurs économiques, sociaux et culturels qui contribuent à l'écart entre les sexes.*



Objectif 6. Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable. *Gérer les ressources en eau* montre comment un outil statistique connu sous le nom de théorème de Bayes peut être utilisé pour quantifier les risques et identifier les options adaptées pour optimiser la gestion de l'approvisionnement en eau. *Lacs clairs, lacs troubles* présente comment les mathématiques mettent en évidence les mécanismes qui font passer les lacs peu profonds de la clarté à la turbidité et contribuent à concevoir des approches efficaces, soutenables et durables de la restauration de la clarté des lacs.



Objectif 9. Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation. *Faire face à l'incertitude* est une leçon de modélisation mathématique responsable, pour aider la société à exiger de la modélisation mathématique la qualité dont elle a besoin pour la prise de décision basée sur la science.



Objectif 11. Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables. *Se préparer à une crise* traite de la résilience des systèmes numérisés et décrit certaines des méthodes et outils mathématiques très utiles pour pallier les vulnérabilités des systèmes et processus critiques et pour construire des systèmes et des sociétés plus résilients.



Objectif 12. Établir des modes de consommation et de production durables. *Valoriser le capital naturel* examine les efforts déployés pour intégrer la valeur des services écosystémiques dans les cadres de développement nationaux et décrit le rôle des mathématiques dans l'évaluation des services écosystémiques. *Ressources limitées* illustre comment les mathématiques peuvent soutenir des approches intégrées de gestion et de prise de décision sur les questions du lien nourriture-énergie-eau, mais aussi promouvoir l'utilisation de modèles pour hiérarchiser et optimiser des investissements.



Objectif 13. Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions. Cinq brèves traitent du changement climatique, dont de nombreux aspects sont des champs de recherche mathématique. *Modéliser le climat* met en évidence le modèle d'équilibre énergétique, un modèle mathématique simple mais puissant qui peut aider les gouvernements, les décideurs politiques et les citoyens à comprendre les climats passés, présent et futurs de la Terre. *Faire face aux climats futurs* décrit comment les modèles mathématiques peuvent fournir des informations essentielles à la prise de décisions politiques, permettant aux pays d'accélérer et d'intensifier l'adaptation aux changements climatiques et de réduire le risque de catastrophes. *Prévoir les cyclones* décrit comment des modèles mathématiques sont utilisés pour prédire la trajectoire et l'intensité des cyclones tropicaux et leurs impacts prévus. *Événements météo extrêmes* détaille la nouvelle science de l'attribution des événements, qui permet maintenant aux scientifiques de faire des approches quantitatives sur l'influence du

réchauffement climatique dans l'occurrence d'un événement météorologique extrême spécifique. Enfin, *Comprendre la mousson indienne* décrit l'utilisation des modèles mathématiques pour prédire l'arrivée, l'intensité et la durée de la mousson d'été indienne, un phénomène vital pour la société, l'agriculture, le tourisme et le développement économique indiens.



Objectif 14. Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable.

Pêcheries durables présente les nouveaux modèles mathématiques intégrés qui décrivent les structures économiques, sociales et écologiques de la pêche et permettent un meilleur soutien à la gestion et à la prise de décision en matière de pêche durable.



Objectif 15. Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des sols et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité.

Mesurer la biodiversité examine des indices quantitatifs de biodiversité et décrit des outils mathématiques innovants pour choisir ces mesures et améliorer la collecte et le traitement des données sur la biodiversité. *Écouter la faune* présente comment l'intelligence artificielle peut fournir un moyen rapide et efficace de traiter les données sonores sur la faune et, en fin de compte, de mieux soutenir les efforts de conservation de la biodiversité. *Combattre les envahisseurs* met en l'avant des modèles mathématiques pouvant aider à prévoir l'impact des espèces envahissantes sur les espèces indigènes, et à quantifier les efforts nécessaires pour contrôler et éradiquer les populations invasives nuisibles.



Objectif 16. Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et inclusives aux fins du développement durable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous.

Préserver la vie privée traite de l'apprentissage fédéré, une nouvelle technique mathématique qui permet de construire des modèles de réseaux de neurones entraînés de manière distribuée, de sorte que les données privées ne quittent jamais un participant ou une institution donnée. Cette avancée aura d'importantes applications en médecine, dans le système bancaire et dans d'autres domaines où la confidentialité des données est primordiale. Enfin, *Retrouver les disparus* décrit comment les réseaux complexes peuvent aider à la recherche

de personnes disparues dans le cadre de conflits armés, d'autres situations de violence, de migrations ou de catastrophes naturelles.

Ces 26 articles présentent une grande variété d'applications mathématiques. Cette liste, loin d'être exhaustive, donne une indication des applications nombreuses et diverses des mathématiques en lien direct avec les enjeux du développement durable.

Les mathématiques comparent des phénomènes très diversifiés et mettent en évidence les analogies secrètes qui les relient.

— Joseph Fourier,
mathématicien et physicien français



VISUALISER LA PAUVRETÉ

L'IA PERMET DE TRACER DES CARTES PRÉCISES ET DE BROSSER UN PORTRAIT JUSTE

L'éradication de la pauvreté sous toutes ses formes reste l'un des défis les plus urgents du monde. Bien qu'une grande partie du globe ait connu une diminution de l'extrême pauvreté, il y avait encore environ 700 millions de personnes vivant avec moins de 1,90 dollar par jour en 2021. Pour de nombreux pays, la capacité à aider efficacement leurs citoyens pauvres est compromise par des données sur la pauvreté qui manquent de détails, sont périmées ou inaccessibles. Grâce à des approches mathématiques, les analystes peuvent améliorer les estimations existantes de la pauvreté en intégrant aux données conventionnelles les données provenant des téléphones portables, des satellites, de Facebook et d'autres sources non traditionnelles. Ces estimations améliorées aideront les décideurs à concevoir des stratégies plus efficaces et efficaces pour éradiquer la pauvreté à l'horizon 2030.

Dans le monde, environ 700 millions de personnes - soit 11 % de la population mondiale - vivent dans l'extrême pauvreté. Si des progrès ont été réalisés dans de nombreuses régions, la pauvreté sous toutes ses formes reste un problème persistant et fréquent, notamment en Afrique subsaharienne. La pandémie de COVID-19 a, elle aussi, remis en cause certains acquis en poussant 97 millions de personnes supplémentaires dans la pauvreté - une augmentation sans précédent de la pauvreté mondiale.

Pour atteindre l'objectif de développement durable consistant à éradiquer la pauvreté sous toutes ses formes d'ici 2030, les décideurs ont besoin de données plus nombreuses et de meilleure qualité pour cibler efficacement les défis et les obstacles qui entretiennent la pauvreté. Trop souvent, les données nécessaires pour concevoir des politiques et des programmes de réduction de la pauvreté efficaces et efficaces sont, au mieux, inadéquates et, au pire, inexistantes.

SUIVI DE LA PAUVRETÉ

Traditionnellement, les décideurs politiques s'appuient sur les enquêtes sur les revenus et les dépenses des ménages ou sur les niveaux de vie pour suivre et mesurer la pauvreté. Toutefois, si la taille des échantillons de ces enquêtes est suffisamment importante pour fournir des échantillons représentatifs au niveau national, elle n'est généralement pas suffisante pour fournir des estimations fiables à des niveaux plus granulaires tels que les villages ou les états.

Certains pays complètent les données des enquêtes sur les ménages avec des recensements nationaux ou des données administratives pour augmenter la granularité. Les analystes utilisent la régression multiple pour construire un modèle mathématique du bien-être ou de la consommation des ménages en utilisant les variables disponibles dans les deux ensembles de données. Les paramètres du modèle sont ensuite appliqués aux données de recensement pour fournir

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les cartes de la pauvreté fournissent des estimations détaillées de la pauvreté sous forme de cartes. Les cartes sont non seulement des outils de communication visuelle très efficaces, mais elles préservent les relations spatiales entre différentes zones, ce qui serait impossible dans un format de données tabulaires.
- ✓ Souvent, des données fiables sur la pauvreté ne sont pas disponibles à petite échelle en raison des limites des méthodes d'enquête conventionnelles. Pour aider à combler les lacunes, des sources de données non traditionnelles peuvent servir d'indicateurs de l'endroit où vivent les personnes démunies. Grâce à des approches mathématiques, ces données peuvent être combinées avec les sources de données traditionnelles.
- ✓ Les estimations agrégées produisent des cartes de la pauvreté d'une grande résolution spatiale qui permettent aux décideurs de canaliser l'aide plus efficacement vers les pauvres.
- ✓ En augmentant la granularité des estimations de la pauvreté, les décideurs peuvent évaluer les variations régionales de la pauvreté et de la croissance. Cela permet de cibler et de hiérarchiser plus efficacement les interventions politiques et les ressources en fonction des conditions locales.

une estimation de la consommation par habitant pour chaque ménage. Ces estimations sont ensuite agrégées pour estimer la pauvreté au niveau d'une petite zone - village, état ou municipalité, par exemple. Enfin, les estimations sont généralement intégrées dans une carte à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Les cartes résument de manière concise de grandes quantités de données sur la pauvreté pour des centaines, voire des milliers de petites zones, sur une seule page et dans un format visuel facilement compréhensible. Un format cartographique améliore également l'interprétation des données sur la pauvreté en préservant les relations spatiales entre les zones, ce qui ne serait pas possible avec un format tabulaire classique. Les pays ont utilisé les outils de cartographie de la pauvreté pour approfondir leur compréhension de la pauvreté et de ses déterminants, examiner les déterminants géographiques, naturels et climatiques de la pauvreté, cibler l'allocation des ressources et des financements, et analyser les programmes et politiques existants et évaluer leur efficacité.

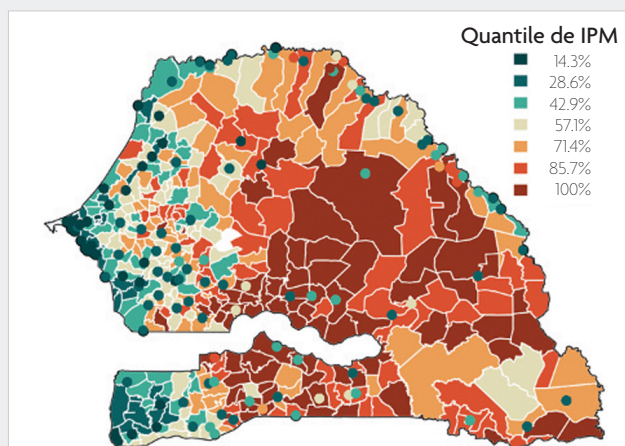
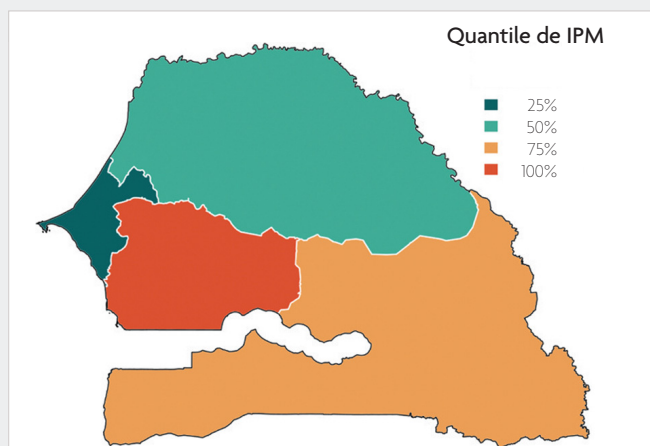
COMBLER LES LACUNES

Les données des enquêtes auprès des ménages sont coûteuses et longues à collecter et à assembler, et dans les pays en développement, les données des recensements nationaux sont souvent obsolètes ou inaccessibles. Ces dernières années, des scientifiques ont exploré l'utilisation de sources de données non traditionnelles pour aider à combler les lacunes des données sur

ÉTUDE DE CAS : EXPLOITER LES DONNÉES MASSIVES POUR AMÉLIORER LES CARTES DE LA PAUVRETÉ AU SÉNÉGAL

Les chercheurs ont utilisé un cadre basé sur l'apprentissage automatique pour combiner des enregistrements de téléphones portables avec des images satellites et des données SIG afin de créer des cartes détaillant les niveaux de pauvreté dans 552 communes du Sénégal. L'ensemble de données sur les téléphones portables contenait 11 milliards d'appels et de textes provenant de plus de 9 millions d'utilisateurs de téléphones mobiles sénégalais. Les informations anonymes sur les appels ont permis de recueillir des détails sur les personnes et leurs déplacements. Les données issues de l'imagerie satellitaire, des systèmes d'information géographique et des stations météorologiques ont fourni des informations sur les indicateurs de pauvreté tels que la présence d'électricité, de routes pavées, d'agriculture et d'autres signes de développement. Les estimations améliorées ont ensuite été validées à l'aide des données de recensement concomitantes.

La carte générée par les chercheurs permet de visualiser les variations de la pauvreté qui ne sont pas évidentes dans la carte existante, qui divise le pays en quatre régions. Par exemple, la carte actualisée a révélé que les communes de l'intérieur du pays présentent des niveaux de pauvreté plus élevés. La capitale, Dakar, et les communes environnantes, à l'ouest et le long de la côte, sont moins pauvres que le reste du pays. Et, contrairement aux méthodes conventionnelles, de telles cartes peuvent être générées fréquemment et à moindre coût.



À gauche : la carte de l'indice de pauvreté multidimensionnelle (IPM) 2016 pour quatre régions du Sénégal (Ouest, Nord, Sud et Centre). À droite : la carte actualisée de l'IPM pour les 556 communes du Sénégal, créée à l'aide des données massives. Les centres urbains sont représentés par de petits cercles. « Combining disparate data sources for improved poverty prediction and mapping » par Neeti Pokhriyal et Damien Christophe Jacques est sous licence CC by 4.0.

la pauvreté. Des outils mathématiques tels que des algorithmes d'apprentissage automatique appliqués aux enregistrements de téléphones portables, aux images satellites, aux données SIG et aux données de connectivité des médias sociaux, peuvent compléter les sources de données traditionnelles sur la pauvreté pour établir des micro-estimations de la richesse et de la pauvreté. Ces sources non traditionnelles peuvent servir d'indicateurs pour identifier les retards de développement dans certaines zones. Par exemple, les lumières nocturnes constituent un excellent indicateur de l'activité économique en révélant la présence d'électricité. En comparant les images satellites diurnes et nocturnes, les modèles d'apprentissage automatique peuvent prédire les niveaux relatifs de prospérité. De même, les données des téléphones portables, telles que le volume des appels internationaux, les contacts et la distance parcourue quotidiennement, peuvent fournir une indication précise des conditions de vie. Les estimations agrégées mathématiquement sont ensuite utilisées pour classer les villages et les communautés par indicateurs de pauvreté et de richesse et produire des cartes.

CONCLUSIONS

Les cartes enrichies à l'aide de données massives ont entraîné une demande accrue de mesures plus indépendantes et localisées de la pauvreté. Dans de nombreux pays, les décisions relatives aux objectifs de développement durable sont prises à l'aide de données sur la pauvreté qui ne sont ni suffisamment granulaires ni opportunes pour concevoir et mettre en œuvre

des politiques et des programmes efficaces qui profitent aux plus pauvres des pauvres. Par exemple, les données des enquêtes sur les ménages cachent la situation particulière des femmes. Ces nouvelles approches mathématiques permettent une désagrégation des données sur la pauvreté en fonction du lieu, du sexe, de l'âge et du revenu, comme l'exigent les indicateurs des objectifs de développement durable. La capacité de désagréger les données sera tout aussi précieuse dans l'atteinte d'autres objectifs et le calcul d'autres indicateurs.

RÉFÉRENCES

- Asian Development Bank. 2020. Mapping Poverty through Data Integration and Artificial Intelligence. Manila, ADB.
- Blumenstock, J., Cadamuro, G., et On, R. 2015. Predicting poverty and wealth from mobile phone metadata. *Science*, Vol. 350, No. 6264, pp. 1073-1076.
- Jean, N. et al. 2016. Combining satellite imagery and machine learning to predict poverty. *Science*, Vol. 353, No. 6301, pp. 790-794.
- Pokhriyal, N. et Jacques, D.C. 2017. Combining data sources for poverty mapping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 114, No. 46, pp. E9783-E9792.

AUTRICE

Christiane Rousseau
Université de Montréal, Canada



PLUS DE SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

RÉSILIENCE ET DURABILITÉ DES SYSTÈMES ALIMENTAIRES

Selon le Programme alimentaire mondial, 135 millions de personnes ont souffert de faim aiguë en 2019. Ce nombre continue d'augmenter, en grande partie en raison de chocs mondiaux allant des conditions météorologiques extrêmes aux conflits et à l'insécurité, en passant par les criquets pèlerins et la pandémie de COVID-19. Ces chocs et d'autres perturbent les chaînes d'approvisionnement alimentaire et rendent encore plus difficile de pallier l'insécurité alimentaire. La mise en place de systèmes alimentaires durables, productifs et résilients est essentielle pour inverser les tendances et mettre fin à la faim d'ici 2030. Les approches mathématiques peuvent aider à identifier les chocs qui menacent les systèmes alimentaires, à faire progresser la recherche sur des stratégies renforçant la résilience de ces systèmes et, au final, à améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle de toutes et de tous.

Les systèmes alimentaires sont les chaînes reliant la « ferme à la table » : les maillons, tous reliés par la circulation des aliments, sont des marchés, des fonctions et des acteurs et actrices jouant un rôle dans la production, le transport, le conditionnement, la transformation et la consommation. Bien qu'ils fonctionnent dans un contexte économique, les systèmes alimentaires sont soumis à des contraintes biophysiques et socio-économiques.

Si les systèmes alimentaires ont produit des aliments plus nombreux et de meilleure qualité au cours du dernier siècle, ils sont devenus plus vulnérables aux chocs et aux perturbations. Aujourd'hui, les pressions exercées sur les systèmes alimentaires par la croissance démographique, l'urbanisation croissante, le changement climatique, les parasites agricoles et les maladies menacent le bien-être humain. Comprendre les pressions exercées sur les systèmes alimentaires et le rôle des interventions peut contribuer à rendre la société plus résistante aux chocs actuels et futurs.

CHOCES DES SYSTÈMES ALIMENTAIRES

Les systèmes alimentaires sont exposés à de nombreuses perturbations, certaines connues, beaucoup inconnues, voire inimaginables. L'échelle de temps de la perturbation peut être relativement courte dans les cas d'interruption des routes commerciales ou de bouleversements politiques. Elle est assez longue pour les espèces envahissantes et les maladies du bétail, et encore plus longue pour les sécheresses. Les perturbations peuvent être locales ou régionales, mais leurs effets sont souvent ressentis à l'échelle mondiale et ont des répercussions sur le développement social et économique, sur les inégalités et la justice sociale, ainsi que sur la santé humaine.

Pendant la crise alimentaire mondiale de 2008, les prix des aliments de base comme le blé et le riz ont augmenté de façon spectaculaire. Parmi les causes de la crise, citons les sécheresses, l'augmentation des prix du carburant et des engrais, l'évolution de la demande alimentaire et la spéculation sur les

MESSAGES CLÉS

- ☑ Les conflits et l'insécurité, les conditions météorologiques extrêmes, les épidémies et d'autres chocs perturbent les chaînes d'approvisionnement et menacent la sécurité alimentaire. Les techniques mathématiques peuvent aider à évaluer les risques et les réponses et, au final, à rendre les systèmes alimentaires plus résistants aux chocs actuels et futurs.
- ☑ Les modèles mathématiques peuvent identifier des solutions optimales de gestion, comme la minimisation des coûts, la prise en compte des réactions du marché ou la simulation de politiques.
- ☑ De multiples scénarios de risque peuvent être examinés à travers la lentille mathématique. Les évaluations des risques permettent d'élaborer des stratégies d'atténuation et d'adaptation.
- ☑ Un système alimentaire est un réseau complexe qui est intimement associé à la santé, à la société et à l'environnement. La compréhension de ce réseau - composé de nombreux acteurs, acteurs et relations - est un grand défi pour les mathématiques. Relever ce défi peut contribuer à améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle pour toutes et tous.

marchés mondiaux. Cette crise a entraîné des émeutes dans de nombreux pays en développement.

La spécialisation et la concentration le long de la chaîne d'approvisionnement augmentent la vulnérabilité d'un système alimentaire aux chocs et aux perturbations. Renforcer la diversité de la chaîne d'approvisionnement alimentaire permet de se prémunir contre ces chocs. Des techniques mathématiques permettant de quantifier les approches d'atténuation des risques existent : elles ont été développées et appliquées dans de nombreux domaines, de l'ingénierie à la finance.

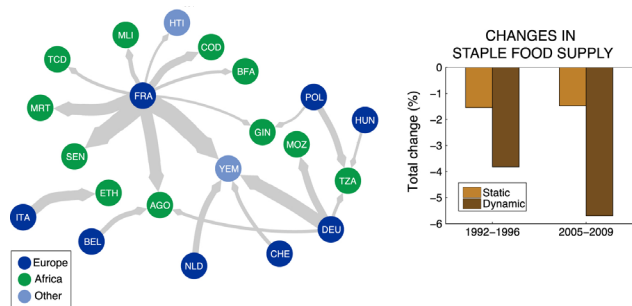
MODÈLES MATHÉMATIQUES

Les systèmes alimentaires sont déterminés par la demande et impliquent des choix personnels et des préférences culturelles à de nombreux niveaux. Pour des systèmes aussi complexes, il est pratiquement impossible d'établir des indicateurs numériques simples, tels qu'une probabilité de défaillance ou un coût prévu. Les chercheurs utilisent plutôt des modèles mathématiques qui se concentrent sur des caractéristiques particulières du système. Ces modèles intègrent la dynamique interne ainsi que les influences externes, et ils peuvent être applicables même pour des perturbations jamais encore observées. Ils peuvent tenir compte des incertitudes, telles que les conditions météorologiques, les fluctuations de prix ou le comportement des consommateurs.

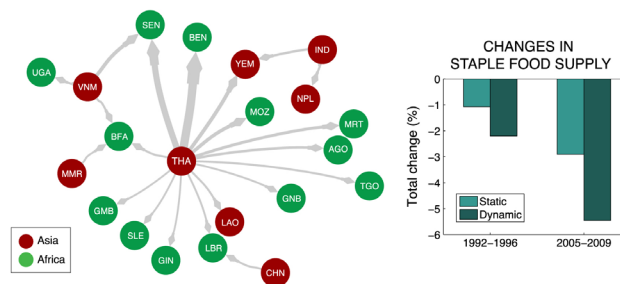
Les modèles mathématiques identifient les solutions optimales à une fonction objective spécifiée, par exemple, minimiser le

DIAGRAMMES DE RÉSEAU DES ÉCHANGES MONDIAUX DE BLÉ ET DE RIZ

IMPACTS DES PERTURBATIONS DU BLÉ



IMPACTS DES PERTURBATIONS DU RIZ



Connexions commerciales en 2009 et pertes moyennes d'approvisionnement en denrées alimentaires de base sur 1992-1996 et 2005-2009 pour les pays les moins avancés. Chaque pays est représenté par un nœud et la direction des exportations est illustrée par une flèche. La largeur des lignes est proportionnelle aux volumes des flux commerciaux de 2009. « Assessing the evolving fragility of the global food system » par Michael Puma, Satyajit Bose, So Young Chon, et Benjamin I Cook est sous licence CC by 3.0.

coût de la satisfaction des besoins nutritionnels, ou simuler une politique de contrôle de la résistance aux antibiotiques en agriculture. Des modèles d'équilibre général calculable ont été utilisés pour saisir les rétroactions du marché en matière de prix et de quantités suite aux perturbations du système. Des modèles mathématiques et statistiques sont parfois utilisés pour explorer les conséquences potentielles de politiques ou de décisions, et pour orienter la mise en œuvre des interventions visant à prévenir ou à atténuer les événements indésirables futurs.

PERSPECTIVES MATHÉMATIQUES

Plusieurs concepts mathématiques peuvent ouvrir des perspectives sur les comportements et les risques des systèmes alimentaires :

- Un **point de basculement** est un point critique au-delà duquel un système subit un changement significatif difficile à inverser. Dans le cas de la monoculture, par exemple, une seule épidémie de maladie ou de parasite peut potentiellement faire s'effondrer un système alimentaire tout entier.
- Les **événements extrêmes** se produisent près de la limite supérieure ou inférieure des observations typiques et ont donc des conséquences importantes pour le système. Par exemple, une période prolongée de sécheresse extrême peut créer des conditions idéales pour l'éclosion des œufs de sauterelles. Des essaims denses de sauterelles adultes dévorent ensuite de vastes étendues de terres cultivées et dénudent des arbres.
- Les **réseaux** sont des systèmes de sites (ou nœuds), avec des connexions (ou liens) entre eux. Les modèles de réseaux peuvent être utilisés pour décrire le transport et le commerce des systèmes alimentaires. Les propriétés supplémentaires des sites et des connexions du réseau, telles que les capacités de stockage ou les temps de déplacement, sont facilement incorporées et mises à jour au fur et à mesure qu'elles évoluent dans le temps. L'outil est bien rodé puisqu'il est appliqué dans d'autres domaines, tels que le trafic aérien et la logistique

EXPLORATION DE SCÉNARIOS

En 2015, la Lloyd's de Londres a exploré le scénario d'une

perturbation spectaculaire de la production alimentaire mondiale et de ses conséquences. Dans ce scénario, les conditions d'El Niño - de la sécheresse en Australie aux graves inondations en Asie du Sud-Est en passant par la réduction des récoltes en Amérique du Sud - entraîneraient la mort de grandes quantités de cultures alimentaires dans les champs du monde entier. À l'échelle mondiale, la production de maïs, de soja et de riz chuterait de plus de 10 %. Il s'ensuivrait une flambée des prix des denrées alimentaires et des troubles civils, ce qui aurait des répercussions économiques, politiques et sociales considérables, les pays les plus pauvres étant les plus durement touchés. Les mathématiques peuvent aider à identifier les meilleures options pour traverser une telle crise complexe.

La science des réseaux a également développé des outils permettant de décrire l'évolution des réseaux commerciaux dans le temps. En quantifiant les taux de variation des volumes d'échanges, ainsi que ceux d'apparition et de disparition des connexions, les scientifiques peuvent anticiper les voies d'entrée et de sortie des crises alimentaires.

CONCLUSIONS

Les systèmes alimentaires sont des réseaux complexes avec un nombre illimité d'actrices, d'acteurs et de relations. Bien que modéliser des systèmes aussi complexes reste un grand défi en recherche, les mathématiques peuvent détenir la clé d'une meilleure compréhension des systèmes alimentaires, et donc du bien-être des générations futures.

RÉFÉRENCES

- Lloyd's of London. 2015. *Food System Shock*. London, Lloyd's of London.
- Puma, M., Bose, S., Chon, Y., et Cook, B. 2015. Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environ. Res. Lett.*, Vol. 10, p. 024007.
- United Nations Statistics Division. 2021. *The Sustainable Development Goals Report 2021*. New York, UN Department of Economic and Social Affairs.

AUTEURS

Hans Engler
Université Georgetown, États-Unis

Hans Kaper
Université Georgetown, États-Unis





MODÉLISER DES ÉPIDÉMIES

PRÉVISION DE LA PROPAGATION D'UNE ÉPIDÉMIE

Un modèle mathématique simple permet de capter l'évolution typique d'une épidémie. Pendant la phase initiale, le nombre d'infections augmente de manière exponentielle. La courbe des infections atteint un pic et finit par s'aplatir lorsque le groupe de personnes non infectées est suffisamment réduit. De tels modèles permettent aux scientifiques d'estimer une mesure de la contagiosité d'un agent pathogène, de prévoir le moment où le nombre d'infections simultanées atteindra un pic, ainsi que l'intensité de ce pic. Les prévisions basées sur des modèles mathématiques permettent de prendre des décisions éclairées de santé publique en ce qui concerne la planification des pandémies, l'allocation des ressources et la mise en œuvre de mesures de distanciation physique et autres politiques visant à contenir la propagation de la maladie.

MODÈLES SEIRD

Pour les maladies comme la COVID-19 et la grippe saisonnière qui se propagent par contact de personne à personne, les modèles épidémiologiques de base subdivisent l'ensemble des individus en compartiments. Dans le modèle SEIRD, on a cinq compartiments : un individu peut être **s**usceptible, **e**xposé mais pas encore contagieux, **i**nfecté, **r**établi ou **d**écédé. Le modèle contient également une description des mécanismes par lesquels les individus passent d'un compartiment à l'autre, laquelle peut ensuite être utilisée pour prédire la propagation future de la maladie.

Le modèle SEIRD repose sur quatre paramètres clés :

- **le nombre de reproduction de base, ou R-zéro (R₀)** : le nombre moyen de personnes infectées par une seule personne infectée ;
- **la période de latence ou d'incubation** : la durée pendant laquelle une personne infectée n'est pas encore contagieuse ;
- **la période infectieuse** : la durée pendant laquelle une personne infectée est contagieuse ;
- **Le taux de létalité de l'infection** : le pourcentage de personnes infectées qui ne survivent pas.

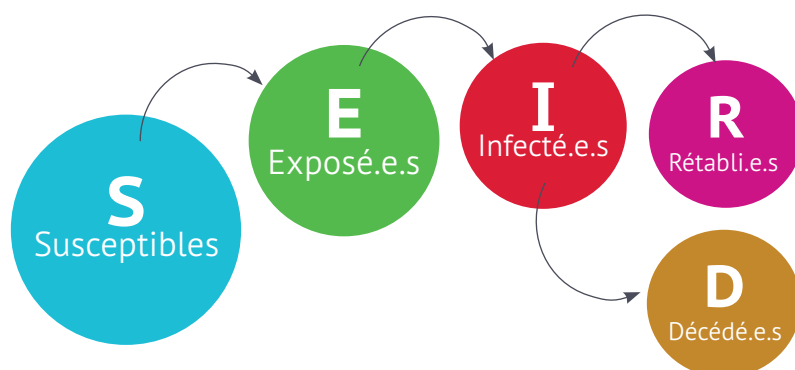
Une fois qu'on a acquis une certaine compréhension des mécanismes de transmission de la maladie, ces paramètres doivent être estimés à partir des données sur les infections, les hospitalisations et les décès au cours des premières semaines d'une épidémie. Le premier paramètre, R₀, découle du nombre moyen de rencontres par personne par jour et de la probabilité qu'une rencontre entraîne une infection.

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les modèles mathématiques constituent des outils précieux pour la prise de décisions en matière de santé publique, en prévoyant l'impact probable d'une épidémie, ainsi que l'efficacité des mesures de confinement et de prévention.
- ✓ Lorsque le nombre de reproduction de base (R₀) d'un agent pathogène passe en dessous de 1 dans un endroit donné, la propagation de l'infection ralentit et l'épidémie peut être contrôlée dans cette zone. Les mesures de distanciation physique se sont avérées capables de réduire la valeur de R₀.
- ✓ Lorsque la majorité d'une population est immunisée contre une maladie infectieuse, le reste de la population jouit d'une protection indirecte, ou immunité collective. Le pourcentage de la population immunisée nécessaire pour atteindre l'immunité collective dépend du degré d'infectiosité de l'agent pathogène ; il est typiquement de 60 à 90 %.

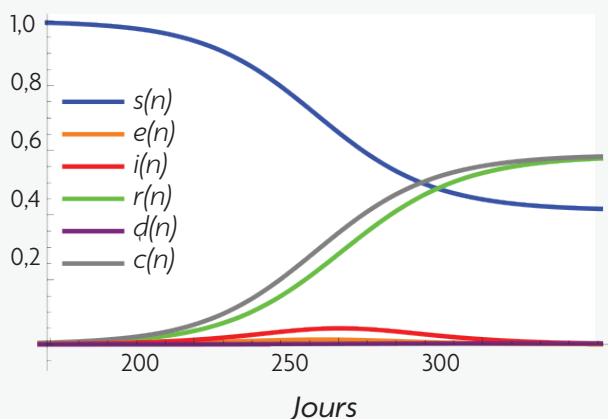
Si le nombre de reproduction de base est supérieur à 1, l'épidémie se développe ; s'il est inférieur à 1, l'épidémie s'éteint. Le nombre de reproduction de base (ou R₀) pour la grippe est de 1,5. Pour la rougeole, qui est hautement infectieuse, le R₀ varie de 12 à 18. Le R₀ de la COVID-19 a été difficile à estimer, à la fois à cause du grand nombre d'infections asymptomatiques faussant les mesures, et parce que la distanciation physique et les autres mesures de confinement modifient le nombre d'infections secondaires générées par une personne infectée. Néanmoins, le R₀ des premiers variants de la COVID-19 a été estimé à au moins 3,8, et la COVID-19 est donc beaucoup plus contagieuse que la grippe. Comme le R₀ de la COVID-19 est si élevé, tout relâchement des mesures de prévention provoque un redémarrage de l'épidémie.

MODÈLE SEIRD

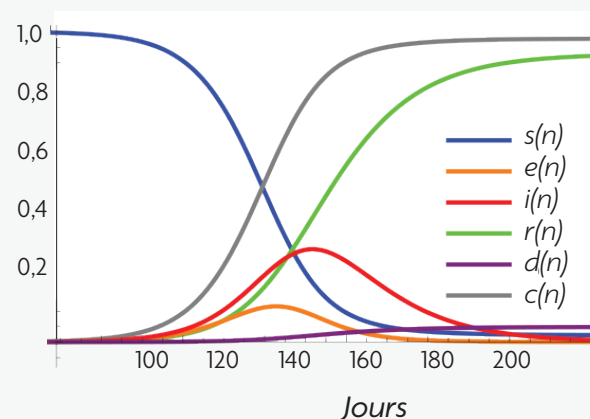


SIMULATIONS DE PROPAGATION DE MALADIES INFECTIEUSES

GRIPPE



COVID-19



AU-DELÀ DES COURBES

Les variables $s(n)$, $e(n)$, $i(n)$, $r(n)$ et $d(n)$ représentent les proportions de personnes susceptibles, exposées, infectées, rétablies et décédées le n -ième jour. Les graphiques ci-dessus illustrent des simulations de croissance pour la grippe et la COVID-19 sans mesures de distanciation physique. Les courbes grises représentent les cas cumulés, ou $c(n)$, et ce sont ces valeurs qui sont généralement partagées par les sources publiques.

La proportion de personnes infectées - représentée par la courbe rouge - croît jusqu'à un maximum puis décroît. En effet, à mesure que la proportion de la population immunisée augmente, la probabilité de rencontre entre personnes susceptibles et infectées diminue considérablement.

En l'absence de distanciation physique ou d'autres mesures préventives, 30 % de la population pourrait être infectée simultanément au pic de la COVID-19. À ce rythme, l'épidémie pourrait facilement submerger les systèmes de santé. En comparaison, seulement 5 % de la population pourrait être infectée simultanément par la grippe. En outre, lorsque les épidémies s'éteignent, 42 % de la population n'est pas affectée par la grippe, mais beaucoup moins pour la COVID-19.

L'immunité collective, c'est-à-dire le fait qu'une partie importante de la population soit immunisée contre une maladie infectieuse, conférant ainsi une protection indirecte aux personnes non immunisées, est un objectif de la plupart des campagnes de vaccination. Cependant, cette stratégie de santé publique n'est appropriée que lorsque R_0 est faible et que la maladie n'est pas grave. Dans le cas contraire, les risques de propagation et de décès évitables sont trop élevés.

CONCLUSIONS

Un modèle mathématique unique, simple mais robuste, peut mettre en évidence plusieurs caractéristiques d'une épidémie

qui sont essentielles à la prise de décision en matière de santé publique. Les valeurs des paramètres dépendent des caractéristiques biologiques de la maladie. À ce jour, de tels modèles ont été appliqués avec succès aux épidémies de SRAS, d'Ebola et de vache folle aux échelles nationales et mondiale.

On peut raffiner les modèles SEIRD et améliorer la précision en tenant compte, par exemple, des personnes symptomatiques et asymptomatiques, ou encore de la possibilité qu'une personne infectée puisse redevenir susceptible.

RÉFÉRENCES

Lloyd-Smith, J. O., Galvani, A. P., et Getz, W. M. 2003. Curtailing transmission of severe acute respiratory syndrome within a community and its hospital. *Proc. R. Soc. Lond. B*, Vol: 270, pp. 1979–1989.

Loli Piccolomini, E. et Zama, F. 2020. Monitoring Italian COVID-19 spread by a forced SEIRD model. *PLoS ONE*, Vol. 15, No. 8, p. e0237417. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237417>

Wang, P. et Jia, J. 2019. Stationary distribution of a stochastic SIRD epidemic model of Ebola with double saturated incidence rates and vaccination. *Adv Differ Equ.*, Vol. 433.

AUTRICE

Christiane Rousseau

Université de Montréal, Canada





LA PUISSANCE DES DONNÉES

LE SOUTIEN DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE LORS DE PANDÉMIE

L'accès à des données précises, complètes et opportunes est essentiel pour comprendre les caractéristiques d'une épidémie. Dans le cas de la pandémie de SRAS-CoV-2, il a été difficile d'obtenir des données cohérentes et de haute qualité, principalement en raison de la nature nouvelle du virus et du comportement résurgent de l'épidémie. En Afrique, ces difficultés sont encore exacerbées par la limitation des ressources et les problèmes de collecte des données. Une équipe pluridisciplinaire et multipartite a utilisé des techniques d'intelligence artificielle pour identifier des tendances dans les données de la COVID-19 et pour produire des analyses mathématiques adaptées aux conditions locales afin d'éclairer la prise de décision basée sur la science et de concevoir des stratégies de santé publique équitables et efficaces dans neuf pays africains.

La fourniture en temps réel d'informations crédibles est essentielle pour prévoir le plus tôt possible en tout temps l'évolution de l'épidémie et pour orienter les mesures de santé publique. Cependant, trop peu de données, recueillies trop lentement, peuvent affecter la précision des prédictions et l'efficacité des efforts d'atténuation.

Les progrès de l'intelligence artificielle (IA) peuvent combler les lacunes des données et améliorer la réponse à la pandémie à chaque étape. Les outils alimentés par l'IA ont permis de surveiller la propagation de la COVID-19 aux niveaux local et national, de prédire les pics à venir et leur intensité, d'identifier les points chauds, de guider l'achat et l'allocation des ressources de santé, d'éclairer les décisions et les politiques, tant pour la fermeture que pour la réouverture des établissements, et d'optimiser les stratégies de déploiement de la vaccination. Ces exemples, ainsi que d'autres applications de l'IA, ont été

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les technologies et les outils d'intelligence artificielle peuvent jouer un rôle clé dans la réponse aux pandémies et la prise de décision en santé publique.
- ✓ En Afrique, les chercheurs ont réussi à fournir des analyses alimentées par l'IA, opportunes et adaptées aux conditions locales pour surveiller la COVID-19, prédire les résurgences, isoler les points chauds et les éclosions, identifier les personnes à haut risque d'infection, stratifier les patients, identifier la vulnérabilité liée au genre et concevoir des mesures de santé publique et des stratégies de vaccination efficaces et équitables.
- ✓ La coopération et l'échange de données multidisciplinaires et multipartites, au niveau national et international, sont essentiels pour que les pays africains et le monde entier soient mieux préparés et plus aptes à répondre aux futures épidémies.

déployés avec succès en Afrique pour soutenir la prise de décision et les efforts de la communauté médicale et du public à chaque étape de la crise de la COVID-19.

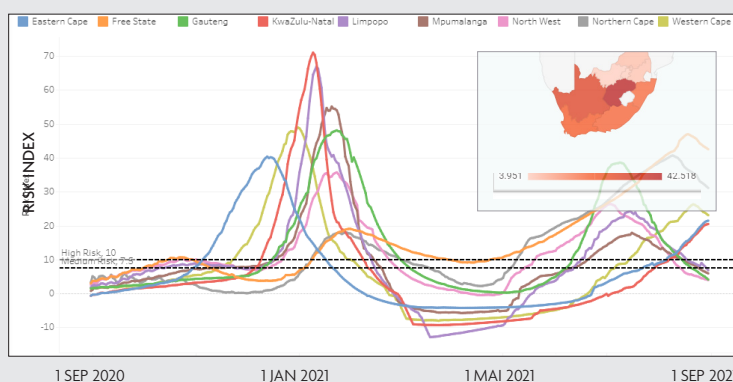
INNOVATION COLLABORATIVE

Le Consortium Afrique-Canada pour l'intelligence artificielle et l'innovation en matière de données (ACADIC) rassemble une équipe multidisciplinaire et multipartite de scientifiques, de mathématiciens, de responsables de la santé publique et de responsables communautaires pour échanger des données et

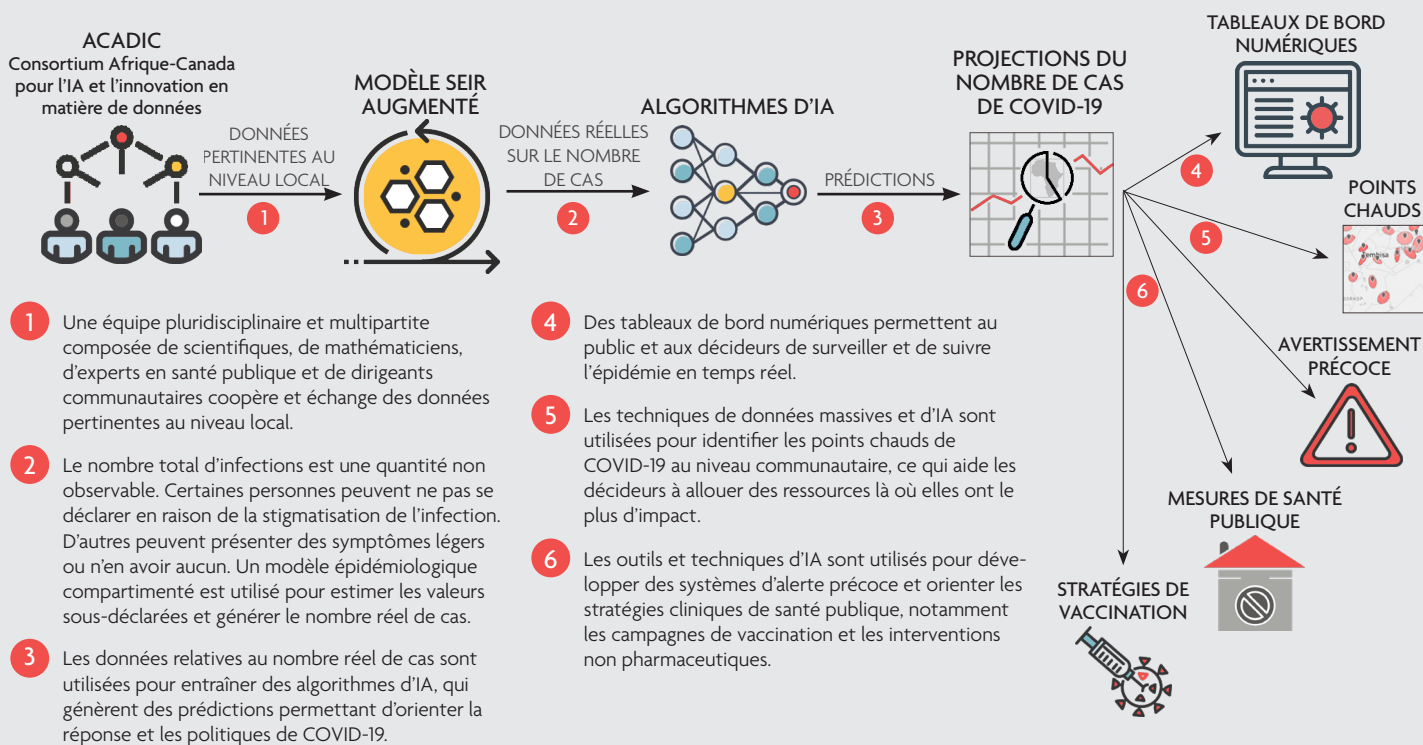
UN SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE

Étant donné la nature irrégulière et résurgente de l'épidémie de COVID-19, un système d'alerte précoce pour identifier les futures vagues est d'une importance capitale pour la prise de décision en matière de santé publique. À l'aide de modèles mathématiques et d'algorithmes d'IA, les scientifiques d'ACADIC ont développé un système d'alerte qui mesure le risque de futures vagues potentielles à l'aide d'indices de risque. L'IA est utilisée pour découvrir les interdépendances et les relations complexes entre les modèles de mobilité humaine, la rigueur des interventions non pharmaceutiques, et les données de cas positifs en temps réel. Ces résultats et d'autres sorties de modèles peuvent être visualisés dans le tableau de bord COVID-19 pour l'Afrique du Sud, qui fournit un suivi interactif en temps réel du virus pour le public et les décideurs politiques.

INDICE DE RISQUE DE 3E VAGUE PAR PROVINCE D'AFRIQUE DU SUD



SOUTENIR LA PRISE DE DÉCISION INFORMÉE PAR LES DONNÉES EN AFRIQUE



développer de nouveaux modèles mathématiques, d'intelligence artificielle et statistiques afin de surveiller la propagation de la COVID-19 et d'autres maladies infectieuses.

Le Consortium fournit aux organismes de santé de neuf pays africains des analyses de données adaptées aux conditions locales pour les aider à prendre les meilleures décisions et à adopter les meilleures politiques de santé publique au niveau local.

En identifiant et en analysant les points chauds, les éclosions et les futures vagues de COVID-19, le groupe aide les décideurs à mettre en œuvre de manière proactive des mesures de santé publique non pharmaceutiques pour empêcher que les cas ne dépassent la capacité des hôpitaux.

En utilisant des données multidimensionnelles provenant des autorités sanitaires locales, l'équipe a entraîné des réseaux neuronaux d'IA à identifier les groupes vulnérables et à haut risque. Ces résultats aident les décideurs à concevoir des stratégies de déploiement de la vaccination équitables et efficaces qui maximisent les effets des vaccins disponibles et garantissent que les communautés vulnérables ne sont pas oubliées. Les stratégies de déploiement équitables sont particulièrement importantes car la plupart des pays africains ont reçu très peu de vaccins.

Plusieurs consortiums régionaux comme celui décrit dans ce dossier ont été formés pour aider leurs décideurs respectifs à surveiller la COVID-19. Les cinq groupes — trois en Afrique et deux en Amérique latine — collaborent.

CONCLUSIONS

Les données massives et l'IA ont joué, et continuent de jouer, des rôles importants dans la pandémie de SRAS-CoV-2. En Afrique, ces outils et techniques peuvent fournir aux décideurs politiques une analyse plus précise, plus opportune et plus adaptée au contexte local pour éclairer la prise de décisions

efficaces et équitables en matière de santé publique. Il est essentiel d'intégrer l'expertise et les idées de multiples disciplines et pays aux données et de s'assurer du soutien des responsables locaux pour que les pays africains - et le monde entier - soient mieux préparés et plus aptes à répondre aux futures épidémies.

RÉFÉRENCES

AAAS. 2021. *Artificial Intelligence and COVID-19: Applications and Impact Assessment*.

Lieberman, B., Gusinow, R., Asgary, A., Bragazzi, N. L., Choma, N., Dahbi, S. E., Hayasi, K., Kar, D., Kawonga, M., Kong, J. D. et al. 2021. *Big data and artificial intelligence-based hot-spot analysis of Covid-19: Gauteng, South Africa, as a Case Study*.

Mellado, B., Wu, J., Kong, J. D., et al. 2021. Leveraging artificial intelligence and big data to optimize COVID-19 clinical public health and vaccination roll-out strategies in Africa. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 18, p. 7890.

Stevenson, F., Hayasi, K., Bragazzi, N. L., Kong, J. D., et al. 2021. Development of an early alert system for an additional wave of COVID-19 cases using a recurrent neural network with long short-term memory. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 18, p. 7376.

AUTEURS

Jude Kong

ACADIC & Université York, Canada

Bruce Mellado

ACADIC & Université du Witwatersrand, Afrique du Sud

Jianhong Wu

ACADIC & Université York, Canada





AMÉLIORER LES PRÉVISIONS

ASSIMILATION DES OBSERVATIONS ET DES SIMULATIONS EN TEMPS DE PANDÉMIE

62.4746

1.5310

Au plus fort de la pandémie de COVID-19, une équipe internationale de mathématiciens a emprunté des techniques aux géosciences pour prévoir la dynamique complexe et changeante de la propagation du virus. Cette technique, connue sous le nom d'assimilation de données, combine les données des modèles numériques avec de nouvelles données d'observation afin de fournir des prévisions plus précises. En validant la méthode dans huit pays distincts, l'équipe a démontré qu'elle pouvait prédire de manière raisonnablement précise les impacts à court terme de diverses mesures de réouverture sur la transmission du virus. Cette méthode peut fournir des informations essentielles aux décideurs politiques pour prendre des décisions éclairées et concevoir des politiques efficaces afin d'atténuer les impacts de la pandémie.

COMBINER LE MEILLEUR DES DEUX

Alors que les scientifiques s'efforçaient de comprendre le SRAS-CoV-2, les décideurs et le public se demandaient, à juste titre, combien d'autres personnes risquaient de mourir, et quel effet auraient les politiques gouvernementales de confinement sur la propagation du virus. Pour répondre à ces questions, les scientifiques se tournent vers des modèles numériques, qui décrivent les relations entre les paramètres ou les variables de l'épidémie, et les données d'observation, telles que le nombre d'hospitalisations et de décès.

Ni les modèles numériques ni les données d'observation ne peuvent à eux seuls répondre avec précision à de telles questions, mais en combinant objectivement les deux, les scientifiques peuvent tirer le meilleur parti de chacun, tout en minimisant leurs défauts respectifs. Cette technique, connue sous le nom d'assimilation de données, est utilisée couramment dans les géosciences, et son application la plus réussie est celle aux prévisions météorologiques modernes. Grâce à l'amélioration des modèles numériques et à l'assimilation des données, les prévisions météorologiques à cinq jours sont aujourd'hui aussi précises que les prévisions à un jour l'étaient en 1980.

Outre l'amélioration de la précision des prévisions, l'assimilation des données permet une estimation robuste de l'incertitude des résultats, un avantage considérable par rapport à des modèles plus simples. En particulier, elle permet de prévoir les situations les plus défavorables, les plus favorables et les plus probables.

UNE INITIATIVE INTERNATIONALE

Au printemps 2020, des spécialistes de l'assimilation des données de huit pays, regroupés en une équipe internationale, ont mis sur pause leurs travaux dans les domaines des sciences de la Terre

MESSAGES CLÉS

- ✓ Une équipe internationale de mathématiciens a utilisé des méthodes d'assimilation des données venant des géosciences pour améliorer la précision des prévisions des modèles épidémiologiques traditionnels.
- ✓ L'équipe a introduit une variante du modèle SEIR, une approche mathématique standard pour prévoir la transmission des maladies infectieuses. En combinant les informations du modèle avec de nouvelles données d'observation concernant le nombre de décès et d'hospitalisations, l'équipe a produit, pour huit pays distincts, des prédictions réalistes de l'évolution de la pandémie, avec des estimations quantifiées de l'incertitude.
- ✓ Les méthodes mathématiques d'assimilation des données peuvent jouer un rôle important dans la prévision de l'évolution d'une pandémie.
- ✓ La méthode peut fournir aux décideurs politiques des prévisions en temps réel, fondées sur des données, afin de mettre en œuvre des interventions efficaces pour contrôler la propagation d'une pandémie et atténuer ses impacts.

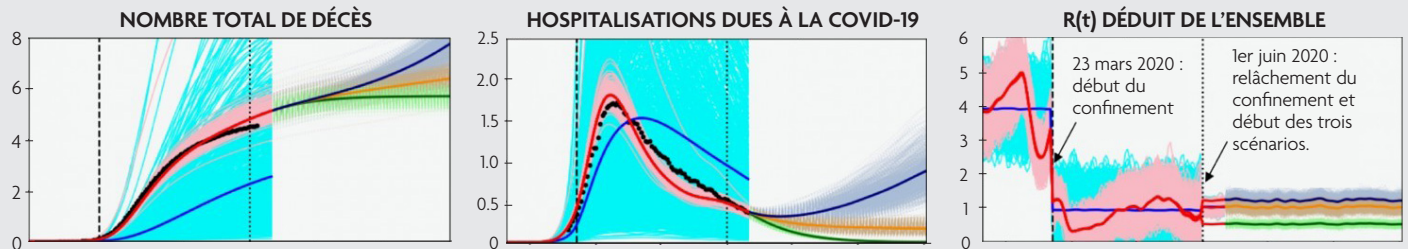
pour explorer si les outils d'assimilation de données pouvaient être appliqués à la modélisation des pandémies dans leurs pays respectifs. L'évolution de l'épidémie étant très variable d'un pays à l'autre, l'équipe a donc commencé par identifier les facteurs susceptibles de contribuer à la transmission du virus, tels que la géographie, la densité de population, les habitudes sociales, les systèmes de soins de santé et, surtout, les politiques gouvernementales et les stratégies d'atténuation, notamment les mesures de confinement.

L'équipe a constaté qu'elle pouvait utiliser l'assimilation de données pour expliquer les décès et les hospitalisations signalés à l'aide d'un modèle classique de métapopulation, un type de modèle spatial qui explore les interactions des sous-populations dans le temps et l'espace. Leur modèle est une version du modèle à compartiments susceptible-exposé-infecté-rétabli (SEIR) adapté à la COVID-19 : inclusion d'une stratification par âge et par sexe, et compartiments supplémentaires pour les personnes en quarantaine, hospitalisées et décédées.

Grâce à cette approche, l'équipe a réussi à représenter l'impact des diverses interventions dans leurs huit pays respectifs et à visualiser la chute rapide de la transmission de personne à personne à différents endroits, suite au confinement de chaque pays. Étant donné le succès de l'assimilation des données pour expliquer les décès signalés, l'équipe a ensuite élaboré des prévisions pour différents scénarios possibles, tels que les stratégies de réouverture et les campagnes de vaccination.

ÉTUDE DE CAS : ÉVOLUTION DE L'ÉPIDÉMIE DE COVID-19 EN ANGLETERRE

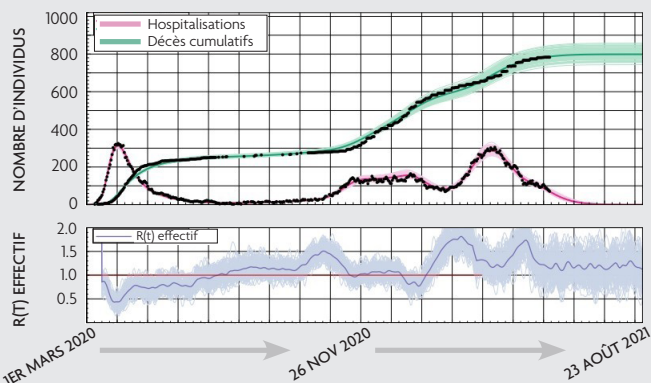
Pour l'Angleterre, les simulations commencent le 20 février 2020 et assimilent les données sur un cycle quotidien à partir du 5 mars 2020. Les données quotidiennes du nombre total de décès sont assimilées du 5 mars au 29 mai, ainsi que le nombre quotidien d'hospitalisations du 20 mars au 29 mai. Pendant la période d'assimilation, les données sont assimilées séquentiellement au fur et à mesure qu'elles deviennent disponibles à un rythme quotidien. La solution finale d'assimilation sur l'ensemble de la période de données tient compte de toutes les observations. Les données postérieures au 29 mai ne sont pas utilisées dans l'assimilation, et les simulations sont exécutées sans contrainte. Trois scénarios possibles ont été envisagés à partir du 1er juin 2020, date à laquelle les restrictions de fermeture ont commencé à s'atténuer. Les scénarios ont été définis en fonction de la valeur R, qui représente le nombre moyen de personnes infectées par une personne infectée au temps présent. Trois valeurs ont été choisies : 1) R égal à 0,5, pour laquelle les cas diminuent au fil du temps ; 2) R égal à 1, pour laquelle le nombre de cas reste stable au fil du temps ; et 3) R égal à 1,2, pour laquelle le nombre de cas augmente au fil du temps. Le 1er juin 2020, environ 45 000 décès en Angleterre ont été attribués à la COVID-19 dans tous les milieux. Les analyses de l'équipe selon les trois scénarios prévoient qu'au 1er septembre 2020, le nombre total de décès serait égal à $57\,000\,00 \pm 1\,900$ (R=0,5), $63\,600 \pm 2\,700$ (R=1) et $76\,400 \pm 4\,900$ (R=1,2). Ces résultats soulignent la possibilité de sauver des dizaines de milliers de vies en utilisant des mesures de confinement qui réduisent considérablement les contacts de personne à personne.



Les points noirs représentent les valeurs rapportées jusqu'au 5 juin pour les décès, et jusqu'au 12 juin pour les hospitalisations. Les lignes bleu vif indiquent les estimations initiales, et les lignes rouges les valeurs après assimilation, la ligne en gras indiquant la valeur la plus probable. Après le 1er juin, trois prédictions sont faites sur la base de trois valeurs de R différentes : R=1,2 (bleu marine), R=1 (jaune), et R=0,5 (vert).

ÉTUDE DE CAS : EFFETS DE LA CAMPAGNE DE VACCINATION EN NORVÈGE

En utilisant des méthodes d'assimilation de données plus sophistiquées, l'équipe a modélisé l'effet prévu de la campagne de vaccination en Norvège. Cette nouvelle version du modèle illustre la capacité à prévoir l'évolution de la pandémie sur une période plus longue. Dans ce cas, les incertitudes des prédictions reflètent les incertitudes du modèle simple et des valeurs rapportées pour les décès, les hospitalisations et les cas positifs.



En haut : Total des hospitalisés et des décès (les points noirs sont les observations). En bas : Nombre de reproduction R. Dans les deux panneaux, les ombres montrent les incertitudes estimées.

CONCLUSIONS

Les méthodes d'assimilation de données numériques et mathématiques, si standards en géosciences, se sont avérées extraordinairement polyvalentes. Elles offrent un

moyen dynamique et statistiquement valable de combiner de multiples mesures de la pandémie avec des modèles numériques de son évolution. En quantifiant les incertitudes des modèles et des observations et en incluant de nouvelles données épidémiques en temps réel, l'équipe a fourni des prévisions fiables à court terme sur des indicateurs de la pandémie - décès, infections et hospitalisations - et des estimations de la précision de ces indicateurs. Pour chacun des huit pays, l'équipe a démontré la capacité de la méthode à détecter l'impact des interventions gouvernementales dans chaque région sur l'évolution de la pandémie de SRAS-CoV-2.

RÉFÉRENCES

- Carrasi, A., Bocquet, M., Bertino, L. et Evensen, G. 2018. Data assimilation in the Geosciences: An overview on methods, issues and perspectives. *WIREs Climate Change*, Vol. 9, 50 pp.
- Evensen, G., Amezcua, J., Bocquet, M., Carrasi, A., Farchi, A., Fowler, A., et al. 2021. An international initiative of predicting the SARS-CoV-2 pandemic using ensemble data assimilation. *Foundations of Data Science*, Vol. 3, No. 3, pp. 413-477.

AUTEURS ET AUTRICE

Geir Evensen
NORCE et NERSC, Bergen, Norvège

Javier Amezcua
Université de Reading et NCEO, Royaume-Uni

Alberto Carrasi
Université de Bologne, Italie

Alison Fowler
Université de Reading et NCEO, Royaume-Uni





MIEUX CONCEVOIR LES VACCINS

LES MATHÉMATIQUES ACCÉLÈRENT LES INNOVATIONS MÉDICALES

Les mathématiques sont de plus en plus utilisées pour apporter un nouvel éclairage dans une série de problématiques de santé publique, notamment dans la découverte, le développement et l'expérimentation de vaccins. Combinées aux technologies émergentes, les approches mathématiques aident les scientifiques à décoder les séquences génétiques des pathogènes. Des algorithmes sophistiqués sont ensuite utilisés pour identifier les parties de l'agent pathogène qui seront reconnues par le système immunitaire de l'organisme. Les modèles mathématiques et statistiques sous-tendent également les procédures de test et l'analyse des données. En accélérant et améliorant la conception de nouveaux vaccins efficaces et en permettant de revoir la conception des vaccins existants, les mathématiques réduisent la menace d'épidémies et améliorent la santé mondiale.

Les vaccins font partie des réalisations les plus importantes de l'époque moderne en matière de santé publique. Avant les innovations en matière de vaccins, les épidémies de maladies infectieuses avaient des conséquences profondes et durables sur les économies et le développement mondiaux et, dans certains cas, décimaient les populations. Entre 1346 et 1353, la pandémie de peste noire a fait rage au Moyen-Orient, en Afrique du Nord et en Europe, tuant environ 40 à 60 % de la population. La grippe espagnole, une pandémie d'influenza, s'est répandue dans le monde entier de 1918 à 1919, tuant environ 50 millions de personnes. Et en 2021, la pandémie de SRAS CoV-2 a fait plus de 5 millions de morts, bien que les experts suggèrent que ce chiffre est probablement beaucoup plus élevé.

L'IMMUNOLOGIE DE LA VACCINATION

Un organisme se protège des agents pathogènes grâce à des mécanismes de défense qui empêchent physiquement les virus ou les bactéries de pénétrer dans l'organisme, ou encore les identifient et les détruisent s'ils y parviennent.

Le système immunitaire humain utilise deux stratégies principales. En cas d'exposition à un agent pathogène inconnu jusqu'alors, l'organisme répond d'abord par une réponse immunitaire innée et généraliste, laissant au corps le temps de mettre en place une réponse plus importante et plus spécifique. La réponse immunitaire adaptative de deuxième ligne résulte de la production d'anticorps spécifiques de l'antigène. Une fois que le système immunitaire adaptatif est mis en place, il est capable de se défendre rapidement et efficacement contre le même agent pathogène en cas de nouvelle infection. Les vaccins utilisent cette réponse de deuxième ligne en exposant l'organisme à un agent d'amorçage qui suscite une réaction immunitaire, ce qui entraîne le système immunitaire adaptatif à reconnaître et à attaquer les agents pathogènes sans causer la maladie.

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les vaccins ont contribué à sauver des millions de vies, à réduire les coûts des soins de santé et à améliorer la qualité de la vie humaine et animale. Ils contribuent au développement économique et social et sont essentiels pour atteindre les objectifs de développement durable.
- ✓ La modélisation mathématique permet de développer efficacement des vaccins en captant la dynamique immunologique complexe et en prédisant quelles parties d'un agent pathogène seront les plus susceptibles d'induire une réponse immunogène.
- ✓ Les modèles mathématiques et statistiques peuvent aider à concevoir les essais cliniques et les études d'efficacité des vaccins, et à analyser leurs résultats, de façon à les rendre plus sûrs et plus efficaces.
- ✓ Des algorithmes mathématiques sophistiqués peuvent rapidement déchiffrer les séquences du génome des agents pathogènes et prédire ou suivre les modifications de ces séquences susceptibles de réduire l'efficacité des vaccins. Ces analyses sont utilisées pour sélectionner de nouveaux modèles de vaccins.

MESURER LA PROTECTION

La démonstration de l'efficacité des vaccins est fondamentale pour aider à informer les responsables politiques sur l'utilisation et la valeur potentielles des vaccins. Les méthodes statistiques permettent de concevoir des essais cliniques et d'analyser les données. L'efficacité des vaccins (EV) est mesurée en calculant le risque de maladie chez les individus vaccinés et non vaccinés et en déterminant le pourcentage de réduction du risque de maladie chez les individus vaccinés par rapport aux individus non vaccinés. L'équation mathématique de base s'écrit comme suit :

$$EV = \frac{\text{incidence dans le groupe non vacciné} - \text{incidence dans le groupe vacciné}}{\text{incidence dans le groupe non vacciné}}$$

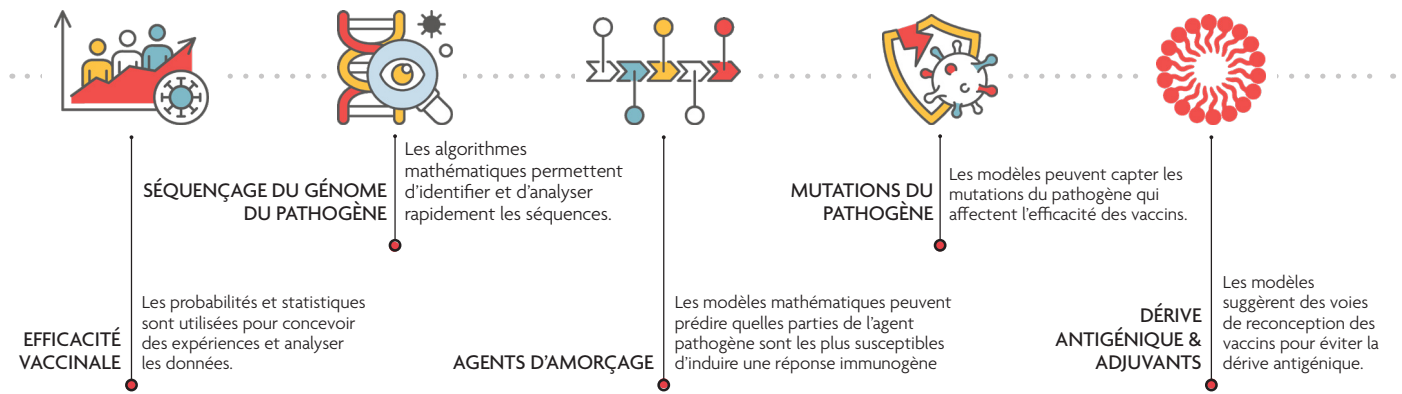
← exprimée en pourcentage

Plus le pourcentage de réduction de l'infection cible est élevé dans le groupe vacciné, plus l'efficacité du vaccin est grande.

IMMUNOLOGIE COMPUTATIONNELLE

Les approches mathématiques facilitent l'identification rapide et l'analyse des séquences génomiques des agents pathogènes, permettant le développement efficace et la conception de vaccins. Les premières séquences génétiques du virus du SRAS-CoV-2 ont été déterminées par séquençage par nanopores, une technique dans laquelle des brins simples de molécules d'ADN ou d'ARN sont passés à travers un minuscule canal - un

LES APPROCHES MATHÉMATIQUES GUIDENT LA CONCEPTION ET LE DÉVELOPPEMENT DES VACCINS



nanopore - intégré à une membrane résistante à l'électricité. Lorsque la molécule passe à travers le nanopore, elle provoque des perturbations dans le courant électrique. Les données brutes du signal de perturbation sont ensuite converties en une séquence à l'aide d'algorithmes mathématiques sophistiqués. Chaque base nucléique passant à travers le nanopore peut être identifiée en temps réel par sa sous-séquence de perturbation caractéristique.

Les modèles mathématiques utilisent ces données de séquences génétiques pour repérer les parties de l'agent pathogène qui sont des agents d'amorçage appropriés, réduisant ainsi le temps et le coût de méthodes coûteuses. Les récentes avancées technologiques permettent de livrer ces agents d'amorçage en utilisant la forme moléculaire de l'ARN messager. Les améliorations apportées aux vaccins à ARN messager ont permis de développer les vaccins pour la COVID-19 à une vitesse record.

TRAQUER LES MUTATIONS

Les agents pathogènes mutent pour échapper à l'immunité naturelle ou déclenchée par un vaccin. Dans de nombreux cas, ces changements génétiques acquis donnent à l'agent pathogène les moyens de contourner la réponse immunitaire de l'organisme déclenchée par le vaccin, ceci nécessitant une adaptation du vaccin pour rétablir son efficacité.

Des modèles mathématiques sont utilisés pour construire des arbres phylogénétiques qui illustrent le lien entre les séquences génétiques des virus en circulation et celles du virus visé à l'origine par le vaccin. Les modèles sont également utilisés pour prédire dans quelle mesure ces modifications génétiques réduisent l'efficacité des vaccins et pour sélectionner de nouveaux modèles de vaccins. Le vaccin contre la grippe, par exemple, doit être revu et mis à jour chaque année pour suivre le rythme des mutations rapides du virus de la grippe. Des stratégies similaires sont utilisées pour surveiller les mutations du virus du SRAS-CoV-2 afin de déterminer dans quelle mesure elles compromettent l'efficacité des vaccins existants.

ÉVITER LE PÉCHÉ ORIGINAL

Des études ont démontré que des vaccins remaniés peuvent prémunir le système immunitaire contre la souche pathogène originale et ne conférer qu'une immunité sous-optimale contre les nouveaux variants. Des modèles mathématiques révèlent

que ce phénomène, appelé « péché antigénique original », peut être atténué si les conditions d'amorçage impliquent des adjuvants qui activent fortement les systèmes de défense de première ligne. Cette percée offre une voie pour concevoir de nouveaux vaccins tout en évitant au péché antigénique original de saper l'efficacité des vaccins. Les vaccins à ARN messager ont tendance à activer les systèmes de défense de première ligne mieux que les autres types de vaccin, ce qui suggère que ces vaccins pourraient être moins affectés par le péché antigénique original.

CONCLUSIONS

Les vaccins constituent l'un des moyens les plus rentables de sauver des vies. Les approches mathématiques et statistiques ont permis d'accélérer et d'améliorer la conception, le développement, les tests et l'administration des vaccins; elles ont rendu les vaccins plus sûrs et plus efficaces et, ce faisant, ont transformé des vies.

RÉFÉRENCES

- Frimpong, A, et al. 2018. Novel strategies for malaria vaccine design. *Front Immunol*, Vol. 9, p. 2769.
- Ndifon, W. 2015. A simple mechanistic explanation for original antigenic sin and its alleviation by adjuvants. *J R Soc Interface*, Vol. 12, No. 112.
- Rappuoli, R. 2000. Reverse vaccinology. *Curr Opin Microbiol*, Vol. 3, No. 5, pp. 445-450.
- Taubenberger, J. K. et Morens, D. M. 2006. 1918 Influenza: the mother of all pandemics. *Emerg Infect Dis.*, Vol. 12, pp. 15-22.

AUTEUR

Wilfred Ndifon
AIMS Global Network, Rwanda





MODÉLISER L'HÉSITATION VACCINALE

COMPRENDRE LES RESQUILLEURS DE L'IMMUNITÉ DE GROUPE

Les vaccins sont incontestablement l'une des plus grandes avancées médicales des temps modernes, sauvant annuellement des millions de vies dans le monde. Depuis le 20^e siècle, dix maladies historiquement mortelles ont été presque ou totalement éradiquées. La variole a été éradiquée de la Terre en 1980, la rougeole a été éliminée dans de nombreux pays dans les années 1990, et la polio a presque disparu. Mais une recrudescence d'hésitation à l'égard des vaccins menace maintenant de faire dérailler les campagnes de vaccination. Les mathématiques peuvent aider à comprendre les interactions fondamentales entre la propagation des maladies et le comportement envers les vaccins. Ces connaissances peuvent améliorer les stratégies de santé publique pour éliminer localement et éradiquer mondialement des maladies infectieuses.

PROTÉGER LE GROUPE

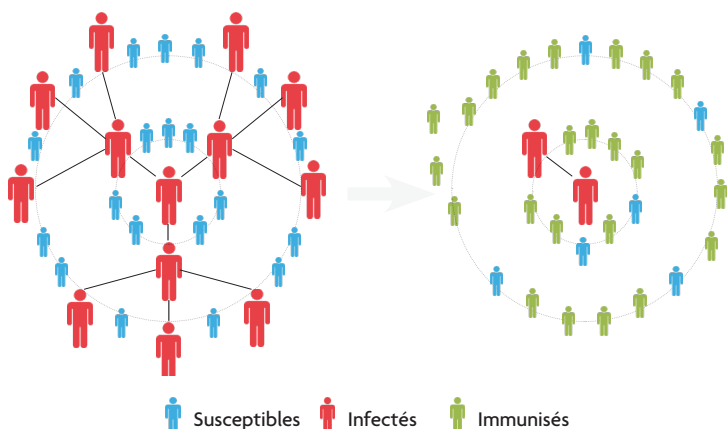
Un objectif important de nombreuses campagnes de vaccination est d'augmenter l'immunité de la population. Pour illustrer le pouvoir des vaccins, imaginez un scénario dans lequel une personne moyenne a typiquement dix contacts par jour. Imaginons que chaque personne infectée par la maladie la transmette à trois autres personnes en moyenne. Ces trois personnes infecteront chacune trois autres personnes, qui elles-mêmes en infecteront trois autres, et ainsi de suite, ce qui donne lieu à une épidémie. Dans ce scénario, trois est le nombre reproductif de base, ou R_0 , de l'infection, c'est-à-dire le nombre moyen d'infections secondaires générées par chaque infection.

Supposons maintenant que 80 % de la population a été vaccinée et ne peut pas être infectée ou transmettre l'infection à d'autres

VISUALISER L'EFFET DES CAMPAGNES DE VACCINATION

PAS DE VACCIN ($R_0=3$)
L'épidémie croît exponentiellement

VACCINATION À 80% ($R_0<1$)
L'épidémie s'éteint



MESSAGES CLÉS

- ✓ L'hésitation à se faire vacciner est un problème de santé publique mondial, affectant des pays à tous les niveaux de développement.
- ✓ En synthétisant les aspects économiques et psychologiques du comportement humain avec la dynamique épidémiologique, les modèles mathématiques peuvent fournir de nouvelles perspectives qui aident à expliquer la prise de décision humaine en matière de vaccination.
- ✓ Les modèles de théorie des jeux prévoient souvent une augmentation de l'hésitation vaccinale à mesure que les infections diminuent. Lorsque la population se rapproche du seuil d'immunité collective, tout risque vaccinal perçu finira par l'emporter sur le risque d'infection qui diminue progressivement. Par conséquent, l'intérêt personnel pourrait empêcher l'éradication complète des maladies évitables par la vaccination.
- ✓ La conception des programmes d'élimination locale et d'éradication mondiale des infections évitables par la vaccination doit à la fois anticiper et proposer des stratégies pour contrer l'hésitation vaccinale lorsqu'on approche du seuil d'immunité collective.

personnes. Le nombre d'infections causées par une personne infectée diminue drastiquement, prenant le plus souvent la valeur 0 et, occasionnellement, la valeur 1. Même si une nouvelle personne était infectée, ce nouveau cas d'infection ne causerait, à son tour, que zéro ou un seul cas supplémentaire. Finalement, la maladie s'éteindrait car les quelques personnes qui ne sont pas immunisées sont moins susceptibles d'entrer en contact avec une personne infectée. La proportion p de personnes immunisées nécessaire pour atteindre ce point d'« immunité collective » est calculée approximativement par une formule mathématique simple :

$$p = 1 - 1/R_0$$

AMENER LES PRISONNIERS DU DILEMME À COOPÉRER

La théorie mathématique des jeux a une tradition de longue date dans la théorie économique. À la base, elle modélise le comportement humain compétitif et coopératif, où chaque individu fait des choix, et où le gain de chaque choix dépend des choix effectués par les autres. Le dilemme du prisonnier est un exemple classique : deux suspects sont arrêtés et séparés par la police. Chacun doit décider s'il avoue le crime sans savoir ce que l'autre fera. Le gain pour chacun dépend de son choix et du choix fait par l'autre.

	B	Suspect B se tait	Suspect B dénonce
A			
Suspect A se tait		2 ans	1 an
Suspect A dénonce		4 ans	3 ans

Le suspect A réfléchit : « Si B décide de me trahir, je devrais aussi le trahir et écoper de trois ans de prison, au lieu de rester silencieux et d'écoper de quatre ans. Et si B décide de garder le silence, je devrais quand même le trahir pour écoper d'un an seulement de prison au lieu de deux ans si je reste silencieux. Dans tous les cas, mon intérêt est de trahir. » Le suspect B pense la même chose. En conséquence, ils écoperont chacun de trois ans de prison, alors qu'ils n'auraient écoperé que de deux ans s'ils avaient tous deux gardé le silence.

Ces situations, dans lesquelles le résultat est moins optimal pour le bien commun, illustrent le problème du parasitisme dans la vaccination. En théorie économique, les resquilleurs bénéficient de biens publics mais ne les paient pas ou les paient moins. Dans le cadre d'une épidémie, les resquilleurs sont ceux qui profitent des avantages de la vaccination d'autres personnes (réduction de la maladie et une éventuelle immunité collective) mais refusent d'accepter le faible coût de la vaccination.

Les modèles de la théorie des jeux ne sont pas destinés à représenter parfaitement la réalité. Les personnes qui hésitent à se faire vacciner constituent un groupe aux motivations diverses. Seuls quelques individus fortement anti-vaccins ne seront jamais convaincus, alors que beaucoup d'autres sont prêts à se faire vacciner dans des circonstances appropriées. De même, les vaccins ne sont pas tous identiques : certains préviennent les maladies mais ne bloquent pas leur transmission. En outre, les populations sont soumises à divers effets tels que les normes sociales et l'apprentissage social qui peuvent en fin de compte favoriser la vaccination. Simplifications mises à part, la théorie des jeux met en lumière un facteur sous-jacent qui entraîne une plus grande hésitation vaccinale près du seuil d'immunité collective. Et l'approche de la théorie des jeux ne nécessite pas de supposer que les individus pensent comme les théoriciens des jeux, mais seulement qu'ils remarquent une baisse des infections et perçoivent une réduction du risque d'infection lorsque le taux de vaccination augmente.

Les mathématiciens développent activement des modèles plus sophistiqués qui rendent compte de caractéristiques réalistes, comme l'apprentissage social. Il a été démontré que ces modèles expliquent mieux les données relatives à la vaccination des enfants que les modèles qui ignorent la théorie évolutive des jeux. Des cadres similaires sont appliqués à un plus large éventail de questions, telles que la compréhension des interactions entre les impacts du changement climatique et l'opinion publique sur l'atténuation du changement climatique. Ces modèles socio-climatiques couplés montrent que les processus sociaux peuvent considérablement modifier le pic prévu du réchauffement des températures.

CONCLUSIONS

Les outils mathématiques offrent la puissance et la flexibilité nécessaires pour décrire, étudier et résoudre des problèmes dans un éventail de problématiques complexes, tels que le changement climatique et l'adoption des vaccins sous l'angle de la théorie des jeux. Les modèles transdisciplinaires de théorie des jeux peuvent fournir des informations précieuses pour la prise de décisions en santé publique. À mesure qu'on se rapproche de l'immunité collective, les décideurs doivent s'attendre à une augmentation de l'hésitation vaccinale alors que les taux d'infection diminuent. Les programmes d'éradication mondiale et d'élimination locale peuvent anticiper une telle éventualité et développer les moyens d'y faire face. Les campagnes de vaccination doivent prioriser les défis logistiques liés à la vaccination des populations difficiles à atteindre, prendre soin de communiquer avec les personnes prêtes à écouter et hésitantes à se faire vacciner, et inspirer la confiance.

RÉFÉRENCES

- Brauer, F., Castillo-Chavez, C., et Feng, Z. 2019. Introduction: A Prelude to Mathematical Epidemiology. *Mathematical Models in Epidemiology*. New York, Springer, pp. 3-19.
- Bauch, C. T. et Earn, D. 2004. Vaccination and the theory of games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 101, No. 36, pp. 13391-13394.
- MacDonald, N. E. 2015. Vaccine hesitancy: definition, scope and determinants. *Vaccine*, Vol. 33, No. 34, pp. 4161-4164.
- Bauch, C. T. et Bhattacharyya, S. 2012. Evolutionary game theory and social learning can determine how vaccine scares unfold. *PLoS computational biology*, Vol. 8, No. 4, e1002452.
- Bury, T. M., Bauch, C. T., et Anand, M. 2019. Charting pathways to climate change mitigation in a coupled socio-climate model. *PLoS computational biology*, Vol. 15, No. 6, e1007000.
- Beckage, B. et al. 2018. Linking models of human behaviour and climate alters projected climate change. *Nature Climate Change*, Vol. 8, No. 1, pp. 79-84.

AUTEUR

Chris Bauch
Université de Waterloo, Canada



ENSEIGNER LES MATHÉMATIQUES

L'ENSEIGNEMENT DES MATHÉMATIQUES POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Assurer un accès équitable à une éducation de qualité pour tous les enfants est un objectif urgent pour le développement durable. Les mathématiques sont importantes car elles imprègnent tous les aspects de la vie quotidienne, et l'apprentissage des mathématiques permet de développer les compétences du 21^e siècle liées à la pensée critique et à la résolution de problèmes. Bien qu'il puisse être difficile de démêler la myriade de facteurs sociaux, économiques et institutionnels qui influencent les résultats des élèves, il est clairement établi que les enseignants ont une influence déterminante sur l'apprentissage des élèves au niveau de la classe et de l'école. La qualité des enseignants de mathématiques est particulièrement importante car les résultats en mathématiques ont un impact significatif sur les chances de succès des jeunes dans la vie après l'école.

L'accès équitable à une éducation de qualité a un impact positif sur un large éventail d'objectifs de développement durable, tels que la réduction de la pauvreté intergénérationnelle et la promotion d'une meilleure santé, de la diversité culturelle et de l'égalité des sexes.

Il est particulièrement important de permettre à tous les enfants d'avoir accès à un enseignement des mathématiques de qualité. Les élèves qui quittent l'école avec de mauvais résultats en mathématiques fondamentales sont plus susceptibles de connaître le chômage ou un emploi mal payé, d'avoir une mauvaise santé physique ou mentale, et d'avoir un faible niveau de participation civique. Les mathématiques constituent également la base essentielle à une citoyenneté critique et facilitent l'apprentissage tout au long de la vie dans un monde caractérisé par des changements technologiques, sociaux et économiques rapides. Le succès d'un enseignement des mathématiques se mesure à la capacité des élèves à transférer leurs connaissances et à résoudre des problèmes dans de nouvelles situations. Les enseignants sont la clé pour atteindre ces objectifs.

La qualité d'un système éducatif ne peut dépasser, ni la qualité de ses enseignants, ni la qualité de son enseignement.

— UNESCO

LE PROBLÈME DU VIVIER D'ENSEIGNANTS DE MATHÉMATIQUES

Cependant, il existe une pénurie mondiale d'enseignants de mathématiques, ce qui constitue des défis pour un enseignement mathématique de qualité.

MESSAGES CLÉS

- ☑ L'enseignement des mathématiques développe les aptitudes de résolution de problèmes et de réflexion critique, lesquelles peuvent être adaptées à de nouvelles situations et à un éventail de domaines professionnels.
- ☑ L'enseignement des mathématiques est important pour former des citoyens réfléchis et critiques, capables de faire face aux exigences de numératie de la vie quotidienne, ainsi que pour préparer un nombre suffisant de mathématiciens et de scientifiques capables de relever les défis du monde contemporain.
- ☑ Des enseignants de mathématiques de qualité sont la clé pour améliorer les résultats d'apprentissage des jeunes et leur mobilité socioéconomique. Les gouvernements doivent s'attaquer à la pénurie mondiale d'enseignants de mathématiques de qualité, laquelle menace la réalisation de ces objectifs.
- ☑ La qualité de l'enseignement des mathématiques n'est pas synonyme d'avoir des qualifications avancées en mathématiques ou en enseignement. Un bon enseignant de mathématiques doit avoir des connaissances en enseignement des mathématiques.

Ceci s'explique par plusieurs raisons. L'expansion rapide des systèmes d'enseignement dans les pays à revenu faible ou moyen, la perception de l'enseignement comme une profession peu valorisante, l'absence d'une carrière attrayante, et la concurrence active des professions émergentes — par exemple, les banques, l'informatique et la science des données — contribuent à une pénurie d'enseignants dans de nombreux pays. Il existe d'autres défis pour assurer une offre d'enseignants de mathématiques de qualité dans des contextes de désavantage social et de diversité.

Des programmes sont proposés pour remédier à la pénurie d'enseignants dans de nombreux pays. Il s'agit, par exemple, du recrutement de para-enseignants en Inde ou du programme Teach for America. Cependant, ces programmes ne préparent pas adéquatement, peut-être par inadvertance, les enseignants à enseigner les mathématiques en classe. Augmenter le nombre d'enseignants de qualité en mathématiques n'est pas qu'une question de qualifications avancées en mathématiques ou d'un diplôme en éducation.

QU'ENTEND-ON PAR ENSEIGNANT MATHÉMATIQUE « DE QUALITÉ » ?

Ni la connaissance conventionnelle des mathématiques, ni la connaissance des stratégies pédagogiques générales ne suffisent pour gérer les tâches d'enseignement des mathématiques. Les recherches ont montré qu'il existe une faible corrélation entre les résultats en mathématiques des élèves et les indicateurs de qualification des enseignants, tels que le nombre de cours de

mathématiques que les enseignants ont suivies. Les enseignants doivent plutôt avoir des connaissances en enseignement des mathématiques. Il s'agit d'une forme de connaissances professionnelles qui associe la connaissance des mathématiques, la manière de représenter les mathématiques afin qu'elles puissent être comprises par les élèves, et comment interagir avec la pensée émergente et incomplète des élèves en mathématiques.

Les enseignants doivent également posséder des connaissances sur « l'horizon mathématique », c'est-à-dire être conscients des idées et applications mathématiques plus avancées que le contenu qu'ils enseignent, par exemple, la modélisation mathématique avancée. Parce que l'horizon ne cesse de se déplacer au fur et à mesure que le monde change et devient plus complexe, les enseignants de mathématiques doivent constamment mettre à jour et élargir leurs connaissances professionnelles dans tous les domaines des mathématiques.

FORMER DES ENSEIGNANTS DE MATHÉMATIQUES DE QUALITÉ

Les enseignants de qualité doivent acquérir des connaissances pour l'enseignement des mathématiques, soit un mélange complexe de connaissances du contenu et de connaissances pédagogiques. Ces deux formes de connaissances peuvent être intégrées dans la pratique de l'enseignement si les mathématiciens et les didacticiens des mathématiques collaborent dans le cadre de projets de formation et de développement des enseignants, afin de renforcer mutuellement les connaissances académiques et didactiques.

Le projet Capacity and Network (CANP) de la Commission internationale de l'enseignement mathématique est un exemple de modèle potentiellement durable de collaboration interdisciplinaire. Le réseau rassemble des mathématiciens et des didacticiens des mathématiques pour aider les pays à revenu faible ou intermédiaire à développer leurs connaissances en enseignement des mathématiques. Un autre exemple de telle collaboration est le projet Klein, qui produit des ressources mathématiques pour les enseignants du secondaire, lesquelles ressources établissent des liens entre les mathématiques enseignées et des sujets avancés en mathématiques contemporaines.

CONCLUSIONS

L'éducation renforce l'autonomie des élèves, contribue à réduire les inégalités, permet une mobilité socio-économique ascendante, et favorise des sociétés plus tolérantes et plus justes. Améliorer l'accès à une éducation de qualité est un impératif mondial qui exige des investissements substantiels de la part des systèmes éducatifs. Recruter et former des enseignants de qualité par le biais d'une formation initiale est essentiel pour atteindre cet objectif. La recherche en enseignement des mathématiques peut fournir la base scientifique de ce que signifie être un enseignant de mathématiques « de qualité », et de comment développer les connaissances pour l'enseignement des mathématiques, qui est la marque de cette qualité. Les mathématiciens et les didacticiens des mathématiques peuvent collaborer pour offrir des programmes qui développent chez les enseignants les connaissances pour l'enseignement des mathématiques. Des réseaux interdisciplinaires constituent un modèle potentiellement durable pour le développement des enseignants dans les pays à revenu faible ou intermédiaire.



© Milena Damrau/IMAGINARY

RÉFÉRENCES

Kingdon, G., G., et Sipahimalani-Rao, V. 2010. Para-teachers in India: Status and impact. *Economic and Political Weekly*, Vol. 45, No. 12, pp. 59-67.

Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE]. 2018. Cadre d'évaluation et d'analyse de l'enquête PISA pour le développement (version préliminaire). Récupérée le 8 novembre 2022 à https://www.oecd.org/pisa/aboutpisa/ebook%20-%20PISA-D%20Framework_PRELIMINARY%20version_FRENCH.pdf

Parsons, S., et Bynner J. 2005. *Does numeracy matter more?* London, National Research and Development Centre for Adult Literacy and Numeracy.

Teach for America. 2020. <https://www.teachforamerica.org/>

Thames, M. H. et Ball, D. L. 2010. What mathematical knowledge does teaching require? *Knowing mathematics in and for teaching. Teaching Children Mathematics*, Vol. 17, No. 4, pp. 220-225.

PNUD 2019. Rapport sur le développement humain 2019. Au-delà des revenus, des moyennes et du temps présent: les inégalités de développement humain au XXI^e siècle. New York, PNUD.

UNESCO. 2015. Investing in teachers is investing in learning: A prerequisite for the transformative power of education. Paris, UNESCO.

AUTRICES

Merrilyn Goos

University of the Sunshine Coast, Australia

Anjum Halai

Aga Khan University, Pakistan

SUIVRE LA PARITÉ FEMMES-HOMMES

FONDEMENTS MATHÉMATIQUES DES INDICATEURS D'ÉGALITÉ ENTRE LES SEXES

L'égalité des sexes est une condition préalable au développement durable et à la réduction de la pauvreté. Des femmes et des filles autonomes contribuent à la santé et à la productivité de leur famille, de leur communauté et de leur pays. Au cours des dernières décennies, les institutions mondiales ont développé une série d'indicateurs permettant de mesurer et de suivre les facteurs juridiques, économiques, sociaux et culturels qui contribuent à l'écart entre les sexes. Ces indicateurs composites simplifient des informations complexes en agréant mathématiquement plusieurs mesures individuelles en un seul indicateur synthétique. L'utilité de ces indicateurs composites dépend fortement des méthodes de pondération et d'agrégation sous-jacentes.

Telle que codifiée dans la Déclaration universelle des droits de l'homme de 1948 et adoptée comme traité par l'Assemblée générale des Nations unies en 1979, l'égalité des sexes est un droit humain fondamental et un fondement essentiel d'un monde durable, pacifique et prospère. Cependant, si des progrès ont été accomplis pour combler le fossé entre les sexes, il reste encore un long chemin à parcourir pour que les femmes et les hommes jouissent des mêmes droits et des mêmes opportunités dans tous les aspects de la vie, en particulier en ce qui concerne la participation économique et le pouvoir politique.

L'information sur l'évolution de la parité entre les sexes revêt une importance politique puisque les États membres des Nations Unies ont convenu de faire progresser l'égalité des sexes et l'autonomisation des femmes et des filles dans le cadre de l'Agenda 2030 pour le développement durable. L'information est souvent fournie par le biais d'indicateurs composites, dont le but est de simplifier des informations complexes et de fournir un cadre compréhensible pour mesurer, communiquer et suivre les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs et cibles politiques au fil du temps.

MESURER DES PHÉNOMÈNES COMPLEXES

Les indicateurs composites regroupent mathématiquement en un seul indicateur synthétique un ensemble d'indicateurs individuels, généralement sans unité de mesure commune. Idéalement, les indicateurs composites sont basés sur un cadre statistique et mathématique qui sélectionne, combine et pondère les indicateurs individuels afin de refléter au mieux les dimensions ou la structure des phénomènes mesurés. Dans une large mesure, l'utilité et la fiabilité d'un indicateur composite dépendent des méthodes de pondération, de mise à l'échelle et d'agrégation sous-jacentes.

Par exemple, si les indicateurs de base utilisent des unités de mesure ou des échelles différentes, de petites variations dans

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les indicateurs composites sont une agrégation mathématique d'un ensemble d'indicateurs individuels mesurant des concepts multidimensionnels, mais qui n'ont généralement pas d'unité de mesure commune. Ils sont de plus en plus utilisés par les institutions mondiales pour enrichir le débat public, évaluer les performances et analyser les politiques.
- ✓ Les indicateurs composites multiples sont utilisés pour mesurer et pour suivre les facteurs juridiques, économiques, sociaux et culturels de l'écart entre les sexes.
- ✓ La prolifération d'indicateurs composites pour la prise de décision et l'élaboration de politiques soulève des problèmes de précision, de robustesse et de fiabilité. De mauvais indicateurs composites peuvent conduire à de mauvaises décisions et à des politiques inefficaces.
- ✓ Les approches mathématiques fournissent des moyens robustes pour analyser la sensibilité des indicateurs composites et découvrir les dimensions qui contribuent le plus à combler l'écart entre les sexes, ce qui permet de mesurer l'écart entre les sexes de manière plus précise et plus fiable.

des indicateurs à plus grande échelle contribuent à des changements plus significatifs dans le score de l'indicateur composite. Les mathématiciens et les statisticiens conseillent sur les procédures de calcul de moyennes et sur les méthodes de normalisation pour permettre d'obtenir des valeurs significatives.

Les indicateurs composites sont un outil largement utilisé et apprécié pour le suivi des performances, l'analyse comparative, l'analyse des politiques publiques, et pour communiquer avec les décideurs et le grand public sur des questions politiques clés, telles que la santé, l'environnement et le développement durable. Parmi les indicateurs composites les plus connus, citons l'indice de développement humain, l'indice de performance environnementale, l'indice de progrès social et l'indice mondial de l'innovation.

INDICES POUR L'ÉGALITÉ DES SEXES

Un certain nombre d'indicateurs composites tentent de mesurer l'état de l'égalité des sexes, parmi lesquels :

- **L'indice mondial de l'écart entre les genres (GGGI)** - Le Forum économique mondial a introduit l'indice GGGI en 2006 pour identifier les disparités entre les sexes et suivre leur évolution dans le temps. Le GGGI évalue les écarts nationaux entre les sexes sur des critères économiques, éducatifs, sanitaires et politiques, et fournit un classement des pays qui permet des comparaisons entre régions et groupes de revenus.

VALIDER LES PROGRÈS : COMBLER L'ÉCART HOMMES-FEMMES

L'indice GGGI mesure quatre dimensions à pondération égale : participation et opportunités économiques, niveau d'éducation, santé et survie, et autonomisation politique. Les classements des pays et les scores de l'indice varient considérablement en fonction du choix des pondérations des dimensions. Les statisticiens du Forum économique mondial ont choisi de pondérer ces dimensions de manière égale, mais avec un autre choix de pondération, les scores de l'indicateur seraient très différents.

Les exemples de l'Algérie et de l'Angola sous deux pondérations pour le GGGI

À pondération égale, le score composite 2021 pour l'Algérie est de 0,633, et pour l'Angola, de 0,657. Si les parties prenantes sont particulièrement intéressées par la parité en matière d'éducation mais accordent également de l'importance à la santé et à la survie, elles pourraient pondérer l'éducation à 50%, la santé à 30% et les autres dimensions à 10%. Dans ce cas, la moyenne pondérée de l'Algérie passerait à 0,831, et celle de l'Angola à 0,762. Les deux pays auraient un score GGGI plus élevé, et l'Algérie dépasserait désormais l'Angola en matière de parité hommes-femmes. Supposons que la participation économique soit pondérée à 50%, la santé à 30%, et les autres dimensions à 10%. Dans ce cas, la moyenne pondérée de l'Algérie tomberait à 0,627, celle de l'Angola augmenterait à 0,717, et l'Angola dépasserait à nouveau l'Algérie en matière de parité des sexes. Par conséquent, les pondérations sont cruciales et doivent être sélectionnées pour représenter au mieux les intérêts des parties prenantes.

Pays	Algérie	Angola
Économie	0,456	0,646
Éducation	0,966	0,759
Santé	0,958	0,979
Politique	0,151	0,245
Poids égaux	0,633	0,657
Poids : éducation (50%), santé (30%), autres (10%)	0,831	0,762
Poids : participation économique (50%), santé (30%), autres (10%)	0,627	0,717

- **L'indice d'inégalité de genre (IIG)** - L'indice d'inégalité de genre (IIG) du Programme des Nations unies pour le développement est une mesure composite des désavantages liés au genre dans trois dimensions : santé reproductive, autonomisation des femmes et participation au marché du travail. Une valeur plus élevée de l'IIG équivaut à plus de disparités entre les femmes et les hommes et à un développement humain inférieur.
- **L'indice institutions sociales et égalité homme-femme (ISE)** - L'indice institutions sociales et égalité homme-femme, compilé par l'Organisation de coopération et de développement économiques, mesure la discrimination des femmes dans les institutions sociales. Le ISE est un indice composite non pondéré composé de quatre sous-indices : discrimination dans la famille, intégrité physique restreinte, accès restreint aux ressources productives et financières, et libertés civiles restreintes. Une valeur de 0 pour le ISE signifie égalité totale ; une valeur de 1 signifie complète inégalité. Le ISE est l'une des sources de données officielles pour le suivi de l'ODD 5.1.1.

CONCLUSIONS

Malgré leur popularité, les indicateurs composites ont fait l'objet de critiques, notamment en ce qui concerne les étapes de pondération et d'agrégation, et la signification statistique du produit final. Pour améliorer la précision et la fiabilité des indicateurs composites, les mathématiciens continuent de proposer de nouvelles approches robustes pour les construire, notamment l'utilisation d'intervalles de valeurs pour mesurer l'incertitude des indicateurs composites selon les différentes hypothèses utilisées comme entrées pour évaluer les pondérations implicites des dimensions utilisées dans la mesure de l'indicateur composite.

RÉFÉRENCES

- Barro, R. et Lee, J-W. 2013. A new dataset of educational attainment in the world, 1950-2010. *Journal of Development Economics*, Vol. 104, pp. 184-198. Updates/corrected estimates available on the Barro-Lee website (www.barrolee.com/).
- Roberts, F. 2012. Meaningful and meaningless statements in epidemiology and public health. B. Berglund, G. B. Rossi, J. Townsend and L. Pendrill (eds), *Measurements with Persons*, Psychology Press, Taylor and Francis, pp. 75-95.
- Roy, M., Guillopé, C., Cesa, M., et al. 2020. A Global Approach to the Gender Gap in Mathematical, Computing, and Natural Sciences: How to Measure It, How to Reduce It? *Zenodo*.
- UNESCO. UNESCO Institut de statistique. <https://uis.unesco.org/fr>
- Forum Économique Mondial. 2021. Rapport annuel sur les inégalités femmes-hommes dans le monde. <https://www.weforum.org/reports/ab6795a1-960c-42b2-b3d5-587eccda6023>

AUTRICES ET AUTEUR

Barbara Cozzens

Whistling Thorn Strategies, États-Unis

Helen Roberts

Montclair State University, États-Unis

Fred Roberts

Université Rutgers, États-Unis





GÉRER LES RESSOURCES EN EAU

OUTILS PROBABILISTES POUR LA VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAU

L'accès à une eau potable fiable et sûre est essentiel pour la santé, l'agriculture, l'assainissement et l'hygiène. L'Organisation mondiale de la santé promeut la sécurité de l'eau par une série de directives sur la qualité de l'eau fondées sur l'identification et la gestion des risques depuis le captage jusqu'à la consommation. Pour les fournisseurs d'eau et les décideurs, le théorème de Bayes est un outil mathématique utile pour quantifier les risques et identifier les options appropriées pour la gestion de l'approvisionnement en eau et de sa qualité. Les approches bayésiennes peuvent conduire à des estimations de probabilité face à l'incertitude, lesquelles permettent de prendre des décisions plus éclairées dans les administrations et les politiques publiques. Ces méthodes sont maintenant largement utilisées dans divers domaines, dont la médecine, le droit, et l'écologie.

FIABILITÉ DE L'EAU

Les perturbations de l'approvisionnement en eau à court terme peuvent être gênantes, mais une coupure à plus long terme peut menacer la santé ou la vie humaine, surtout si elle se produit dans le contexte d'une urgence épidémiologique, d'un tremblement de terre ou d'autres risques naturels, ou encore dans un endroit où les autres sources d'eau sont rares, chères ou difficiles à obtenir. Les pénuries d'eau constituent une menace particulièrement importante dans les pays en voie de développement. Pour les communautés qui dépendent des eaux souterraines accessibles par puits de forage et pompes, la prévision des défaillances est essentielle pour éviter les perturbations de l'accès ou de l'approvisionnement en eau.

QUANTIFIER LE RISQUE

Supposons qu'une entreprise d'approvisionnement en eau cherche à minimiser la probabilité que les interruptions de service durent plus de trois heures. Elle doit déterminer les causes ou défaillances les plus courantes qui entraînent ces interruptions plus longues.

En général, les caractéristiques des pannes d'approvisionnement en eau sont détaillées par l'entreprise dans un registre des pannes. En utilisant ces données, l'entreprise peut calculer les valeurs suivantes a) le nombre d'interruptions spécifiques attribuées à chaque type de type de défaillance sur une période donnée ; b) le nombre de pannes d'approvisionnement en eau selon la durée de la panne, par exemple, <3 heures et ≥3 heures ; et c) pour chaque type de défaillance, le nombre de pannes résultantes attribuées à chaque classe de durée.

S'il y a une défaillance telle qu'une fuite de tuyau, les gestionnaires peuvent utiliser ces données pour déterminer la probabilité qu'elle provoque une panne d'au moins trois heures. Mais à l'avenir, il sera aussi utile de savoir le contraire : s'il y a une panne de trois heures ou plus, quelle est la défaillance la

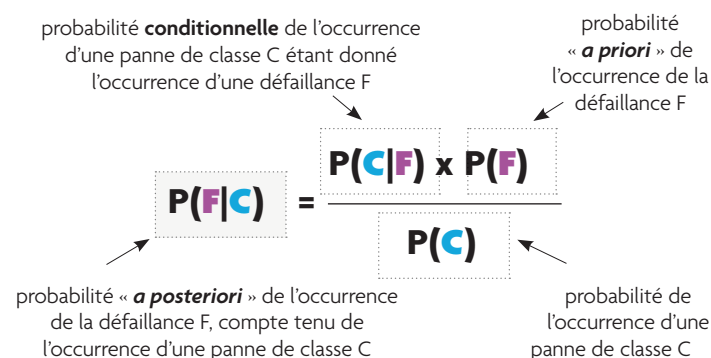
MESSAGES CLÉS

- ☑ Une méthode mathématique développée par un pasteur presbytérien du 18e siècle s'est avérée particulièrement utile pour aider les gouvernements, les services publics et le secteur privé à aborder les problèmes complexes liés à l'approvisionnement en eau et à la qualité de l'eau. Cette méthode, connue sous le nom de théorème de Bayes, permet d'estimer la probabilité d'un événement sur la base d'informations ou de connaissances préalables.
- ☑ L'accès à une eau potable fiable et sûre est essentiel pour la santé et le développement durable. Le théorème de Bayes est d'un grand secours comme outil d'aide à la décision pour évaluer les ressources en eau et leur qualité et pour établir la liste des priorités dans la gestion et la maintenance.
- ☑ Les approches bayésiennes sont utilisées pour identifier des moyens robustes de quantifier le risque et ainsi protéger la santé humaine et environnementale. Leur utilisation peut conduire à des estimations de probabilité qui permettent de prendre des décisions plus éclairées dans les politiques publiques, en particulier pour l'approvisionnement en eau.

plus probable qui l'a provoquée ? Les problèmes de ce type se traitent avec un outil étonnamment puissant, développé au 18ème siècle par un pasteur presbytérien anglais du nom de Thomas Bayes.

REGARD SUR LE THÉORÈME DE BAYES

Le révérend Bayes, statisticien de formation, a développé une méthode pour estimer la probabilité d'un événement futur sur la base d'observations passées. Les estimations peuvent être régulièrement mises à jour en utilisant cette méthode au fur et à mesure que la base d'observations s'enrichit. Le théorème de Bayes s'énonce comme suit :



Les probabilités antérieures ou a priori sont les valeurs de probabilité initiales. Une probabilité a posteriori est une valeur

de probabilité après l'intégration de nouvelles observations, par exemple lorsque « C » se produit. L'estimation d'une probabilité a posteriori peut être régulièrement mise à jour en utilisant des méthodes bayésiennes au fur et à mesure que de nouvelles observations sont recueillies.

LE THÉORÈME DE BAYES EN ACTION

Les données sur les pannes figurant dans les deux premières lignes du tableau suivant proviennent d'une société polonaise d'approvisionnement en eau qui souhaitait déterminer la probabilité qu'une future interruption de moins de trois heures ou de trois heures ou plus soit causée par un type de panne spécifique :

Pannes / Défaillances	Tuyau qui fuit	Dom-mage au raccord d'eau	Tuyau corrodé	Tuyau fendu	Autre	Total
# pannes dues à la défaillance (F)	94	88	81	57	35	355
# pannes ≥3 hres (C)	50	20	49	27	23	169
P(F C)	0,2958	0,1183	0,2899	0,1598	0,1361	

Si F est une canalisation qui fuit et que C est une panne d'au moins trois heures, le théorème de Bayes donne la probabilité a posteriori — $P(F|C)$ — que s'il y a une future panne d'au moins trois heures, elle sera due à une fuite de canalisation. En utilisant les données actuelles, ou probabilités a priori, $P(F|C) = 0,2958$. L'utilisation de plus de données a permis d'obtenir une estimation plus fine que simplement $P(F)$.

Pour réduire l'incidence des interruptions d'approvisionnement en eau, les entreprises peuvent utiliser ces probabilités pour prendre des décisions stratégiques, comme par exemple où cibler les inspections, quand réparer ou remplacer les matériaux, et comment hiérarchiser les ressources limitées. Et avec cette méthode, les probabilités peuvent être régulièrement mises à jour au fur et à mesure que de nouvelles données sur les défaillances sont enregistrées.

Au Kenya, l'outil eMaji Manager utilise les données des capteurs pour gérer l'accès aux points d'eau pour les personnes et le bétail et pour minimiser les défaillances des puits de forage dans les régions semi-arides du nord du pays. Cet outil et les méthodes bayésiennes liées à l'apprentissage automatique peuvent améliorer la prédiction des défaillances.

SURVEILLANCE DES POLLUANTS DE L'EAU

En raison de son approche unique pour quantifier l'incertitude et la variabilité, le théorème de Bayes s'est avéré être un outil efficace pour comprendre les conditions de qualité de l'eau. Par exemple, comme les concentrations de polluants dans l'eau varient en fonction du mois, le théorème de Bayes peut être utilisé pour déterminer la probabilité que des échantillons d'eau ne respectant pas certaines normes de qualité de l'eau se produisent au cours d'un mois donné.

Des approches bayésiennes de ce type ont été utilisées pour guider les décisions de gestion et concevoir des mesures

réglementaires liées aux normes de qualité de l'eau. Par exemple, la ville d'Austin, au Texas, a utilisé des méthodes bayésiennes pour évaluer la qualité de l'eau des cours d'eau en relation avec le traitement des eaux usées. L'État de Caroline du Nord a utilisé des méthodes bayésiennes pour évaluer l'eutrophisation de la rivière Neuse, selon différentes limites pour la concentration d'azote. Et les méthodes bayésiennes ont été utilisées pour étudier la relation entre le débit d'eau et la salinité dans les rivières australiennes.

CONCLUSIONS

L'analyse utilisant le théorème de Bayes s'est avérée utile dans beaucoup d'applications, notamment l'épidémiologie, la politique environnementale, la prise de décision médicale et les procédures judiciaires. Les approches bayésiennes sont constructives dans les situations incertaines faisant appel à un raisonnement probabiliste, où les estimations doivent être régulièrement mises à jour à mesure qu'on accumule de nouvelles données. Dans ce contexte, elles peuvent conduire à des estimations de probabilité plus précises, et donc à des décisions mieux informées face à l'incertitude.

RÉFÉRENCES

Ecological Processes Standing Committee. 2014. *Bayesian Inference: Application To Environmental Management and Decision-Making*, Report to NJ Department of Environmental Protection.

Gronewold, A. et Vallero, D. 2010. Applications of Bayes' theorem for predicting environmental damage. *Access Science*, McGraw Hill Education.

Otieno, F., Nyota, T., Waweru, I., Cintas, C., Maina, S., Ogallo, W., et Walcott-Bryant, A. 2020. Machine learning approaches to safeguarding continuous water supply in the arid and semi-arid lands of northern Kenya. *ICLR Workshop Tackling Climate Change with Machine Learning*.

Porras, A. 2015. Bayesian analysis of stream water quality data in relation to wastewater treatment plant effluent. City of Austin, Watershed Protection Department, Environmental Resource Management Division, No. SR-15-03.

Shihab, K. et Al-Chalabi, N. 2014. Bayesian methods for assessing water quality/ *Proceedings of Fourth International Conference on Computer Science & Information Technology*, pp. 397-407.

Szpak, D. 2020. Method for determining the probability of a lack of water supply to consumers. *Energies*, Vol. 13, p. 5361.

Worrall, F., Kerns, B., Howden, N., Burt, T., et Jarvie, H. 2020. The probability of breaching water quality standards – A probabilistic model of river water nitrate concentrations. *Journal of Hydrology*, Vol. 583, p. 124562.

AUTRICE ET AUTEUR

Helen Roberts

Montclair State University, États-Unis

Fred Roberts

Rutgers University, États-Unis





LACS CLAIRS, LACS TROUBLES

ÉTATS STABLES ALTERNATIFS DANS LES LACS PEU PROFONDS

Les lacs d'eau douce peu profonds fournissent un habitat essentiel pour la faune et la flore, ainsi que des possibilités de loisirs pour le public. Ils sont particulièrement vulnérables aux nutriments qui peuvent faire passer brusquement les conditions de l'eau de claire à trouble. La turbidité tue les poissons, dégrade les habitats et les sources de nourriture, et a un impact négatif sur les loisirs et le tourisme. Dans le monde entier, les gestionnaires ont fait des efforts considérables pour restaurer les lacs turbides peu profonds, mais beaucoup ne reviennent pas à leur état d'origine, même lorsque les apports de nutriments sont contrôlés. Les mathématiques ont le potentiel de fournir des connaissances fondamentales sur les mécanismes à l'origine de ces changements et de contribuer à des approches efficaces, rentables et durables pour restaurer la clarté de ces écosystèmes importants.

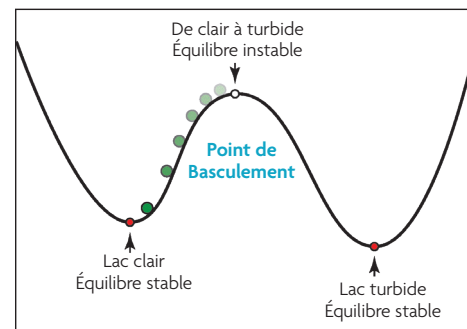
DE CLAIR À TURBIDE

Les apports en phosphore des terres agricoles trop fertilisées alimentent la croissance des algues et augmentent la turbidité. Il va sans dire que si les entrées et les sorties de phosphore sont égales, les écosystèmes lacustres présenteront une turbidité d'équilibre. En réalité, deux équilibres stables existent, l'un clair et l'autre turbide.

Imaginez que le lac peu profond est une balle qui roule le long d'une courbe en forme de deux vallées séparées par une colline. La balle sera attirée par l'une des deux vallées représentant les équilibres stables clair et turbide. Si la balle est poussée vers le haut et par-dessus la colline - le point de basculement - elle roulera vers le bas dans la vallée de droite. Une fois que la balle tombe dans le bas de la courbe, elle a tendance à y rester, stabilisée par des mécanismes ou des boucles de rétroaction. Il faudra plus de force pour pousser la balle vers le haut et la sortir de la vallée que pour l'empêcher de tomber en premier lieu.

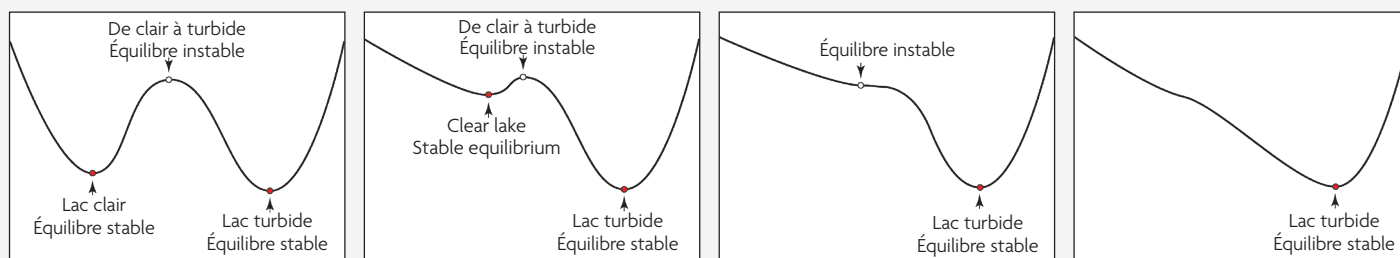
MESSAGES CLÉS

- ✓ Les lacs peu profonds sont caractérisés par deux équilibres stables alternatifs : un état clair et un état turbide. Des perturbations, telle une augmentation des apports en nutriments, peuvent faire passer brusquement un lac de l'état clair à l'état turbide.
- ✓ Les lacs resteront dans l'un de ces deux états, stabilisés par des boucles de rétroaction. La compréhension de ces boucles de rétroaction permet d'identifier les points de levier pour contrôler le système et de générer des transitions vers l'équilibre stable souhaité.
- ✓ Une petite augmentation des facteurs de stress peut déclencher des changements soudains et majeurs dans le système, qui peuvent être difficiles à inverser; le système a franchi un point de basculement.
- ✓ Lorsque les conditions changent, l'équilibre clair et stable peut disparaître, empêchant ainsi la restauration du lac, un phénomène appelé hystérésis.
- ✓ Les mathématiques peuvent contribuer à une gestion réussie et durable de ces écosystèmes importants en fournissant des informations fondamentales sur leur dynamique leurs vulnérabilités.



TRANSITIONS CATASTROPHIQUES

Supposons que l'agriculture de la région s'intensifie, augmentant considérablement les apports de phosphore, alors que les niveaux d'eau fluctuent en raison d'événements climatiques. Ces perturbations extrêmes pourraient déplacer le profil de la courbe. Une fois sur le profil de droite, le système présente un phénomène d'hystérésis. Aucune mesure de gestion ne sera efficace pour restaurer la clarté du lac. Pour réussir, il faudrait déformer le profil de la pente vers le profil représenté à gauche.

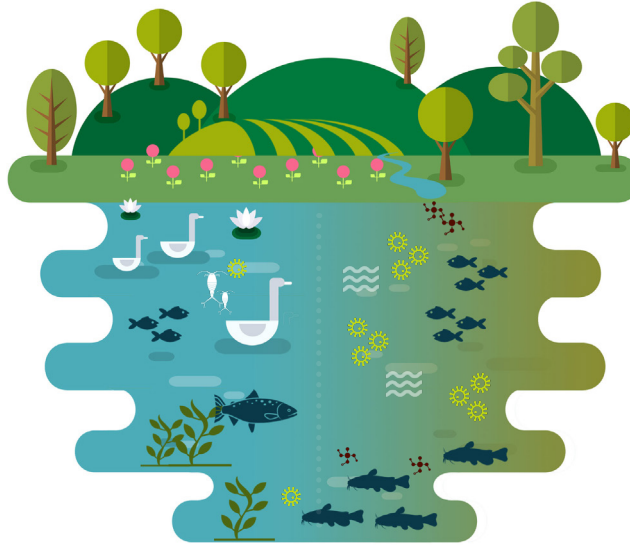


BOUCLES DE RÉTROACTION

LAC CLAIR

BOUCLES DE RÉTROACTION

- Les plantes aquatiques réduisent la croissance du phytoplancton en diminuant la disponibilité du phosphore et en offrant une cachette au zooplancton.
- Des populations adéquates de zooplancton maintiennent les populations de phytoplancton sous contrôle.
- Les plantes aquatiques empêchent la remise en suspension des particules en stabilisant le lit du lac et atténuant l'action des vagues.



LAC TURBIDE

BOUCLES DE RÉTROACTION

- La turbidité bloque la lumière sous-marine, empêchant le développement de grandes plantes aquatiques.
- Sans le refuge des plantes, le zooplancton est surconsommé par les poissons. Avec moins de zooplancton, la population de phytoplancton explose.
- Les sédiments non protégés sont remis en suspension par l'action des vagues et par les poissons de fond, ce qui augmente la turbidité et libère le phosphore dans les sédiments.

Compte tenu de ces forces, le rétablissement de la clarté d'un lac peu profond est un défi. Mais c'est possible si les boucles de rétroaction sont neutralisées. Par exemple, retirer les poissons de fond empêche la remise en suspension des sédiments et permet aux plantes de s'enraciner.

CONCLUSIONS

Identifier les points de basculement, les boucles de rétroaction et leurs moteurs est essentiel pour anticiper et répondre aux perturbations qui pourraient faire basculer un système dans un état indésirable. Les mathématiques peuvent contribuer à une gestion réussie et durable des écosystèmes en fournissant des informations fondamentales sur leur dynamique et leur vulnérabilité. En voici quelques exemples :

- Identifier des signaux d'alerte précoce fiables à l'approche des points de basculement
- Prédire le succès ou l'échec de la restauration avant que les investissements soient faits

- Identifier des stratégies rentables pour sauvegarder des services écosystémiques

Les points de basculement, les boucles de rétroaction et les phénomènes d'hystérésis ont été documentés dans les écosystèmes du monde entier. Des exemples classiques sont la disparition des récifs coralliens, la désertification, la fonte de la banquise arctique et l'effondrement des pêcheries.

RÉFÉRENCES

Hargeby, A., Blindow, L., Hansson, 2004. Shifts between clear and turbid states in a shallow lake: multi-causal stress from climate, nutrients and biotic interactions. *Arch. Hydrobiol.*, Vol. 16, No. 14, pp. 433-454.

Scheffer, M. 2001. Alternative Attractors in Shallow Lakes. *The Scientific World*, 2001. 1: 254-263.

Scheffer, M. et S.R. Carpenter, *Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation*. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003. 18(12): p. 648-656.

Scheffer, M., J. Bascompte, W.A. Brock, V. Brovkin, S.R. Carpenter, V. Dakos, H. Held, E.H. van Nes, M. Rietkerk, et G. Sugihara, *Early-warning signals for critical transitions*. *Nature*, 2009. 461: p. 53.

Tatrai, I., A. Gyorgy, J. Korponai, M. Havasi, *Abrupt shift from clear to turbid state in a shallow eutrophic, biomanipulated lake*. *Hydrobiologia*, 2009. 620: 149-161

AUTRICE

Christiane Rousseau

Université de Montréal, Canada



© IISD Experimental Lakes Area



FAIRE FACE À L'INCERTITUDE

LEÇONS DE SCIENCES SOCIALES POUR LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

La pandémie de COVID-19 a mis la modélisation mathématique au premier plan de l'attention et du débat publics. Même les modèles épidémiologiques les plus simples ont joué un rôle essentiel pour permettre la prise de décision éclairée et informer la société. Des expressions comme « aplatis la courbe » font désormais partie du vocabulaire collectif. Mais la popularité s'accompagne de critiques et de dissidence, principalement lorsque les modèles sont utilisés pour prendre des décisions impopulaires comme les politiques de confinement. Les modèles sont des constructions mathématiques mieux comprises par leurs développeurs que par les utilisateurs. Alors, le public doit-il faire confiance aux modèles ? Les sciences sociales peuvent aider à exiger une modélisation de qualités.

Utilisés de manière appropriée, les modèles mathématiques sont d'une grande aide aux problèmes sociétaux. Les modèles les plus connus sont probablement ceux utilisés dans les prévisions météorologiques, qui fournissent des données essentielles pour les transports, les voyages, la prévention des catastrophes, ou tout simplement pour la planification de pique-niques en plein air. Malheureusement, tous les modèles ne sont pas à la hauteur de ce que peut attendre la société.

Lorsque les spécialistes des sciences sociales examinent des modèles mathématiques, ils découvrent un multivers, où chaque discipline scientifique adopte ses propres styles de modélisation et de contrôle de la qualité. Les personnes concernées par

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les modèles mathématiques peuvent être utiles à la société, comme dans l'exemple des modèles de prévision météorologique. Mais tous les modèles ne sont pas utiles. Des règles simples assurent la fiabilité des modèles et leur utilisation par la société.
- ✓ Les résultats des modèles sont conditionnés par les hypothèses de modélisation et les projections des modèles dépendent des hypothèses utilisées. Même les meilleurs modèles sont affectés par des incertitudes pas toujours faciles à reconnaître, à comprendre ou à communiquer. L'opacité concernant l'incertitude nuit à la confiance.
- ✓ Les modélisateurs doivent communiquer de manière plus efficace et transparente les utilisations appropriées et les limites de leurs modèles aux décideurs et au public. En contrepartie, le public doit accepter ce que les chiffres de ces modèles signifient réellement et ce qu'ils ne signifient pas.

les pratiques de modélisation disposent de très peu de « modes d'emploi ». En juin 2020, un groupe interdisciplinaire de spécialistes des sciences naturelles et sociales a publié dans Nature un manifeste décrivant les mesures à prendre d'urgence pour faciliter le dialogue entre les modèles et la société. Les cinq leçons suivantes résument ces meilleures pratiques pour une modélisation mathématique responsable.



ATTENTION AUX HYPOTHÈSES

La quantification de l'incertitude et l'analyse de sensibilité sont des approches complémentaires pour mesurer la robustesse des prédictions des modèles.

L'utilité d'un modèle dépend largement de l'exactitude et de la crédibilité de ses résultats. Or, comme les entrées du modèle sont rarement précises, les valeurs de sortie sont toujours sujettes à imprécision et incertitude. L'analyse d'incertitude est le processus de détermination de l'incertitude à la sortie du modèle, à partir de l'incertitude sur les paramètres d'entrée. Un complément essentiel à la quantification de l'incertitude est l'analyse de sensibilité, qui consiste à évaluer comment les variations des sorties du modèle peuvent être attribuées aux différentes sources d'entrée. La réalisation d'analyses globales d'incertitude et de sensibilité est essentielle pour déterminer la qualité du modèle. La transmission de l'incertitude associée aux prédictions du modèle peut être aussi importante pour la prise de décision et l'élaboration de politiques que les prédictions elles-mêmes.



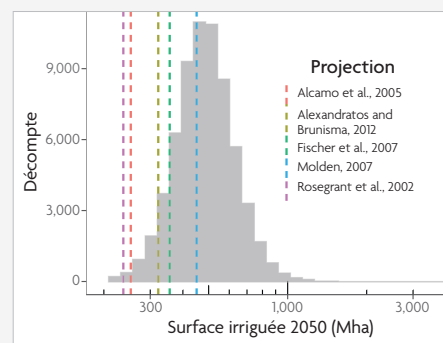
ATTENTION À L'ORGUEIL

À la base, les modèles sont des représentations simplifiées de systèmes ou de processus réels.

Il est communément admis que les modèles plus simples sont souvent préférables aux modèles complexes. Ils sont plus faciles à comprendre et à valider, et leurs prédictions sont généralement plus précises. L'augmentation de la complexité se fait au prix de l'ajout de paramètres, dont l'incertitude se propage aux sorties du modèle. Mais, cela va à l'encontre des tendances actuelles où on propose des modèles de plus en plus complexes. Cet attrait pour la complexité peut refléter l'ambition justifiée des modélisateurs de parvenir à une représentation plus précise du système étudié. Mais, quelle que soit la taille ou la complexité d'un modèle, il ne peut refléter toute la réalité. Pour que les modèles remplissent leurs objectifs, on doit résister à l'envie de faire de la complexité un objectif en soi et, au contraire, construire des modèles avec un compromis optimal entre la complexité et l'erreur.

EXEMPLE : MODÉLISATION DES FUTURES ZONES IRRIGUÉES

Dans ces modèles, on a demandé aux analystes de prédire la quantité de terres irriguées qui sera nécessaire d'ici 2050. Les lignes verticales en pointillés représentent des prédictions issues d'analyses assez complexes, sans incertitudes. L'histogramme gris représente une analyse d'incertitude, où les incertitudes des variables d'entrée et des hypothèses sont propagées à travers le modèle jusqu'à la sortie pour 65 000 simulations. La plupart des prédictions se situent entre 240 et 450 millions d'hectares (Mha), sous-estimant l'expansion potentielle de l'irrigation en ignorant les paramètres de base et les incertitudes du modèle. Lorsque celles-ci sont prises en compte, la distribution de probabilité des terres irriguées dans le monde s'étend sur près d'un demi-ordre de grandeur (300-800 Mha) plus grand, et des valeurs plus élevées, jusqu'à 1 800 Mha, ne peuvent être exclues. (Figure adaptée de Puy et al., 2020)



ATTENTION AU CADRAGE

Le cadrage fait référence aux différentes lentilles, visions du monde ou hypothèses sous-jacentes qui guident la façon dont les individus, les groupes et les sociétés perçoivent une question particulière.

Les résultats des modèles reflètent au moins partiellement les orientations disciplinaires, les intérêts et les préjugés de leurs créateurs. Les détracteurs des prédictions ou des implications politiques des modèles mettront en avant ces partis pris pour susciter la méfiance du public. La façon dont les résultats sont formulés et communiqués peut influencer l'opinion publique et favoriser un résultat politique plutôt qu'un autre. Les praticiens de la modélisation doivent développer des modèles transparents et aider les utilisateurs à comprendre leur fonctionnement interne et leurs résultats. Un cadrage réussi et transparent peut favoriser une communication efficace des résultats et renforcer la confiance des parties prenantes.



ATTENTION AUX CONSÉQUENCES

Lorsqu'elle est exécutée de manière appropriée, la modélisation mathématique aide la société à prendre des décisions plus intelligentes. Dans le cas contraire, les modèles peuvent conduire à des choix erronés ou simplement injustifiés.

La quantification peut se retourner contre vous. En contribuant à faire passer des produits financiers complexes pour sûrs, mais en ne mettant pas clairement en évidence les hypothèses sous-jacentes, les modèles ont contribué à l'effondrement des marchés financiers mondiaux en 2008. La société doit établir collectivement de nouvelles normes sociales et une nouvelle éthique de la quantification afin de garantir que les prédictions des modèles contribuent à une prise de décision efficace. Les modélisateurs doivent s'abstenir de projeter un faux sentiment de certitude, et les décideurs ne peuvent pas se décharger de leur responsabilité sur les modèles simplement parce qu'ils correspondent à un programme préétabli.



ATTENTION AUX INCONNUES

Le fait de ne pas reconnaître et de ne pas communiquer les incertitudes peut limiter artificiellement les options politiques et ouvrir la porte à des conséquences involontaires.

Les philosophes réfléchissent depuis longtemps à la vertu de savoir ce que l'on ne sait pas. Le philosophe et mathématicien allemand Nicolas Cusa a décrit cette vertu dans *De Docta Ignorantia* - l'ignorance savante. La modélisation mathématique pêche souvent par excès de précision. Trop souvent, les modélisateurs sont réticents à reconnaître les incertitudes, craignant que la franchise ne nuise à leur crédibilité. En présentant leurs résultats, les modélisateurs doivent communiquer comment les incertitudes liées aux prédictions peuvent modifier les conclusions. La transparence sur les incertitudes renforce la confiance du public, tant dans les modèles que dans leurs sources.

CONCLUSIONS

Le statisticien George E.P. Box a dit : « Essentiellement, tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles. » Les modèles utiles favorisent la compréhension. Lorsqu'utilisés de manière appropriée, ils rendent la vie meilleure et plus sûre de multiples façons. Les cinq leçons ci-dessus peuvent contribuer à garantir que les modèles mathématiques sont produits de manière responsable et finalement utiles. Chacun de ces enseignements met en évidence les forces et les limites des résultats des modèles et, collectivement, ils contribueront à préserver le précieux outil de la modélisation mathématique.

RÉFÉRENCES

- Mennicken, A. et Espeland, W. 2019. What's New with Numbers? Sociological Approaches to the Study of Quantification. *Annual Review of Sociology*, Vol. 45, No. 1, pp. 223–245.
- Puy, A. et al. 2020. Current models underestimate future irrigated areas. *Geophysical Research Letters*, Vol. 47, No. 8.
- Saltelli, A. et al. 2020. Five ways to ensure that models serve society: a manifesto. *Nature*, Vol. 582, pp. 482–484.

AUTEUR

Andrea Saltelli

Centre for the Study of the Sciences and the Humanities,
Université de Bergen, Norvège



SE PRÉPARER À UNE CRISE

AMÉLIORER LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES COMPLEXES NUMÉRISÉS

La technologie peut transformer les sociétés, les rendre plus équitables, et soutenir et accélérer la réalisation des objectifs de développement durable. Mais les progrès rapides et omniprésents des technologies numériques s'accompagnent de risques. Comme la pandémie de COVID-19 l'a démontré de manière frappante, ces risques sont systémiques et souvent partagés dans un monde de plus en plus connecté et mondialisé. Les gouvernements, les institutions et les sociétés doivent réaliser des investissements et des changements systémiques pour réduire la probabilité de chocs futurs et améliorer la résilience à ces chocs. Les méthodes mathématiques se sont révélées des outils inestimables pour traiter les vulnérabilités des systèmes critiques et pour construire des systèmes et des sociétés plus résilientes.

Au début de la pandémie de COVID-19, des pénuries d'équipements de protection individuelle, de produits alimentaires et d'autres biens de consommation de base ont révélé les risques d'une dépendance excessive sur les chaînes d'approvisionnement mondiales « zéro stock ». Les entreprises utilisent l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique pour minimiser l'entreposage des matières premières et des stocks, et ne les commandent qu'au moment voulu pour les livrer aux consommateurs à temps. Il a fallu une pandémie mondiale pour confirmer ce contre quoi les experts avaient mis en garde depuis des années : ce système plus léger et moins coûteux n'est pas résilient aux chocs.

La résilience est la capacité d'un système à minimiser ou à récupérer rapidement d'une perturbation ou d'un choc. Renforcer la résilience est la clé pour combattre une crise, qu'elle soit environnementale, sociale, ou économique. À cette fin, la résilience a été élevée au rang de priorité mondiale, voire de priorité absolue dans le discours sur le développement et les programmes politiques.

LA RÉSILIENCE NUMÉRIQUE

L'évolution rapide et globale des technologies numériques, couplée à la disponibilité de grandes quantités de données a rendu les sociétés de plus en plus dépendantes de systèmes complexes. Qu'il s'agisse de permettre des transactions financières, de faire fonctionner le réseau électrique, de gérer les systèmes de transport, d'autonomiser les soins de santé et la logistique de la livraison rapide des fournitures et des matériaux, les technologies numériques ont transformé presque toutes les facettes de la vie et de la société modernes. Pourtant, ces changements ont rendu les sociétés plus vulnérables aux perturbations catastrophiques provoquées par les désastres naturels, les attaques délibérées, voire de simples erreurs. Rendre les systèmes complexes plus résilients est un défi important alors que les gouvernements, les entreprises et la société continuent d'adopter des technologies numériques.

MESSAGES CLÉS

- ✓ La résilience est la capacité des systèmes physiques, naturels ou sociaux à résister et à se rétablir après une perturbation.
- ✓ Les systèmes complexes hautement numérisés d'aujourd'hui ont été créés grâce à la disponibilité de grandes quantités de données, mais la dépendance à l'égard de ces données les rend vulnérables aux perturbations dues aux catastrophes naturelles, aux attaques délibérées, et même à de simples erreurs.
- ✓ Les mathématiques permettent de modéliser, simuler et évaluer le comportement des composants d'infrastructures critiques et de ce qui en dépend.
- ✓ Les méthodes et approches mathématiques sont des outils inestimables pour identifier systématiquement les menaces, développer des options qui permettront de réduire l'exposition à ces menaces ou d'en minimiser l'impact et, en fin de compte, pour construire des systèmes plus résilients. Collectivement, ces capacités aideront les décideurs à se préparer et à réagir plus rapidement et plus efficacement à diverses perturbations.

PERTURBATION ET RESTAURATION

La capacité à répondre rapidement à une perturbation est essentielle à la résilience. Par exemple, dans les systèmes d'alimentation électrique complexes et interconnectés, les pannes en cascade qui résultent de pannes de courant mineures peuvent avoir des conséquences dramatiques, notamment des pannes d'électricité généralisées. Les perturbations du réseau électrique peuvent s'enchaîner tellement vite qu'un opérateur peut ne pas être en mesure d'absorber les grandes quantités de données décrivant l'état changeant du système pour réagir assez vite et empêcher la cascade avant qu'elle n'entraîne une panne majeure à l'échelle du système. Dans de tels cas, des algorithmes et des outils mathématiques rapides et fiables sont nécessaires pour détecter et répondre à de tels problèmes. Ces algorithmes sont autonomes lorsque nécessaire, capables de gérer de multiples solutions alternatives, et suffisamment agiles pour changer de direction si aucune solution n'est bonne. De multiples outils de ce type ont été développés et appliqués pour accroître et améliorer la résilience des infrastructures.

Un modèle en cascade, par exemple, est un modèle probabiliste simple qui permet de découvrir et de décrire certaines des caractéristiques essentielles des pannes des systèmes de transmission d'énergie électrique causées par des défaillances en cascade. Il peut prédire quels composants pourraient tomber en panne, et où les distributions de charge pourraient causer des surcharges et des défaillances en cascade suite à une perturbation. Les modèles en cascade peuvent être couplés à des algorithmes pour analyser l'effet des mesures prises par

un opérateur pour minimiser les impacts des pannes, comme le délestage d'urgence, et pour évaluer les coûts prévus des pannes.

Des modèles mathématiques ont également été appliqués à la remise en service des infrastructures critiques après des événements perturbateurs de grande ampleur. Les systèmes de transport de plus en plus numérisés, les réseaux de télécommunications, les systèmes d'adduction d'eau et d'égouts, et les réseaux d'électricité fournissent des services essentiels aux communautés et garantissent la santé et le bien-être des personnes. Ces services doivent être rétablis de manière efficace et urgente après une catastrophe naturelle ou un autre événement extrême. Les techniques d'optimisation des réseaux peuvent être utilisées pour modéliser la résilience de ces infrastructures critiques.

Après une perturbation, les décideurs doivent planifier les réparations en affectant des ressources limitées. Ils doivent déterminer l'ensemble des composants qui seront temporairement installés ou réparés, attribuer ces tâches à des groupes de travail, et ensuite déterminer l'emploi du temps de chaque groupe de travail pour accomplir les tâches qui lui sont assignées. Ces décisions de planification et d'ordonnement peuvent être modélisées mathématiquement et optimisées dans un cadre d'ordonnement.

Après un événement extrême, il y a souvent des interdépendances dont on doit tenir compte. Par exemple, des réparations peuvent être nécessaires aux centres de transport après un ouragan, mais ces travaux ne peuvent être effectués tant que le courant n'est pas rétabli. Ou, si des arbres ont fait tomber des lignes électriques sur une route, la compagnie d'électricité doit attendre que les équipes de voirie nettoient la route. Des théories mathématiques complexes ont été développées pour traiter les interdépendances à l'aide de méthodes d'optimisation. Souvent, ces interdépendances impliquent différentes infrastructures, ce qui nécessite une prise de décision et un ordonnancement décentralisés

SOLUTIONS RÉILIENTES

La résilience numérique exige des stratégies de conception qui préservent la capacité d'un système à se maintenir ou à changer, sa capacité de récupération, et sa résistance aux crises et aux chocs. La résilience des systèmes complexes numérisés doit être réalisée en tant que propriété intégrée de la conception. Il est possible de représenter mathématiquement la structure et la logique opérationnelle du système et de quantifier la capacité d'adaptation et de récupération. Les approches mathématiques et algorithmiques peuvent également proposer des réponses aux crises et des stratégies de rétablissement, et contribuer à l'élaboration de solutions plus résilientes.

CONCLUSIONS

Les systèmes numériques modernes tendent à inclure de plus en plus de composants interconnectés. Ils améliorent la capacité à s'adapter aux changements rapides dans les systèmes de transport, les services urbains et les chaînes d'approvisionnement. Concevoir des moyens de créer de la flexibilité tout en minimisant la vulnérabilité aux perturbations nécessite une compréhension approfondie de la dynamique des systèmes complexes interconnectés.

La surveillance des systèmes d'infrastructure numérique



L'intelligence artificielle est utilisée pour accroître la fiabilité et réduire les pertes et les accidents lors de la transmission de l'énergie électrique. © AdobeStock

hautement spécialisés implique la collecte en temps réel de grandes quantités de données provenant de multiples sources hétérogènes. L'avalanche de données nécessite des modèles mathématiques de plus en plus abstraits couplés à des techniques algorithmiques pour extraire des données les informations qui sont pertinentes pour les décideurs.

Si la plupart des décideurs comprennent intuitivement ce qu'est la résilience, il est nécessaire d'aller au-delà de l'intuition. Des outils sont nécessaires pour mesurer la résilience et évaluer l'effet d'actions spécifiques sur la résilience d'un système numérisé complexe. Une collaboration active entre les mathématiciens et les décideurs peut aider à développer de tels outils.

RÉFÉRENCES

- Dobson, I., Carreras, B. A., Lynch, V. E., et Newman, D. E. 2007. Complex systems analysis of series of blackouts: Cascading failure, critical points, self-organization. *Chaos*, Vol. 17, No. 026103
- Dobson, I., Carreras, B. A., et Newman, D. E. 2005. A loading-dependent model of probabilistic cascading failure. *Probab. Engrg. Inform. Sci.*, Vol. 19, No. 1, pp. 15–32.
- Sharkey, T. C. et Pinkley, S. G. N. 2019. Quantitative models for infrastructure restoration after extreme events: Network optimization meets scheduling. H. G. Kaper and F. S. Roberts (eds), *Mathematics of Planet Earth: Protecting Our Planet, Learning from the Past, Safeguarding for the Future*, Springer, pp. 313-336.

AUTEURS

Hans Kaper
Université de Georgetown, États-Unis

Fred Roberts
Université Rutgers, États-Unis

Igor Sheremet
Fondation russe pour la recherche fondamentale, Russie



VALORISER LE CAPITAL NATUREL

QUANTIFIER LA VALEUR DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

La santé et les moyens de subsistance de l'homme dépendent des écosystèmes de la Terre et des biens et services qu'ils fournissent, de la nourriture et de l'eau à la régulation du climat, à la pollinisation des cultures et au plaisir des yeux. Pourtant, malgré ces contributions vitales, plus de 60 % des services écosystémiques (c'est-à-dire les avantages qu'apporte la nature à la société) dans le monde sont dégradés ou utilisés de manière non durable, selon le rapport *Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire*. Les approches mathématiques peuvent améliorer ces évaluations, prévoir les changements futurs dans les services écosystémiques et fournir des informations pertinentes pour des politiques permettant de garantir des avantages aux générations futures.

La nature fournit aux humains des biens et des services : eau et air purs, nourriture, protection contre les tempêtes et les inondations, régulation du climat, matières premières, énergie, plein air, et bien plus encore. Malgré les énormes avantages de ces services pour la santé, la richesse et le bien-être de l'humanité, le capital naturel se dégrade de façon systématique dans le monde entier. Le rapport *Dasgupta Review*, une étude publiée par le gouvernement britannique en 2021, a révélé que le capital naturel mondial par habitant a diminué de près de 40 % entre 1992 et 2014, alors même que le capital produit par personne a doublé.

Historiquement, les services rendus par les écosystèmes ne sont pas intégrés dans les analyses économiques conventionnelles, ce qui a conduit à une méconnaissance du rôle fondamental de la nature dans les économies. Quantifier la valeur du capital naturel et des services écosystémiques qu'il fournit permet d'intégrer cette valeur dans les décisions politiques et dans la planification du développement.

TECHNIQUES MATHÉMATIQUES

Les mathématiciens étudient les écosystèmes à l'aide de modèles et de données. Les modèles conceptuels les plus simples se concentrent sur les mécanismes qui régissent des phénomènes particuliers. À l'autre extrémité se trouvent les modèles de processus complexes contenant un système d'équations mathématiques avec plusieurs paramètres connus et inconnus - généralement résolus sur ordinateur - dont l'objectif est de faire des prédictions quantitatives sur certains aspects.

Les techniques mathématiques utilisées dans le développement de ces modèles proviennent de plusieurs domaines des mathématiques, notamment la théorie de l'optimisation, la théorie des équations différentielles, et la théorie des systèmes dynamiques.

Une fois qu'un modèle a été validé et calibré à l'aide des données de référence disponibles, il devient un outil permettant d'explorer des scénarios de simulation. En mettant en évidence les caractéristiques essentielles d'un phénomène particulier, les

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les services écosystémiques sont essentiels à la civilisation. Le capital naturel et les services écosystémiques associés sont le fondement même de toutes les activités humaines et économiques.
- ✓ Les activités humaines entravent le flux des services écosystémiques à grande échelle. Les décideurs ont besoin d'outils et de données pour mesurer de manière crédible la valeur des services écosystémiques vitaux.
- ✓ Les modèles conceptuels à des échelles spatiales et temporelles appropriées permettent de comprendre les mécanismes qui régissent le flux des services écosystémiques.
- ✓ Les modèles mathématiques permettent de simuler de multiples scénarios sous diverses hypothèses. Les résultats de ces explorations peuvent mettre en lumière les caractéristiques essentielles des phénomènes d'intérêt et éclairer le processus décisionnel.

modèles améliorent la compréhension sociétale des systèmes complexes et permettent de meilleures décisions.

STATIQUE VS. DYNAMIQUE

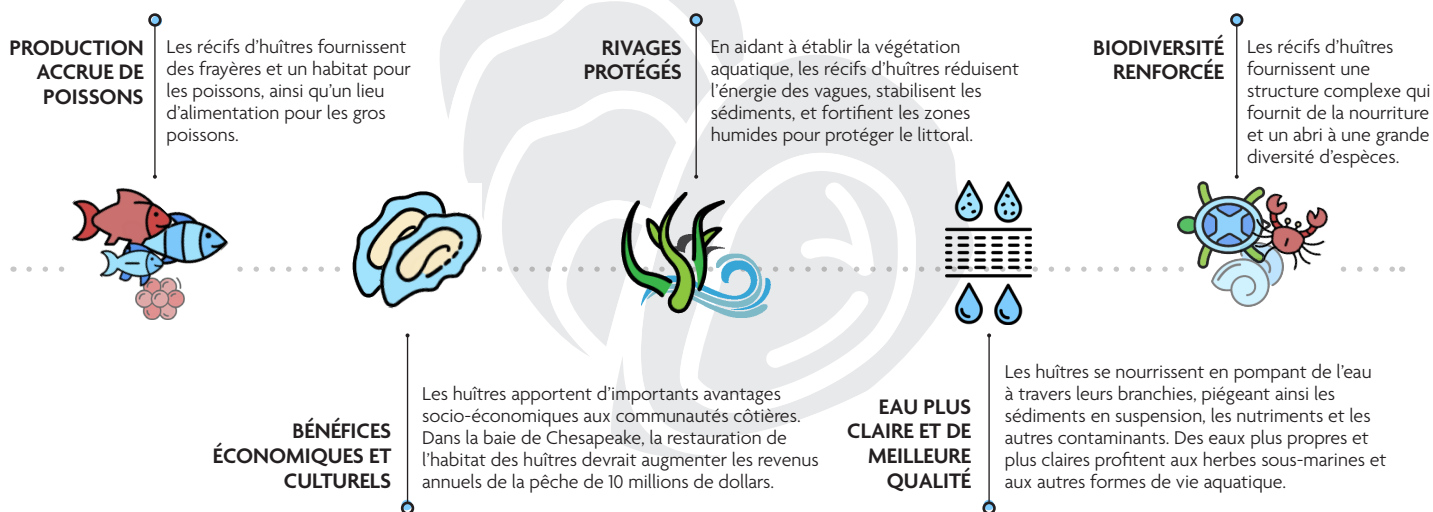
De nombreux premiers modèles de ressources naturelles ont été formulés comme des problèmes d'optimisation statiques, ne tenant pas compte du fait que le capital naturel, comme les autres stocks de capital, doit être géré de manière optimale dans le temps pour atteindre sa pleine valeur pour la société. L'évaluation du capital naturel et des services écosystémiques requiert de résoudre un problème d'optimisation dynamique. L'économiste Jon Conrad a illustré ce point en estimant la valeur de l'élimination des nutriments par les huîtres dans la baie de Chesapeake. Ce modèle d'optimisation dynamique simple permet d'estimer les coûts d'une pêche des huîtres en accès libre dans la baie de Chesapeake : le manque à gagner net et la perte de services d'eau de qualité se situeraient entre 37 et 79 millions de USD par an. Bien que simpliste, le modèle démontre que les optimums en régime permanent peuvent servir de référence pour estimer les coûts de la dégradation des ressources et les avantages de la conservation et de la restauration.

MESURES DE PERFORMANCE ÉCONOMIQUE

Les mesures standard du produit intérieur brut (PIB) par habitant et l'indice de développement humain (IDH) des Nations unies sont couramment utilisés pour mesurer le niveau d'activité économique et les progrès d'un pays en terme de développement. De nombreux analystes ont affirmé que ces mesures conventionnelles peuvent donner une impression très trompeuse du développement économique et humain.

EXEMPLE : LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES FOURNIS PAR LES RÉCIFS D'HUITRES DE LA BAIE DE CHESAPEAKE

La baie de Chesapeake est le plus grand estuaire des États-Unis. Elle est importante à la fois pour l'écologie et l'économie des états côtiers du littoral atlantique centre. L'huître orientale est l'une des espèces les plus emblématiques de la baie. Outre les avantages économiques directs de la pêche, les huîtres fournissent une multitude de services écosystémiques, allant de la fourniture d'abris pour les crabes bleus et les poissons à la protection des littoraux. Les parties prenantes et les décideurs de la baie de Chesapeake utilisent une série de modèles mathématiques et bio-économiques pour guider la prise de décision et évaluer les efforts de gestion actuels pour protéger les habitats essentiels et les services écosystémiques. Ces modèles sont parmi les plus sophistiqués, les plus étudiés et les plus respectés au monde.



Ni le PIB ni l'IDH ne tiennent compte de la dégradation de l'environnement et de l'épuisement des ressources naturelles. Si un pays coupe à blanc ses forêts, pollue ses eaux ou épuise ses pêcheries, il s'appauvrit, malgré les contributions positives de ces ressources commercialisables au PIB.

L'économiste de renom, Sir Partha Dasgupta, affirme depuis longtemps que les mesures économiques traditionnelles doivent être ajustées pour refléter l'importance du capital naturel. Dans un effort pour aller au-delà du PIB dans le suivi des progrès mondiaux, les Nations unies ont lancé le Système de comptabilité économique et environnementale (SCEE), une nouvelle norme internationale pour la comptabilité du capital naturel. Ce cadre intègre des données économiques et environnementales afin de fournir un portrait plus complet et polyvalent des interrelations entre l'économie et l'environnement.

Les états de compte d'écosystèmes produits par les pays permettront de suivre l'étendue, l'état et les services fournis par les écosystèmes sous la forme de comptes et d'indicateurs physiques et monétaires. Les approches mathématiques et statistiques, allant des analyses structurelles les plus simples à la modélisation complexe, étayent les applications du SCEE et leurs extensions.

En avril 2021, les Nations unies et le Centre basque pour le changement climatique ont lancé un outil d'intelligence artificielle innovant pour permettre aux pays de mesurer plus facilement les contributions de la nature à leur prospérité économique et à leur bien-être. Le nouvel outil réduit les obstacles à la compilation des états de compte écosystémiques du SCEE et permet une comptabilité écosystémique rapide et standardisée, mais néanmoins personnalisable, pour tout territoire dans le monde.

CONCLUSIONS

Au cours des 50 dernières années, l'homme a rapidement et profondément modifié les écosystèmes, en grande partie pour

répondre à la demande croissante de nourriture, de fibres et de carburant. Les coûts totaux de la perte et de la dégradation des services écosystémiques sont difficiles à mesurer mais ils sont probablement importants et en croissance. Pour inverser la perte et la dégradation des services écosystémiques, les décideurs politiques en matière de développement économique doivent inclure dans leurs motivations un objectif de conservation, et les valeurs des services écosystémiques doivent être intégrées dans toute prise de décision. Des approches mathématiques seront nécessaires pour concevoir et améliorer les mesures et la quantification des services écosystémiques, pour explorer des scénarios de simulation et pour fournir des connaissances permettant d'améliorer la prise de décision en respectant les objectifs de développement durable.

RÉFÉRENCES

ARIES for SEEA Explorer: A Tool for Rapid Natural Capital Accounting. <https://aries.integratedmodelling.org/aries-for-seea-explorer/>

Conrad, J. 2019. Dynamic optimization, natural capital, and ecosystem services. H. Kaper et F. Roberts (eds), *Mathematics of Planet Earth*. Springer, pp. 297–311.

Dasgupta, P. 2021. *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. London, HM Treasury.

Daily, G., Alexander, S., Ehrlich, P., Goulder, L., Lubchenco, J., Matson, P., Mooney, H., Postel, S., Schneider, S., Tilman, D., et Woodwell, G. 1997. Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues Ecol*, Vo. 2, pp. 1–16.

AUTEUR

Hans Kaper
Université de Georgetown, États-Unis



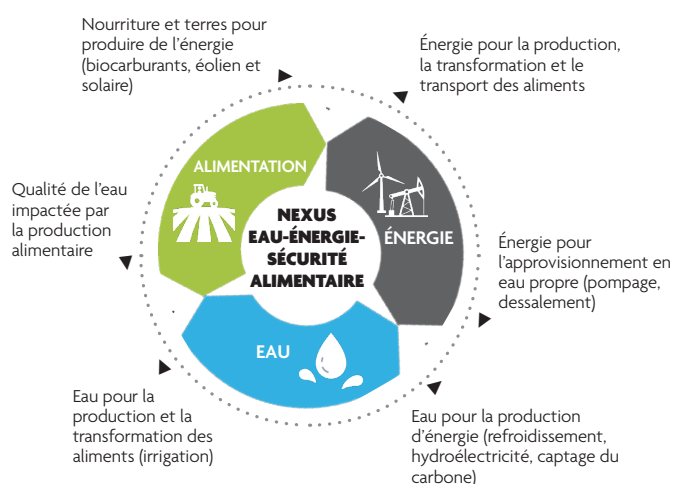
RESSOURCES LIMITÉES

MODÉLISER UN APPROVISIONNEMENT DURABLE EN ALIMENTATION, ÉNERGIE ET EAU

Les réserves mondiales d'eau douce sont de plus en plus sous tension en raison des effets combinés de la croissance démographique de la population, de l'industrialisation croissante, et du changement climatique. En conséquence, les ressources en eau doivent être gérées et allouées d'une manière qui soit économiquement efficace et qui tienne compte des interdépendances entre la production alimentaire, la production d'énergie et l'approvisionnement en eau, souvent appelé Nexus Eau-Énergie-Sécurité Alimentaire. La modélisation mathématique fournit les moyens d'anticiper le futur sous certaines conditions, ce qui permet aux décideurs d'optimiser l'utilisation de l'eau dans tous les secteurs, tout en tenant compte des incertitudes sur la disponibilité future de l'eau.

La nourriture, l'énergie et l'eau sont au cœur du développement durable, mais la nourriture et l'énergie sont en concurrence pour l'eau dans de nombreuses régions du monde. L'agriculture est le plus grand consommateur des ressources en eau douce de la planète, et le secteur alimentaire représente actuellement environ 30 % de la consommation mondiale d'énergie. Trop souvent, ces domaines sont gérés en vase clos, ce qui compromet la sécurité dans les autres domaines, mettant en péril le bien-être humain et la croissance économique. L'imbrication de la production alimentaire, de la production d'énergie, et des réseaux d'eau — connue sous le nom de « Nexus Eau-Énergie-Sécurité Alimentaire » — exige une approche intégrée de la gestion et de la prise de décision. En gérant ce lien de manière holistique, les décideurs peuvent trouver de meilleurs compromis et atténuer l'incertitude et les risques.

Pour faire progresser la gestion durable des systèmes liés à l'alimentation, à l'énergie et à l'eau, les scientifiques développent des modèles informatiques qui analysent des configurations alternatives du système, telles que des combinaisons de technologies qui peuvent être déployées dans l'énergie et l'agriculture, des types de cultures pouvant être pratiquées,



MESSAGES CLÉS

- ☑ Une approche intégrée de la gestion du Nexus Eau-Énergie-Sécurité Alimentaire garantit des solutions plus favorables à l'environnement que celles élaborées en vase clos. Face à l'augmentation considérable de la demande en nourriture, en énergie et en eau au cours des prochaines décennies, la gestion du nexus devra être plus efficace dans les secteurs et les régions pour permettre l'utilisation optimale de ressources limitées.
- ☑ La disponibilité future de l'eau est très incertaine car elle dépend de la variabilité météorologique et du changement climatique. Ignorer l'incertitude peut augmenter les coûts et les risques, et l'incertitude doit être prise en compte dans les décisions d'investissement dans de nouvelles technologies et autres solutions avec un horizon temporel plus long pour le retour.
- ☑ La modélisation mathématique offre des options pour optimiser les investissements initiaux dans les technologies d'économie d'eau et dans l'utilisation de l'eau afin d'assurer, compte tenu des incertitudes, le niveau souhaité de sécurité alimentaire et énergétique nationale.

et l'utilisation d'engrais. En général, un modèle met en œuvre un objectif de gestion particulier, par exemple, minimiser les coûts ou maximiser les profits. La solution d'un modèle est une configuration du système qui permet d'atteindre l'objectif souhaité au niveau de la nourriture, de l'énergie, de l'eau, et des contraintes d'approvisionnement.

LES DÉFIS DE L'INCERTITUDE

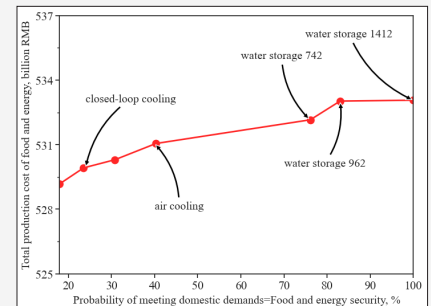
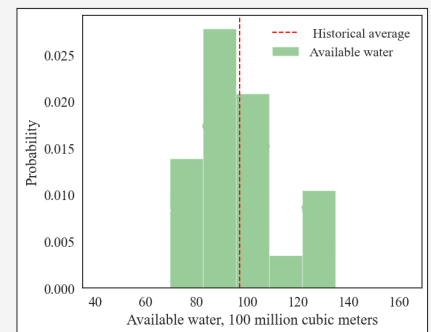
Les systèmes Eau-Énergie-Sécurité Alimentaire sont affectés de manière significative mais incertaine par un certain nombre de facteurs externes complexes, notamment les marchés financiers, les préférences et le comportement humain et, de plus en plus, la variabilité météorologique et le changement climatique. Les précipitations et l'évaporation influencent toutes deux les modèles de disponibilité de l'eau, et le changement climatique rend les conditions météorologiques correspondantes plus sévères et moins prévisibles. Le choix des cultures et les autres décisions de gestion agricole sont particulièrement difficiles lorsque l'on en connaît peu sur les risques de sécheresse ou la demande en eau à venir. Ce défi est particulièrement évident dans les pays en développement dont les économies dépendent souvent fortement de la production agricole et de l'exportation.

Les modèles traditionnels d'aide à la décision concernant l'alimentation, l'énergie et l'eau reposent sur des valeurs moyennes de paramètres dérivées de données historiques. Toutefois, cette approche n'est pas sans risque. Par exemple,

ÉTUDE DE CAS : SHANXI, CHINE

La pénurie d'eau est un problème omniprésent dans une grande partie de la Chine. La croissance démographique, l'augmentation de la demande alimentaire et la perturbation du régime des pluies et des chutes de neige due au changement climatique aggravent encore le problème. L'industrie du charbon est responsable de plus de 22 % du prélèvement total d'eau du pays, juste derrière l'agriculture irriguée, qui en représente plus de 60 %. Le Shanxi, première province chinoise productrice de charbon, est l'une des provinces du nord du pays où l'eau est la plus rare. Des décennies d'exploitation minière ont endommagé les nappes phréatiques et contaminé les réserves d'eau souterraine. Les habitants sont obligés de puiser dans les eaux souterraines, qui sont souvent pompées plus vite qu'elles ne peuvent être rechargées. Les années sèches peuvent provoquer l'assèchement des réservoirs et des rivières, et les niveaux des eaux souterraines s'abaissent, ce qui limite encore plus l'approvisionnement en eau potable.

Une équipe de scientifiques a utilisé des modèles de programmation stochastiques et contraints par le hasard pour assurer la sécurité alimentaire et énergétique de la région grâce à une utilisation efficace de l'eau dans la production de charbon. Des niveaux de sécurité alimentaire et énergétique plus élevés nécessitent des investissements plus importants dans les technologies d'économie d'eau qui permettent d'utiliser l'eau de manière plus efficace, et donc de garantir que la production nationale peut répondre à la demande même lorsque les réserves d'eau sont faibles. Les ressources financières étant limitées, le modèle a proposé des solutions qui donnent la priorité à l'introduction de technologies d'économie d'eau au fil du temps, en commençant par celles qui offrent des dividendes plus élevés en termes de sécurité à un coût moindre. Les technologies de refroidissement en circuit fermé et de refroidissement à l'air réduisent la consommation d'eau dans les centrales électriques au charbon par rapport au refroidissement en circuit ouvert, largement utilisé. Le passage à ces technologies économes en eau pourrait libérer de l'eau pour l'agriculture irriguée. Le déploiement du refroidissement en circuit fermé dans toutes les centrales électriques au charbon de Shanxi permettrait de répondre aux besoins alimentaires et énergétiques nationaux avec une probabilité de 24 %. Le déploiement du refroidissement par air augmenterait cette probabilité jusqu'à 40%.



les années où l'eau est inférieure à la moyenne, les solutions peuvent nécessiter plus d'eau que ce qui est disponible. Les décideurs doivent alors, soit réduire les objectifs de production et courir le risque d'une insuffisance de nourriture et d'énergie, soit donner la priorité à la production et retirer de l'eau aux ménages, soit exploiter le système d'eau au-delà des niveaux durables. De telles mesures, seules ou combinées, réduisent le bien-être humain.

OPTIMISATION SOUS INCERTITUDE

La programmation stochastique est un outil mathématique de plus en plus populaire pour modéliser les problèmes avec incertitude. Lorsque les paramètres du modèle sont inconnus ou incertains, les modélisateurs se tournent vers des distributions de probabilités — des fonctions qui montrent la relation entre le résultat d'un événement plausible et sa fréquence d'occurrence. Pour maximiser un ensemble d'avantages tout en minimisant les risques, ces modèles peuvent inclure des contraintes « aléatoires » pour que la probabilité de satisfaire à une contrainte spécifique soit supérieure à un certain niveau. Au niveau du Nexus Eau-Énergie-Sécurité Alimentaire, l'optimisation sous contrainte aléatoire permet aux décideurs de fixer des objectifs en matière de sécurité alimentaire et énergétique en fonction des probabilités cibles pour lesquelles les approvisionnements nationaux en nourriture et énergie doivent répondre à la demande domestique. Ces approches ont été particulièrement importantes en ingénierie et en finance, où les incertitudes en matière de prix, de demande, d'offre et de taux de change des devises sont courants. Plus récemment, elles ont été utilisées pour gérer les ressources en eau et les chaînes d'approvisionnement agricole, et pour optimiser les exigences des portefeuilles d'énergie renouvelable.

CONCLUSIONS

La programmation stochastique avec contraintes aléatoires est une approche efficace et pratique pour contrôler le risque dans la prise de décision en situation d'incertitude. Elle améliore le réalisme des recommandations du modèle car elle évite l'erreur de se fier aux moyennes. Les transitions en matière de développement durable reposent sur des processus qui impliquent de nombreuses incertitudes, et celles-ci doivent être prises en compte dans les modèles utilisés pour gérer ces transitions. Des approches mathématiques uniques permettent l'inclusion de probabilités pour atteindre les objectifs souhaités, donnant aux décideurs une marge de manœuvre supplémentaire pour atteindre les objectifs de développement durable.

RÉFÉRENCES

Gao, J., Xu, X., Cao, G.-Y., Ermoliev, Y. M., Ermolieva, T. Y. et Rovenskaya, E. A. 2018. Optimizing Regional Food and Energy Production under Limited Water Availability through Integrated Modeling. *Sustainability*, Vol. 10, p. 1689.

Gao, J., Xu, X., Cao, G.-Y., Ermoliev, Y. M., Ermolieva, T. Y. et Rovenskaya, E. A. 2021. Strategic decision-support modeling for robust management of the food–energy–water nexus under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 292, e125995.

Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau. 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risks. Paris, UNESCO.

AUTRICE

Elena Rovenskaya

Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA), Autriche



MODÉLISER LE CLIMAT

LA DYNAMIQUE ÉNERGÉTIQUE D'UN MONDE QUI SE RÉCHAUFFE

Un modèle mathématique simple mais puissant peut fournir un aperçu du passé, du présent et du futur du climat de la Terre. Le modèle d'équilibre énergétique estime la température de surface de la Terre en fonction des changements entre les quantités d'énergie entrant et sortant du système climatique. Ces modèles permettent aux climatologues de tester comment la température à la surface de la Terre réagit à des changements hypothétiques, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine. Les résultats des modèles climatiques permettent d'expliquer les climats passés et futurs et permettent des décisions éclairées sur les stratégies d'atténuation et d'adaptation.

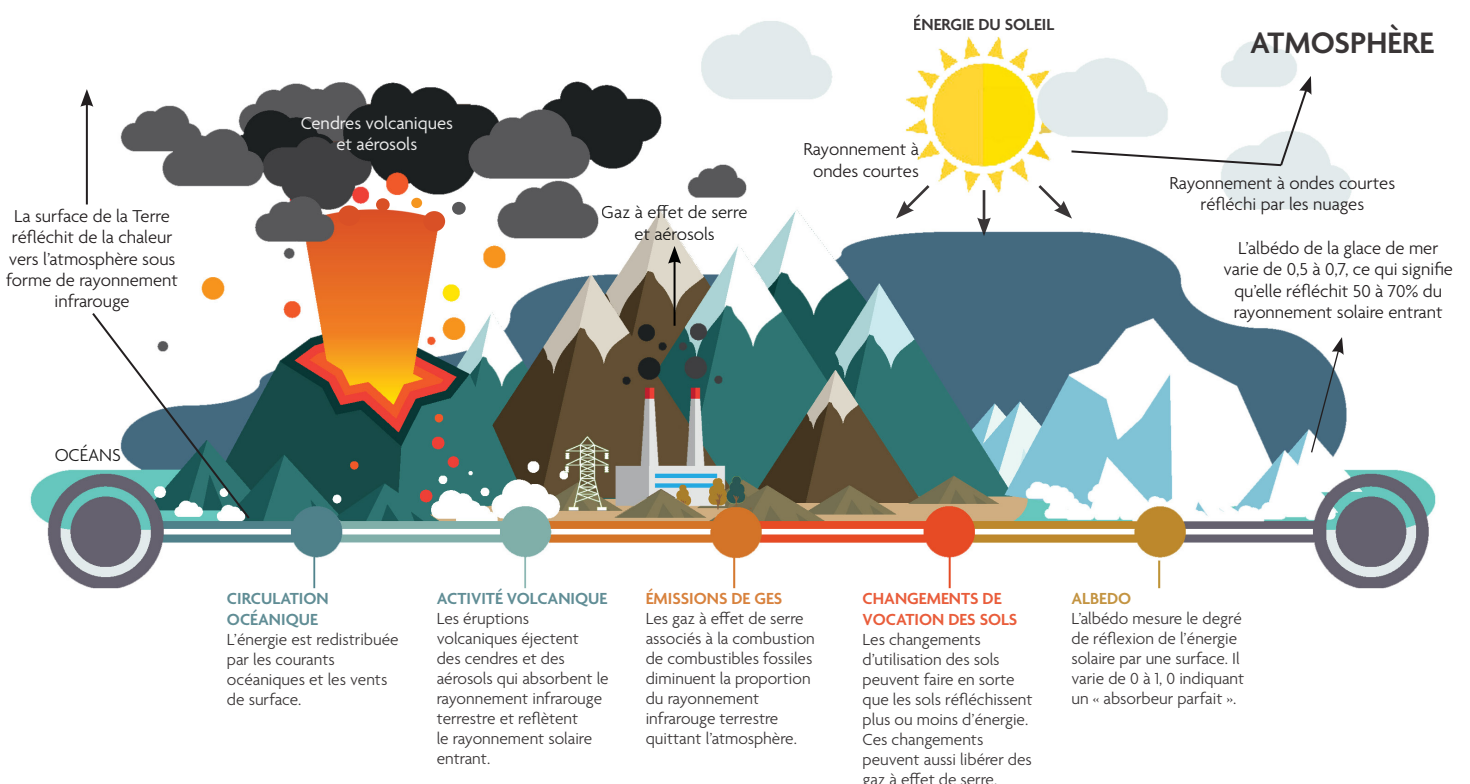
LE SYSTÈME CLIMATIQUE DE LA TERRE

Le système climatique de la Terre comprend cinq grands composants : l'atmosphère, les océans, la glace et le permafrost, les sols, et la biosphère (comprenant tous les organismes vivants). L'atmosphère agit comme un énorme moteur thermique, alimenté entièrement par l'énergie du soleil. Maintenir une température moyenne mondiale constante exige que toute l'énergie solaire entrant dans l'atmosphère soit éventuellement renvoyée vers l'extérieur. Si trop d'énergie est renvoyée dans l'espace, le système se refroidit ; il se réchauffe si trop d'énergie est absorbée. Parce que la surface de la Terre est chauffée

MESSAGES CLÉS

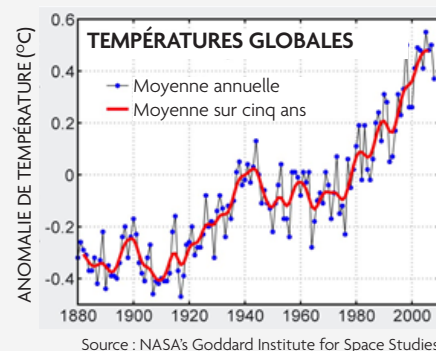
- ☑ L'atmosphère de la Terre agit comme un énorme moteur thermique, alimenté entièrement par l'énergie du soleil. Pour maintenir une température moyenne globale constante, toute l'énergie solaire qui entre dans l'atmosphère doit être renvoyée vers l'extérieur.
- ☑ Les modèles climatiques utilisent des expressions mathématiques pour simuler comment l'énergie et la matière interagissent dans les sous-systèmes terrestres. Ils vont des modèles conceptuels simples et dépouillés jusqu'aux modèles du système terrestre les plus avancés.
- ☑ Un modèle simple d'équilibre énergétique peut être utilisé pour tester la réponse des températures de surface de la Terre aux changements externes, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine.
- ☑ Les résultats des modèles climatiques fournissent des informations robustes pour aider les gouvernements, les décideurs politiques et le public à comprendre comment le climat de la Terre a évolué dans le passé, comment il évolue aujourd'hui, et ce que l'avenir nous réserve.

de manière inégale (l'équateur reçoit plus de rayonnement solaire que les pôles), la planète compense ces différences en redistribuant constamment l'énergie solaire via les vents de surface et les courants océaniques.



LE CLIMAT CHANGE

Le climat de la Terre n'est jamais statique ; il évolue en fonction des changements et des interactions des différents composants du système. Bien que le climat ait changé de manière spectaculaire à de nombreuses reprises au cours des 4,5 milliards d'années d'histoire de la planète, la plupart des changements de la température moyenne mondiale se sont produits lentement sur des dizaines de milliers, voire des millions d'années. La plupart de ces changements sont attribués à de petites variations de l'orbite de la Terre qui affectent la quantité d'énergie solaire entrant dans l'atmosphère. Cependant, au cours du siècle dernier, les températures moyennes mondiales ont augmenté à un rythme sans précédent, en grande partie à cause de l'activité humaine.



Divers facteurs externes peuvent modifier le bilan énergétique de la Terre. Ces facteurs, connus sous le nom de « forçages climatiques », peuvent être d'origine naturelle et humaine. Par exemple, les éruptions volcaniques modifient l'équilibre énergétique de la Terre en éjectant des aérosols et des nuages de gaz et de cendres qui absorbent les radiations terrestres et diffusent le rayonnement solaire entrant. Les forçages anthropiques comprennent les émissions de gaz à effet de serre qui piègent la chaleur et les changements d'affectation des sols qui font que les sols reflètent plus ou moins l'énergie solaire. Les forçages d'origine humaine ont augmenté depuis 1750, et leur effet domine désormais tous les forçages climatiques naturels.

MODÉLISATION DE SYSTÈMES COMPLEXES

Les systèmes complexes - comme le système climatique de la Terre - ne peuvent pas simplement être décomposés en un ensemble de parties individuelles, mais doivent être considérés de manière holistique comme un système d'interactions entre et au sein des différents composants. En tant que tels, ils sont difficiles à modéliser.

Les modèles climatiques utilisent des expressions mathématiques pour simuler comment l'énergie et la matière interagissent dans les sous-systèmes terrestres. Ils vont des modèles conceptuels simples et dépouillés aux modèles de pointe nécessitant des superordinateurs pour fonctionner. Les scientifiques les utilisent pour projeter les conditions climatiques futures selon divers scénarios, fournissant aux gouvernements et aux décideurs politiques des informations solides pour évaluer et mettre en œuvre des stratégies d'atténuation et d'adaptation.

LE MODÈLE D'ÉQUILIBRE ÉNERGÉTIQUE

Le modèle d'équilibre énergétique est la description la plus simple possible du système climatique. Il est utilisé pour estimer la température moyenne de la surface de la Terre en tenant compte de toute l'énergie qui entre et sort du système.

La Terre est chauffée par l'énergie du soleil, et l'énergie thermique qui n'est pas absorbée est renvoyée dans l'espace. Lorsque les énergies entrante et sortante se contrebalancent, le système est en équilibre. Les climatologues peuvent calculer la température moyenne de surface en égalisant les expressions mathématiques pour les énergies entrante et sortante.

Le modèle tient compte de l'impact de l'albédo, une mesure qui indique l'efficacité avec laquelle une surface reflète l'énergie solaire. La neige et la glace de mer, par exemple, ont un albédo

élevé car la majeure partie de l'énergie solaire est réfléchie sur leur surface sans être absorbée. Les modèles de bilan énergétique plus sophistiqués tiennent également compte de l'effet de serre, selon lequel la surface de la Terre doit se réchauffer pour émettre plus d'énergie infrarouge afin de compenser l'ajout des gaz à effet de serre.

Les modèles d'équilibre énergétique permettent aux scientifiques de tester la façon dont la température de surface de la Terre réagit à des changements hypothétiques par forçages naturels et humains. Par exemple, si la glace de mer fond, l'albédo diminue, ce qui augmente la température. Si les émissions de dioxyde de carbone augmentent, l'émissivité atmosphérique, c'est-à-dire la transparence de l'atmosphère, diminue, ce qui pousse la température vers le haut. Avec seulement un nombre limité de variables et de paramètres, ce modèle conceptuel simple peut fournir un aperçu puissant du climat futur.

UNE COMPLEXITÉ CROISSANTE

Pour étudier le climat d'une région ou d'un continent, les scientifiques peuvent introduire ces équations d'équilibre énergétique dans des modèles compartimentaux. Chaque compartiment (ou boîte) représente une colonne du système climatique au-dessus d'une surface donnée. Ils peuvent également inclure et combiner certains paramètres terrestres, océaniques et glaciaires pour simuler des scénarios climatiques à grande échelle. Les modèles de circulation générale sont les plus complexes et les plus précis et intègrent un large éventail de processus physiques, notamment la circulation océanique et la chimie atmosphérique, représentés par des millions de variables et de paramètres.

RÉFÉRENCES

Kaper, H. et Engler, H. 2013. *Mathematics and Climate*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia.

GIEC. 2014. R. K. Pachauri et L. A. Meyer (eds), *Climate Change 2014: Rapport synthèse*. Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, GIEC.

National Research Council. 2006. *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years*. Washington, DC, The National Academies Press.

AUTEUR

Hans Kaper
Université Georgetown, États-Unis



FAIRE FACE AUX CLIMATS FUTURS

MODÉLISER LE CLIMAT POUR DE MEILLEURES DÉCISIONS

Le changement climatique d'origine humaine a provoqué des impacts rapides, dramatiques et sans précédent sur la planète. Aucun pays n'est à l'abri des effets du changement climatique sur la santé et la société, mais les pays les plus pauvres du monde n'ont qu'une capacité limitée à s'adapter à ces impacts et à répondre aux dommages. Les outils, méthodes et théories mathématiques aident les scientifiques à comprendre comment les influences naturelles et anthropiques affectent le climat de la Terre. De plus en plus détaillées et précises, les sorties de modèles fournissent des informations pour la prise de décisions politiques et régionales. Ces informations permettront aux pays d'intensifier et d'accélérer les activités d'adaptation et de réduction des risques de catastrophe.

Le rapport 2021 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), rédigé par des centaines de scientifiques de renom et signé par les 195 pays membres, a conclu que le changement climatique est en marche et qu'il est causé de manière sans équivoque par les activités humaines. Les combustibles fossiles, la déforestation et d'autres activités humaines libèrent des gaz à effet de serre qui retiennent la chaleur du soleil, réchauffant ainsi l'atmosphère et la surface de la Terre. Depuis le 19^e siècle, l'homme a déjà réchauffé la planète d'environ 1,1 degré Celsius. Cela affecte toutes les régions de la planète et l'ensemble du système climatique de la Terre. Beaucoup de ces changements sont sans précédent au cours des deux derniers millénaires ou plus.

Les modèles mathématiques qui simulent le climat de la Terre sont au cœur de la recherche sur le climat. Au cours des 50 dernières années, ils ont permis aux scientifiques de mieux comprendre le système climatique, de tester des hypothèses et d'en tirer des conclusions sur les systèmes climatiques passés et futurs, et de hiérarchiser les réponses humaines appropriées.

MODÉLISATION DU CLIMAT

Les modèles climatiques sont des systèmes d'équations différentielles basés sur les lois fondamentales de la physique, du mouvement des fluides et de la chimie. Ils caractérisent la façon dont l'énergie et la matière interagissent pour entraîner les différents composants du système climatique de la Terre : l'atmosphère, les océans, la biosphère et les régions terrestres et glacées de la planète.

Plutôt que de traiter la Terre comme un tout, les modèles climatiques utilisent des méthodes numériques qui la divisent en une grille de petites cellules tridimensionnelles. La taille de ces mailles définit la résolution spatiale du modèle. Les modèles à haute résolution ont des cellules plus nombreuses et plus petites. Le modèle permet également de diviser le temps en

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les outils et théories mathématiques sont fondamentaux pour comprendre le changement climatique et anticiper ses risques. Ils permettent de prévoir les impacts, de prendre des décisions éclairées en matière d'atténuation et d'adaptation, et pour fixer les objectifs de la politique climatique aux échelles nationales et internationale.
- ✓ Les modèles mathématiques de pointe qui simulent le système climatique de la Terre permettent aux scientifiques de prévoir, à partir des lois fondamentales de la physique, comment le climat évoluera à l'avenir.
- ✓ Les modèles climatiques sont alimentés par les scénarios de forçage radiatif fondés sur la façon dont les facteurs socio-économiques pourraient changer au cours du prochain siècle.
- ✓ Le cadre des facteurs d'impact climatique (CID) permet de faire le lien entre les résultats des modèles et les actions climatiques. Il est pertinent pour les services climatiques, pour l'évaluation des risques liés au climat, pour la planification de l'adaptation et pour la prise de décision

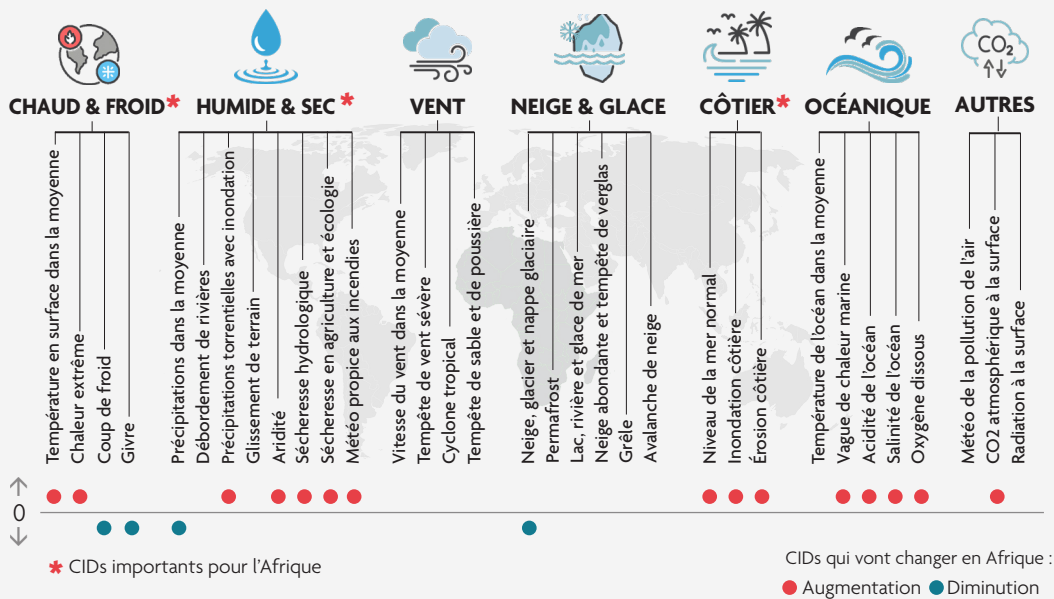
pas de temps plus petits. Un pas de temps plus petit fournit des informations climatiques plus détaillées mais nécessite plus de calculs à chaque exécution. Le modèle climatique calcule l'état du système climatique dans chaque cellule et évalue les interactions avec les cellules voisines. En résolvant numériquement les équations qui capturent les mécanismes sous-jacents du climat, les modèles climatiques simulent l'évolution dans le temps des conditions dans chaque cellule.

Les principaux éléments entrant dans les modèles climatiques sont les agents de forçage qui modifient l'équilibre énergétique de la Terre et contribuent au changement climatique. Il s'agit du rayonnement solaire, des gaz à effet de serre, des aérosols, de l'activité volcanique et des changements d'utilisation des sols. Ceux-ci exercent un forçage radiatif qui va modifier les températures, les vents, les précipitations et d'autres paramètres du système climatique. Ces forçages climatiques sont inclus dans les modèles pour estimer les conditions passées ou développer des scénarios de changement climatique.

SCÉNARIOS FUTURS

Il existe une incertitude quant au futur de la croissance démographique et économique, de l'éducation, de l'urbanisation et du taux de développement technologique. Ces incertitudes peuvent entraîner des forçages climatiques très différents. Pour explorer et évaluer les climats futurs possibles, les scientifiques utilisent des modèles climatiques en combinaison avec des scénarios pour produire des alternatives plausibles.

ETUDE DE CAS : LES FACTEURS D'IMPACT CLIMATIQUE EN AFRIQUE



Les modèles climatiques prévoient que d'ici le milieu du siècle, de multiples facteurs d'impact climatique (CID) vont changer en Afrique. Dans toutes les régions, les températures moyennes et extrêmes augmenteront, et les périodes de froid diminueront. La fréquence et l'intensité des fortes précipitations devraient augmenter dans presque toutes les régions. Les changements de l'ampleur, de la fréquence, de la durée, de la saisonnalité et de l'étendue de ces CIDs menaceront la santé humaine, la sécurité alimentaire et hydrique, et le développement socio-économique. Associés aux services climatiques, le cadre des CIDs fournit des informations permettant de planifier un développement résilient au climat.

En 2014, les chercheurs ont publié les trajectoires socio-économiques partagées (SSP), un nouvel ensemble de voies alternatives de développement sociétal. Les cinq SSP décrivent une série de tendances plausibles des forçages radiatifs au cours du siècle prochain. Les modèles mathématiques utilisent ces scénarios pour expliquer comment la température et les précipitations de la Terre évolueront selon les différentes trajectoires des SSP. Le scénario de forçage le plus fort entraîne un changement de température plus important et vice-versa.

FACTEURS D'IMPACT CLIMATIQUE

Dans son sixième rapport d'évaluation, le GIEC a introduit le cadre des facteurs d'impact climatique (CID) pour aider à traduire les sorties de modèles de conditions climatiques physiques (moyennes, événementiels et extrêmes) en ce qu'ils signifient pour la société et les écosystèmes. Les 33 CID peuvent être néfastes, bénéfiques, neutres ou un mélange. Le cadre des CID fournit aux décideurs des informations climatiques exploitables et pertinentes afin d'éclairer la planification de l'adaptation régionale, de l'atténuation et de la gestion des risques.

SERVICES CLIMATIQUES

Les services climatiques fournissent des informations relatives aux CID sous une forme qui aide la société civile et les organisations gouvernementales à prendre de meilleures décisions en matière d'adaptation et de gestion des risques. En fonction des besoins, ces données et informations peuvent être combinées avec des données non météorologiques, telles que les tendances en matière de population, de production agricole et de santé, et d'autres données socio-économiques. Ces services sont plus efficaces lorsqu'ils sont développés en collaboration avec les utilisateurs, en s'assurant que ces derniers peuvent accéder à l'information, l'interpréter et l'utiliser.

CONCLUSIONS

Les méthodes, outils et théories mathématiques jouent un rôle essentiel dans la recherche sur le climat. À ce jour, la modélisation mathématique reste la seule approche efficace pour prédire l'évolution du système climatique de la Terre en réponse aux influences naturelles et anthropiques. Malgré les énormes progrès réalisés ces cinquante dernières années, des approches mathématiques plus sophistiquées sont nécessaires pour révolutionner la qualité des informations disponibles pour la prise de décision en matière d'atténuation et d'adaptation.

RÉFÉRENCES

Dosio A, Jury MW, Almazroui M, Ashfaq M, Diallo I, Engelbrecht FA, Klutse NA, Lennard C, Pinto I, et Sylla MB (2021) Projected future daily characteristics of African precipitation based on global and regional climate models. *Climate Dynamics* pp. 1–24.

Ranasinghe, R., A.C. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F.A. Cruz, S. Dessai, A.S. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M.B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, et R. Zaaboul, 2021: Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, in press.

Riahi, K. et al. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, Volume 42, pp. 153-168.

AUTEUR

Mouhamadou Bamba Sylla
 AIMS, Rwanda



PRÉVOIR LES CYCLONES

LES MATHÉMATIQUES DE LA PRÉVISION DES CYCLONES TROPICAUX

Les cyclones tropicaux sont parmi les événements météorologiques les plus dommageables et les plus destructeurs, juste derrière les tremblements de terre en termes de décès dans le monde. Une prévision précoce et précise permet aux responsables de la gestion d'urgence, au secteur privé et au public en général de prendre des décisions plus éclairées lors des grandes tempêtes, réduisant ainsi les pertes humaines et matérielles. Les améliorations apportées aux modèles mathématiques de prévision, couplées à la collecte et à l'analyse de données en temps réel, ont considérablement amélioré la prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux, de sorte qu'aujourd'hui une prévision à cinq jours est aussi précise qu'une prévision à trois jours l'était il y a dix ans. Les efforts continus pour améliorer les prévisions de trajectoire peuvent également s'avérer utiles pour prévoir l'intensité avec laquelle les cyclones vont frapper.

Les cyclones tropicaux prennent naissance au-dessus des eaux chaudes de l'océan et se développent en d'énormes systèmes nuageux organisés circulant autour d'un centre de basse pression. Leur rotation intense et souvent dévastatrice résulte de l'effet de Coriolis, qui dévie les vents de tempête pour qu'ils tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord, et dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud.

Puisqu'ils tirent leur énergie de l'océan, en particulier des eaux chaudes, les cyclones tropicaux se produisent principalement entre les tropiques du Cancer et du Capricorne. Les cyclones tropicaux intenses qui se produisent dans l'océan Atlantique, appelés ouragans, peuvent affecter les Caraïbes et les États-Unis. Dans le Pacifique occidental, ils sont connus sous le nom de typhons et peuvent avoir un impact sur les régions côtières du Mexique, de l'Asie du Sud-Est, de l'Australie et des îles du Pacifique Sud. Les cyclones qui se forment dans l'océan Indien peuvent frapper l'Inde, le Bangladesh, la Tanzanie, le Mozambique, l'île Maurice et Madagascar.

Au cours des 20 dernières années, les vents puissants et les fortes pluies des cyclones ont tué plus d'un quart de million de personnes et en ont blessé ou déplacé un nombre incalculable d'autres. Ils ont un impact annuel de plusieurs milliards de dollars sur l'économie mondiale. Ces conséquences devraient s'intensifier avec l'élévation du niveau de la mer, le réchauffement des températures et d'autres changements liés au climat. Ce potentiel de dévastation à grande échelle souligne l'importance de disposer de prévisions précises et opportunes, qui permettent d'alerter rapidement les communautés côtières vulnérables.

AU-DELÀ D'UNE BOULE DE CRISTAL

Aujourd'hui, les modèles de prévision utilisent des modèles

MESSAGES CLÉS

- ✓ Les cyclones tropicaux sont l'une des plus grandes menaces pour la vie et les biens à travers le monde. En plus des vents violents et des ondes de tempête, ils menacent les communautés côtières et intérieures avec des pluies torrentielles et des inondations. L'amélioration des prévisions de la trajectoire et de l'intensité des tempêtes permettent des alertes précoces, précieuses pour les communautés vulnérables, et l'élaboration de plans précis d'urgence et d'évacuation.
- ✓ Les prévisions de trajectoire des cyclones tropicaux se sont considérablement améliorées, grâce à plus d'observations, de meilleurs modèles, et une meilleure intégration observations-modèle via l'assimilation des données.
- ✓ Les prévisions précises de l'intensité des cyclones tropicaux restent difficiles. Une compréhension mathématique des mécanismes physiques de la dynamique des cyclones tropicaux peut s'avérer précieuse pour comprendre comment et pourquoi les cyclones s'intensifient et améliorer les prévisions d'intensité en temps réel.

dynamiques de l'atmosphère pour prédire le comportement futur de la trajectoire et de l'intensité d'un cyclone tropical. Ces modèles reposent sur des équations mathématiques dérivées des lois fondamentales de la physique, y compris les lois du mouvement et de la thermodynamique. Par exemple, la deuxième loi du mouvement de Newton stipule qu'une force (F) agit sur une masse (m) et produit une accélération (a). Cette relation — $F = ma$ — peut aider à prédire la vitesse future du vent d'un cyclone. Ces lois sont exprimées sous forme d'un système d'équations aux dérivées partielles.

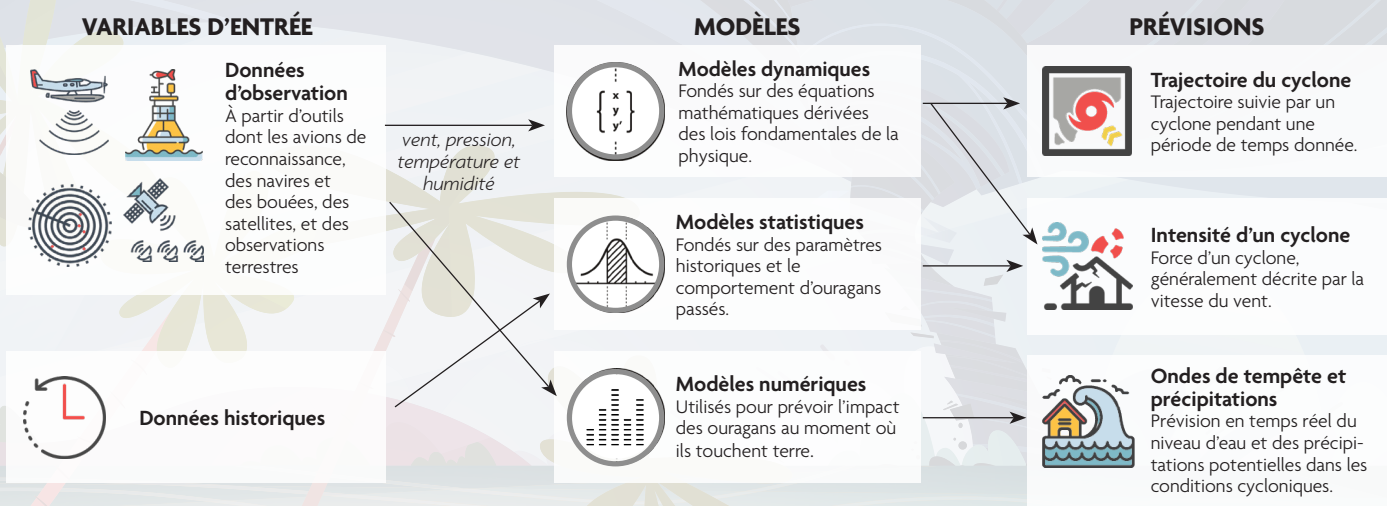
Les prévisionnistes utilisent des données d'observation provenant de satellites, d'avions de reconnaissance, de navires, de bouées et de radars pour décrire les conditions initiales de l'atmosphère, puis résolvent les équations mathématiques du modèle pour prédire l'évolution dans le temps et l'espace des conditions atmosphériques, notamment la densité, la pression, la température, et la vitesse du vent aux différentes positions.

Pour les prédictions sur la fréquence et l'intensité des cyclones qui se produiront au cours de la saison à venir — appelées perspectives saisonnières — les prévisionnistes utilisent principalement des modèles statistiques basés sur les relations historiques entre des paramètres météorologiques et le comportement des ouragans passés. Les modèles statistiques sont beaucoup plus simples et rapides à simuler que les modèles dynamiques, mais ils sont généralement moins précis.

AVANCÉES EN MATIÈRE DE PRÉVISIONS

Les modèles de suivi des cyclones tropicaux se sont

MODÉLISATION DES PRÉVISIONS DES CYCLONES TROPICAUX



constamment améliorés au cours du dernier demi-siècle. En 2019, les prévisions de trajectoire à cinq jours étaient meilleures que les prévisions à 36 heures des années 1970. La précision des prévisions sur un horizon temporel étendu s'est également améliorée. Aujourd'hui, la trajectoire d'un cyclone tropical peut être prévue jusqu'à une semaine à l'avance, ce qui donne aux villes le temps nécessaire pour évacuer en toute sécurité. Ces progrès sont dus en grande partie à l'amélioration des modèles mathématiques exécutés sur des superordinateurs plus puissants, à la disponibilité en temps réel de données à haute résolution provenant de satellites sophistiqués et d'avions de reconnaissance météorologique, ainsi qu'à des méthodes révolutionnaires d'assimilation de données permettant d'ajuster en temps réel les modèles en fonction des nouvelles données d'observation.

La prévision de l'intensité d'un cyclone a progressé à un rythme beaucoup plus lent. Pour améliorer la précision des prévisions d'intensité, les scientifiques ont identifié le besoin d'une résolution accrue des modèles, d'ordinateurs plus puissants, d'observations plus poussées et d'une meilleure compréhension de la région centrale du cyclone.

L'OËIL DE LA TEMPÊTE

Le noyau interne d'un cyclone tropical, ou mur de l'œil, est la zone où les vents de surface sont les plus forts, et les pluies, les plus abondantes. Il entoure l'œil relativement calme du cyclone. Une compréhension mathématique de la structure des cyclones et de leur circulation au cours de leur cycle de vie a permis d'améliorer de manière significative la conception des modèles de simulation informatique et de prévisions. Par exemple, dans les années 1950, le météorologue norvégien Arnt Eliassen – un pionnier de la météorologie numérique – a mis au point un modèle mathématique classique de cyclone tropical qui consiste en un tourbillon circulaire équilibré à l'intérieur d'un fluide ambiant au repos. Des développements mathématiques récents ont montré qu'un tel tourbillon représente un état d'énergie minimal naturel du système et peut donc expliquer le noyau interne destructeur souvent observé dans les cyclones tropicaux. Ces modèles permettent également d'expliquer la diminution observée de la vitesse du vent lorsqu'on s'éloigne de ce noyau.

CONCLUSIONS

La prévision des cyclones tropicaux a le potentiel de sauver des vies et de réduire les dommages matériels. Avec un climat plus chaud, on prévoit une augmentation de la force des cyclones. L'augmentation de l'intensité des cyclones, combinée à l'augmentation de la population humaine et aux autres changements atmosphériques font de la compréhension et de la prévision plus précise des cyclones tropicaux un domaine de recherche essentiel. De nombreuses études suggèrent que la valeur économique de l'amélioration des prévisions s'est chiffrée en milliards de dollars au cours des dernières décennies.

Il est maintenant possible d'impliquer une communauté plus large de chercheurs et de prévisionnistes pour mieux comprendre comment les conditions environnementales déterminent et affectent les ouragans et de développer et partager de nouvelles approches de prévision et de nouveaux ensembles de données. Les collaborations sont particulièrement importantes pour les nombreux petits pays et les pays en développement qui disposent de ressources limitées pour développer des prévisions fiables en temps réel.

RÉFÉRENCES

- Cullen, M. 2021. *The mathematics of large-scale atmosphere and ocean*, Singapore, World Scientific Press.
- Cullen, M., Gangbo, W., et Sedjro, M. 2015. A mathematically rigorous analysis of forced axisymmetric flows in the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 141, No. 690, pp. 1836-1844.
- Cullen, M. et Sedjro M. 2014. On a model of forced axisymmetric flows. *SIAM J. Math. Anal.*, Vol. 46, No. 6, pp. 3983-4013.
- Eliassen, A. et Kleinschmidt, E. 1957. *Dynamic Meteorology*. Vol. 47, *Handbuch der Physik*, Springer-Verlag.

AUTEURS

Marc Sedjro
Togo

Mike Cullen
Met Office (retraité), Royaume-Uni



ÉVÉNEMENTS MÉTÉO EXTRÊMES

LA NOUVELLE SCIENCE DE L'ATTRIBUTION DES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

Depuis 1970, des événements météorologiques extrêmes se sont produits chaque jour, en moyenne, au cours des 50 dernières années, selon l'Organisation météorologique mondiale. Être capable de relier ces événements au changement climatique et le faire rapidement peut être un outil incroyablement puissant pour communiquer l'urgence et les conséquences du réchauffement de la planète. La science émergente de l'attribution des événements extrêmes utilise des approches mathématiques pour déterminer dans quelle mesure le changement climatique d'origine humaine a contribué à des événements extrêmes. La science de l'attribution a atteint un stade de maturité tel que le nombre et l'intensité des risques météorologiques extrêmes causés par le changement climatique peuvent être estimés.

PUIS-JE BLÂMER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Le nombre d'événements météorologiques extrêmes a quintuplé au cours des 50 dernières années, principalement à cause du changement climatique. Il est normal qu'une personne touchée par une catastrophe se demande si c'était un événement naturel ou un événement causé par l'homme en raison du réchauffement de la planète. Alors que la vulnérabilité et l'exposition sont les principaux moteurs de l'impact humain des catastrophes, la technique relativement nouvelle connue sous le nom de détection et attribution fournit des informations quantitatives sur la probabilité et l'ampleur des événements extrêmes. Tout comme un épidémiologiste tente d'identifier les facteurs de causalité qui contribuent au développement ou à la prévention d'une maladie, les scientifiques de l'attribution utilisent des modèles mathématiques pour vérifier si, et dans quelle mesure, le réchauffement climatique d'origine humaine a joué un rôle dans un phénomène météorologique extrême.

La science de l'attribution des événements météorologiques extrêmes a commencé après la vague de chaleur de 2003 qui a tué 70 000 personnes en Europe. C'était un événement plus chaud que tout ce qui avait été enregistré sur le continent depuis 500 ans. Jusqu'alors, les études de détection et d'attribution se limitaient à quantifier les variations à long terme des variables climatiques, plus particulièrement la température ou les précipitations extrêmes. Les climatologues s'étaient abstenus de statuer sur la cause humaine des événements individuels. Lorsqu'on posait la question on obtenait des réponses du type « Nous ne pouvons pas nous prononcer sur cet événement particulier, mais de tels changements sont ce à quoi nous nous attendons. » Aujourd'hui, des déclarations d'attribution quantitative sont régulièrement faites pour une gamme toujours plus grande d'événements météorologiques extrêmes isolés.

MESSAGES CLÉS

- ✓ Le nombre d'événements météorologiques extrêmes a augmenté au cours des 50 dernières années.
- ✓ Il est désormais possible, grâce aux méthodes d'attribution des événements extrêmes, de faire des déclarations quantitatives sur l'influence du réchauffement climatique d'origine humaine sur des événements météorologiques extrêmes spécifiques.
- ✓ L'attribution de phénomènes extrêmes est une utilisation formelle de techniques d'inférence causale. La confiance dans les déclarations d'attribution est renforcée lorsque plusieurs méthodes, modèles mathématiques et sources de données conduisent à des conclusions similaires. Ces conclusions peuvent être des outils puissants pour adapter les comportements et les infrastructures au changement climatique.
- ✓ L'inférence causale, associée à une compréhension des processus physiques clés a révélé que l'influence humaine sur le système climatique, y compris sur les extrêmes, est indiscutable.

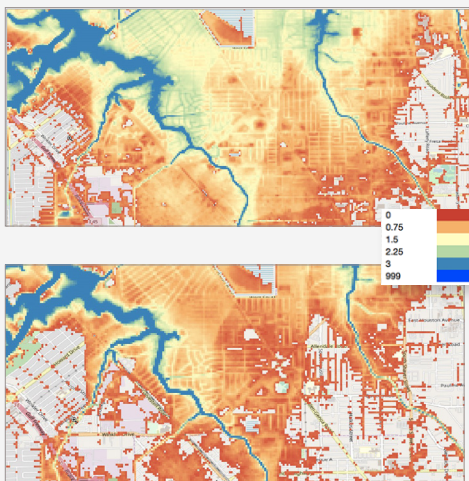
DES RÉSULTATS PLUS PRÉCIS

En utilisant l'inférence causale statistique, les scientifiques de l'attribution posent deux questions liées : « Le changement climatique a-t-il affecté la probabilité d'occurrence d'un événement de l'ampleur observée ? » et « Le changement climatique a-t-il affecté l'ampleur d'événements d'une rareté similaire à celle observée ? » Deux classes de méthodes d'inférence causale peuvent être utilisées pour répondre à ces questions.

La causalité de Pearl nécessite une interférence, souvent un placebo dans les essais médicaux cliniques. Comme il n'y a qu'une seule Terre, les scientifiques de l'attribution utilisent plutôt des modèles climatiques. Des simulations du climat actuel, configurées de manière aussi réaliste que possible, sont comparées à des simulations contrefactuelles équivalentes dans lesquelles les contributions humaines aux gaz à effet de serre sont supprimées.

Une deuxième classe d'énoncés d'inférence causale sans interférence peut être faite à partir des seules données observées. La causalité de Granger est démontrée en construisant des modèles statistiques qui utilisent des paramètres pour représenter les influences naturelles et humaines. En testant statistiquement ces paramètres on peut révéler leurs rôles relatifs dans la fréquence et l'ampleur des phénomènes météorologiques extrêmes. Cependant, comme la corrélation seule n'implique pas de causalité, il doit y avoir un mécanisme physique solide pour permettre toute conclusion.

ÉTUDE DE CAS : L'OURAGAN HARVEY À HOUSTON, TEXAS



Les études sur l'attribution des tempêtes violentes sont récentes. Les premières déclarations d'attribution de cyclone tropical ont été faites en 2017 à propos de l'ouragan Harvey, un ouragan dévastateur de catégorie 4 qui a touché la côte du Texas. La tempête a déversé l'équivalent d'une année de pluie en moins d'une semaine sur la ville de Houston, où un habitant sur 4,7 vit sous le seuil de pauvreté.

Trois groupes indépendants ont conclu que le réchauffement climatique a augmenté de façon significative les précipitations de la tempête et les inondations qui ont suivi. Avant ces études, la plupart des spécialistes, incluant l'auteur, pensaient que l'augmentation des précipitations extrêmes due à l'homme serait dictée par la thermodynamique et limitée à environ 7 % par degré Centigrade de réchauffement, comme l'indique la relation Clausius-Clapeyron du 19^e siècle. Toutefois, l'analyse de l'ouragan Harvey et d'autres ouragans révèle que les précipitations extrêmes des cyclones tropicaux augmentent avec le réchauffement à un rythme nettement supérieur à celui dû à la seule thermodynamique, ce qui révèle que les processus dynamiques sont également importants.

En haut : Simulation de la hauteur de l'inondation provoquée par l'ouragan Harvey dans le quartier de South Houston. **En bas** : Simulation de l'inondation contrefactuelle due à l'ouragan Harvey sans la contribution actuelle du changement climatique.

Cette recherche a été supportée par le Director, Office of Science, Office of Biological and Environmental Research du U.S. Department of Energy dans le cadre du contrat n° DE340AC02-05CH11231 et du financement du programme Regional Modeling Analysis.

Pour la vague de chaleur meurtrière de 2003 en Europe, un groupe de scientifiques du Royaume-Uni a découvert que ces chaleurs extrêmes étaient deux fois plus probables avec le changement climatique que sans, répondant ainsi à la première question d'attribution. Aujourd'hui, près de 20 ans plus tard, le réchauffement climatique continu a multiplié le risque de telles vagues de chaleur par dix ou plus. Pour la deuxième question d'attribution, on estime que le changement climatique a augmenté la température de ces rares vagues de chaleur d'environ 0,5°C en 2003 à environ 2°C en 2021.

Le degré auquel le réchauffement climatique modifie le risque associé à une vague de chaleur particulière varie. Par exemple, la vague de chaleur de 2015 au Pakistan était en même temps très humide. En cas de forte humidité, l'air est saturé de vapeur d'eau, ce qui limite l'effet de refroidissement par évaporation de la transpiration. Les scientifiques chargés de l'attribution ont conclu que le changement climatique a augmenté les chances de cet événement d'un facteur au moins 1000. Il est juste de dire que toutes les vagues de chaleur extrême récentes et futures sont ou seront plus sévères à cause des niveaux actuels du changement climatique.

L'inférence causale statistique appliquée aux tempêtes, aux sécheresses, et à d'autres phénomènes météorologiques extrêmes a conduit à des conclusions similaires sur le rôle du changement climatique dans ces événements.

COMMUNIQUER LES RISQUES

Les résultats des études d'attribution peuvent fournir des preuves convaincantes de l'urgence — et des conséquences catastrophiques — du changement climatique et permettre des décisions éclairées sur la gestion des risques et le choix des stratégies d'adaptation. Par exemple, les cartes des crues qui ne tiennent pas compte du changement climatique sont susceptibles de sous-estimer le risque réel d'inondation. De même, le risque pour les biens et les vies lié aux vagues de chaleur et à l'intensité des ouragans peut être quantifié par l'attribution des événements.

Mais comme pour toute déclaration d'inférence causale, il est important de réaliser le cadre statistique sous-jacent de l'attribution des événements météorologiques extrêmes. Ainsi, accuser le changement climatique pour les dommages causés par un événement extrême peut être correct dans un sens probabiliste. Les études d'attribution aident également les climatologues à mieux comprendre le mécanisme physique des changements dans les événements météorologiques extrêmes alors que le climat se réchauffe. Ce deuxième objectif est inclus dans le 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC. « Il est indiscutable que les activités humaines sont à l'origine du changement climatique, rendant les événements climatiques extrêmes, notamment les vagues de chaleur, les fortes pluies et les sécheresses, plus fréquents et plus graves. »

CONCLUSIONS

Alors que le climat continue à se réchauffer, l'influence humaine sur la gravité et le risque de phénomènes météorologiques extrêmes augmente, et les déclarations d'attribution concernant les événements météorologiques extrêmes sont utiles pour développer des stratégies visant à contrôler la vulnérabilité et l'exposition et pour mieux prévenir les catastrophes.

RÉFÉRENCES

- Perkins-Kirkpatrick, S. E., Stone, D. A., Mitchell, D. M., Rosier, S., King, A. D., Lo, Y. T. E., Pastor-Paz, J., Frame, D., et Wehner, M. 2021. On the attribution of the impacts of extreme weather events to anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters*.
- Stott, P. A., Stone, D. A., et Allen, M. R. 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, Vol. 432, pp. 610–614.
- Wehner, M. et Sampson, C. 2021. Attributable human-induced changes in the magnitude of flooding in the Houston, Texas region during Hurricane Harvey. *Clim. Change*, Vol. 166, No. 20.
- Wehner, M., et al. 2016. The Deadly Combination of Heat and Humidity in India and Pakistan in Summer 2015. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 97, pp. S81–S86.

AUTEUR

Michael Wehner

Lawrence Berkeley National Laboratory, États-Unis



COMPRENDRE LA MOUSSON INDIENNE

AMÉLIORATION DE LA PRÉVISIBILITÉ DES PLUIES ANNUELLES D'ÉTÉ

La mousson d'été indienne est un phénomène dramatique à plusieurs échelles qui affecte profondément les moyens de subsistance de milliards de personnes dans la région. Chaque année, l'Inde attend avec impatience les prévisions de l'arrivée de la mousson, de son intensité et de sa durée. Non seulement les pluies qui nourrissent les cultures sont essentielles pour l'économie du pays, mais ce spectacle annuel apporte également joie et soulagement lorsque la chaleur sèche de l'été cède la place à des températures plus fraîches et à une eau abondante. La compréhension de la dynamique et des variations de ce système météorologique complexe est essentielle pour améliorer les capacités prédictives des prévisions de mousson et, plus généralement, des modèles météorologiques et climatiques numériques.

DE SEC À HUMIDE

Le début de la mousson d'été en Inde suit le réchauffement par le soleil de la surface de la Terre au printemps et en été. Le réchauffement conduit à des terres plus chaudes et des eaux océaniques plus froides, produisant un gradient de température qui provoque une inversion des vents à grande échelle dans le nord de l'océan Indien. Les vents du sud-ouest amènent des bandes nuageuses massives de l'océan équatorial vers le continent, faisant passer le pays de l'état sec à l'état pluvieux.

Les pluies de mousson commencent généralement en juin et, en septembre, elles auront déversé environ 850 mm d'eau, soit près de 80 % du total annuel des précipitations du pays. Ce phénomène se produit avec une régularité remarquable, à la fois en termes de calendrier — de 5 à 7 jours près au début et à la fin — que dans le total des précipitations, avec des variations d'environ 10 % par rapport à la moyenne. Mais ces variations apparemment minimales peuvent avoir des implications considérables pour l'agriculture et l'économie.

Au moment où une partie de l'Inde subit de graves inondations, l'autre est probablement confrontée à une grave pénurie d'eau. Et la situation peut basculer en l'espace de quelques jours. Comme la grande majorité de la production agricole du continent est alimentée par la pluie, toute connaissance préalable de variations de l'intensité et de la durée de la

MESSAGES CLÉS

- ✓ La modélisation mathématique est fondamentale pour prévoir l'arrivée, l'intensité et la durée de la mousson annuelle. Ces prévisions sont vitales pour la société, l'agriculture, le tourisme et le développement économique indiens.
- ✓ L'amélioration des capacités de modélisation est essentielle pour améliorer la prévisibilité des moussons à différentes échelles de temps : quotidienne, mensuelle et multi-décennale. L'amélioration des modèles permet également de comprendre les variations spatiales des précipitations de mousson.
- ✓ Le couplage du changement climatique avec les modèles est essentiel pour comprendre l'évolution future des moussons.
- ✓ De nouvelles données, assorties d'outils d'analyse de ces données, sont nécessaires pour construire des modèles suffisamment précis des intrications de la dynamique complexe des moussons.

mousson est vitale pour la société indienne, et en particulier pour les agriculteurs.

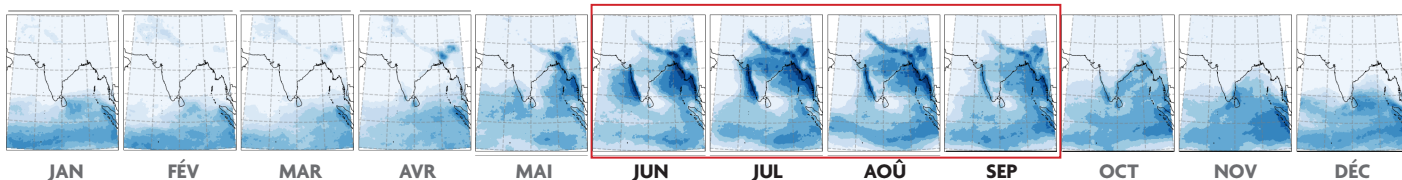
OÙ, QUAND ET COMBIEN ?

Une étude détaillée des variations spatio-temporelles de la mousson nécessite une variété de modèles mathématiques, car aucun modèle ne peut rendre compte de tous les aspects de ce phénomène complexe. Les outils statistiques permettent d'extraire des caractéristiques persistantes et intéressantes des précipitations. Certains des modèles les plus simples pour capter la dynamique de ces caractéristiques sont basés sur des équations différentielles ordinaires. Par contre, l'interaction complexe entre les précipitations, la terre, l'océan, la couverture neigeuse, et l'atmosphère, y compris les gaz à effet de serre et les aérosols, ne peut être captée que par des modèles qui nécessitent des superordinateurs.

En plus de permettre une meilleure compréhension des moussons, les modèles mathématiques sont également utilisés pour faire des prévisions à différentes échelles de temps.

PRÉCIPITATIONS MENSUELLES SUR LE SOUS-CONTINENT INDIEN

Saison de la mousson d'été indienne

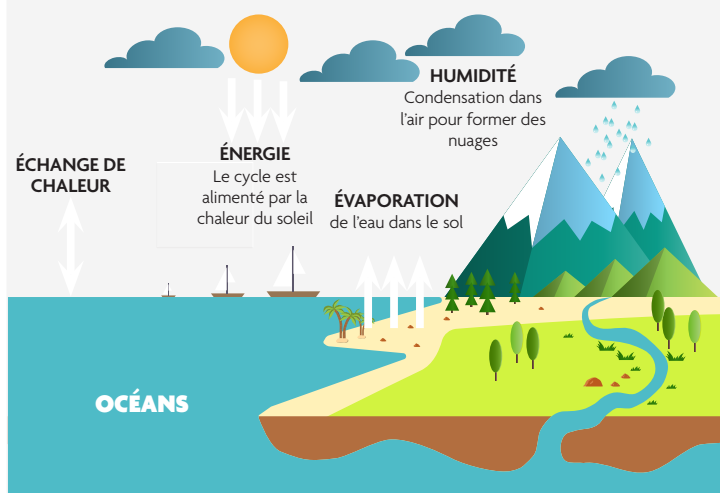


EXEMPLE DE MODÉLISATION MATHÉMATIQUE LE CYCLE DE L'EAU

En utilisant des représentations mathématiques de l'atmosphère, de l'océan et de la terre, les modèles peuvent simuler des phénomènes météorologiques et climatiques complexes tels que les moussons et le phénomène El Niño. Le rôle vital que joue la mousson d'été indienne dans le cycle hydrologique mondial est capté dans les modèles mathématiques qui simulent la dynamique des échanges d'énergie et d'humidité au sein du système terrestre.

L'eau s'évapore, mais le taux d'évaporation dépend de la température, de l'humidité et des vents. Lorsque l'air atmosphérique est saturé, la vapeur d'eau se condense pour former de petites gouttelettes d'eau ou des flocons de neige qui forment les nuages. Si les gouttelettes deviennent suffisamment grosses, elles tombent sur le sol sous forme de pluie ou de neige. Cette eau finit par s'évaporer et le cycle se poursuit.

Un modèle mathématique simple pour un tel processus devrait tenir compte de la teneur en eau du sol, de l'humidité dans l'air, et de l'énergie nécessaire à ce cycle. Les équations différentielles ordinaires pour ces variables devraient être destinées à capter divers processus allant de simples variations périodiques à des variations plus imprévisibles et chaotiques. Un modèle plus sophistiqué devrait inclure les effets des vents et des océans, et leurs interactions avec l'atmosphère.



Ces prévisions peuvent améliorer la prise de décision et la planification, réduire les risques et maximiser les bénéfices dans divers secteurs, de l'agriculture au tourisme. Par exemple, des prévisions précises des dates de début ou de fin de mousson peuvent aider les agriculteurs à déterminer le meilleur moment pour semer, irriguer, appliquer des engrais et récolter leurs cultures.

CONCLUSIONS

Dans un climat qui évolue rapidement, les modèles mathématiques offrent un moyen d'évaluer les effets des changements climatiques. Bien que des progrès substantiels aient été réalisés dans la compréhension des moussons, les processus fondamentaux liés aux nuages, aux aérosols et à leurs interactions restent des défis scientifiques et mathématiques passionnants et cruciaux. L'effet à long terme du changement climatique sur les moussons est un domaine de recherche actif,

avec des questions telles que « Les pluies de mousson vont-elles diminuer ou augmenter ? », ou « La fréquence des orages intenses augmentera-t-elle ? ».

Au-delà du défi scientifique, la recherche de solutions offre une opportunité de collaborer à l'échelle mondiale pour collecter des données plus précises et plus pertinentes et pour développer des outils mathématiques d'analyse de ces données. La collaboration et la communication entre les scientifiques, les mathématiciens, les décideurs politiques et la société permettront de trouver des approches innovantes pour atténuer les effets de ces changements incertains, ce qui aura un impact positif sur la vie de milliards de personnes. Les modèles mathématiques peuvent servir de base pour faire avancer ces discussions et améliorer la prise de décision.

La mousson d'été indienne est la plus importante d'un système mondial de moussons qui comprend également les moussons asiatique-australienne, américaine et africaine. Plus de la moitié de la population mondiale — la plupart dans des pays en développement — vit dans des climats dominés par les moussons.

RÉFÉRENCES

- Rao, S. A., Goswami, B. N., Sahai, A. K., et al. 2019. Monsoon mission: a targeted activity to improve monsoon prediction across scales. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 100, No. 12, pp. 2509-2532.
- Christensen, J. H., et al. 2013. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. London, Cambridge University Press, pp. 1217-1308.
- Zhisheng, A., et al. 2015. Global monsoon dynamics and climate change. *Annual review of earth and planetary sciences*, Vol. 43, pp. 29-77.
- Gadgil, S. 2003. The Indian monsoon and its variability. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 31, No. 1, pp. 429-467.

AUTEUR

Amit Apte
*Indian Institute of Science Education and Research (IISER),
Inde*





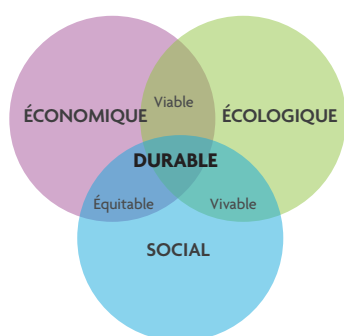
PÊCHERIES DURABLES

MODÈLES BIOÉCONOMIQUES POUR LA GESTION DES PÊCHES

Depuis près d'un siècle, les mathématiques jouent un rôle central dans la gestion de la pêche dans le monde. Les modèles mathématiques permettent aux gestionnaires de la pêche et aux décideurs d'évaluer les stocks de poissons et de concevoir des plans de gestion qui optimisent les pêcheries pour obtenir des gains maximums tout en préservant la ressource. Les modèles traditionnels, encore largement utilisés aujourd'hui, sont simples, statiques et souvent axés sur une seule espèce. Les nouvelles approches de modélisation intégrée reconnaissent que les pêcheries sont des systèmes socio-écologiques complexes avec de multiples parties prenantes. Ces modèles dynamiques incluent les facteurs économiques, sociaux et écologiques des pêcheries et permettent des décisions éclairées dans la gestion durable des pêches.

Plus du tiers des stocks de poissons dans le monde font l'objet d'une surpêche. La surpêche réduit les stocks à un rythme tel que les espèces ne peuvent se maintenir, mettant en danger la survie des espèces et dépeuplant les plus de 800 millions de personnes qui dépendent du poisson et des fruits de mer pour leur alimentation et leurs revenus. Alors que de nombreux pays, principalement développés, améliorent la gestion de leur pêche, des progrès sont nécessaires pour rendre la pêche durable et empêcher la pêche actuellement durable de devenir non durable.

On a beaucoup écrit sur la durabilité des pêches. Si la plupart des spécialistes sont favorables à un objectif de durabilité, peu s'accordent sur une norme universelle. Les premières approches



préconisant moins de pêche n'ont pas permis d'atteindre tous les résultats souhaités des points de vue écologique, économique et social.

Les modèles mathématiques ont permis de mieux comprendre la dynamique de l'industrie de la pêche à l'échelle de l'écosystème. En couplant les dynamiques écologique

et économique, la modélisation mathématique contribue à développer des outils permettant aux gestionnaires et aux décideurs d'exploiter les ressources de manière durable.

RENDEMENT MAXIMAL DURABLE

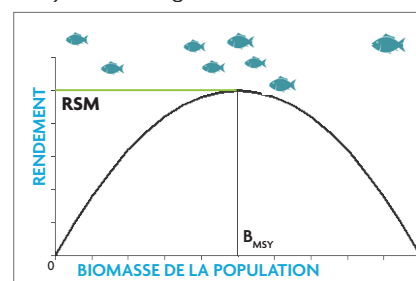
La stratégie optimale de gestion des pêches est souvent décrite comme la stratégie qui permet d'obtenir le rendement maximal soutenu (à long terme), ou RMS. Il s'agit de la plus grande récolte annuelle possible d'un stock de poissons tout en le maintenant indéfiniment. LE RMS peut être estimé en utilisant des modèles de production excédentaire, introduits pour la première fois en

MESSAGES CLÉS

- ✓ La gestion des pêches doit être basée sur des outils qui permettent aux gestionnaires et aux décideurs de récolter en fonction d'une durabilité écologique, économique et sociale. En couplant dynamique économique et écologique, la modélisation mathématique permet de développer de tels outils.
- ✓ Les scientifiques, les économistes et les décideurs se fient aux modèles mathématiques pour évaluer les stocks de poissons à partir de données limitées, et pour concevoir des plans de gestion qui optimisent les pêcheries, en permettant des gains maximums tout en préservant la ressource. Les modèles mathématiques fournissent également aux décideurs des approches quantitatives pour évaluer les conséquences des différentes actions.
- ✓ Les écosystèmes sont complexes et imprévisibles et leur modélisation nécessitera des théories mathématiques de plus en plus sophistiquées.

1954 par le biologiste M.B. Schaeffer.

L'utilisation du RMS comme objectif de la gestion de la pêche a été remise en question et critiquée par les scientifiques et les économistes. Les modèles de production excédentaire sont considérés comme trop simples pour rendre pleinement compte de la dynamique des populations qui sont soumises à des captures variables, à des interactions avec d'autres espèces et aux conditions environnementales.



La récolte au RMS est également potentiellement instable, car un léger déclin de la population peut faire bouler de neige et entraîner une boucle de rétroaction positive et une extinction rapide si les prélèvements ne sont pas réduits.

L'économiste H. Scott Gordon a généralisé le modèle de Schaeffer pour déterminer le rendement économique maximal, soit le niveau de récolte qui donne les plus grands profits économiques nets tout en réduisant le risque de surexploitation. Gordon a été l'un des premiers à illustrer comment une pêche non réglementée ou en accès libre pourrait conduire à une surpêche économique.

Le modèle de Gordon-Schaeffer est toujours largement utilisé pour décider des politiques de gestion des pêches, principalement en raison de sa simplicité et de son applicabilité

lorsqu'on a peu de données. Mais comme tous les modèles statiques, il ne s'agit que d'une image instantanée de la nature, traitant l'environnement comme invariable et ignorant le fait que les populations de poisson connaissent des fluctuations naturelles. Lorsqu'il s'agit de populations naturelles, un modèle dynamique est généralement préférable.

MODÈLES BIOÉCONOMIQUES

Dans les années 1970, le mathématicien Colin Clark a été l'un des premiers à combiner les techniques mathématiques avec les idées de la théorie du capital pour améliorer l'économie des pêches. Reconnaisant les défauts des modèles statiques existants de gestion des ressources, Clark a conçu des modèles dynamiques de comportement de pêche et de droits de récolte qui reliaient les disciplines de l'économie et de la biologie et abordaient des questions complexes telles que l'actualisation, les chemins optimaux vers l'exploitation optimale des ressources, et le caractère inaliénable de la capacité de pêche.

Clark et Lamberson ont appliqué ce modèle mathématique bioéconomique à l'industrie baleinière de l'Antarctique au milieu du siècle dernier. Les baleines de l'Antarctique ont été fortement exploitées à partir de 1925. L'augmentation rapide des flottes de baleiniers a été immédiatement suivie d'un déclin tout aussi rapide du nombre de baleines. Le rorqual bleu a été le premier à passer sous son seuil de rendement maximal durable. Les niveaux de population n'ont cessé de décliner jusqu'à ce que l'espèce soit protégée dans le monde entier en 1966. En analysant les conséquences prévues si le contrôle monopolistique de la pêche à la baleine était opéré par une seule personne, leur modèle a révélé les paramètres de capital et d'investissement qui poussaient les baleiniers à s'intéresser davantage au profit à court terme qu'à la durabilité à long terme.

THÉORIE DE LA VIABILITÉ

Les scientifiques ont trop souvent échoué à reconnaître et à atténuer les conséquences sociales et économiques néfastes des politiques de gestion des pêches. Ces conséquences peuvent être significatives et durent généralement plus longtemps que les limitations de pêche.



Port de Laayoune, Maroc. La pêche maritime représente 2 à 3 pour cent du PIB du Maroc et emploie environ 600 000 personnes. Ici, un moratoire sur la pêche serait économiquement et culturellement désastreux. © Najib Charouki

La « théorie de la viabilité » a d'abord été développée en mathématiques par Jean-Pierre Aubin, puis appliquée à la gestion durable des ressources renouvelables. Elle peut être utilisée pour aider les décideurs à définir et à sélectionner des objectifs de pêche à long terme au niveau de l'écosystème. Contrairement aux approches décrites précédemment, l'objectif n'est pas de fournir une stratégie ou solution optimale unique, mais de garantir des politiques viables qui maintiennent le système dynamique dans un ensemble contraint d'états acceptables. L'approche de la viabilité exige des gestionnaires et des planificateurs de la pêche de définir, dès le départ, les objectifs à long terme de la pêche et l'ensemble des contraintes écologiques, économiques et sociales à respecter.

Cet ensemble d'états et de décisions bioéconomiques, connu sous le nom de noyau de viabilité, peut être utilisé dans une variété de politiques différentes qui respectent les contraintes. Par conséquent, la théorie de la viabilité offre plus de possibilités de négociation et de discussion entre les parties prenantes que les techniques qui proposent une unique politique optimale.

En utilisant l'approche de la viabilité, l'économiste Vincent Martinet et son équipe ont analysé les voies de rétablissement de la crise historique de 1994 dans la pêche à la langoustine du Golfe de Gascogne. Ils ont comparé les trajectoires de récupération simulées avec la trajectoire historique estimée. Ils ont démontré qu'une réduction moins stricte de la taille de la flotte aurait permis un rétablissement plus rapide vers une pêcherie durable.

CONCLUSIONS

L'utilisation continue de modèles mathématiques dans la gestion des pêches exige une évaluation critique des différentes formes de modèles, avec tous les avantages et inconvénients de chacune. Malgré les progrès de la modélisation, les modèles disponibles intégrant la dynamique socio-écologique n'ont joué qu'un rôle limité dans la gestion et la prise de décision. Il est nécessaire de s'appuyer sur ces modèles existants, en y incorporant de nouvelles techniques et d'étendre la capacité de ces approches pour capter les moteurs écologiques, économiques et sociaux des pêcheries et améliorer leur durabilité.

RÉFÉRENCES

- Aubin, J. P. 1991. *Viability Theory*, New York, Birkhauser Boston.
- Cissé, A., et al. 2013. A bio-economic model for the ecosystem-based management of the coastal fishery in French Guiana. *Environ. Dev. Econ.*, Vol. 18, No. 03, pp. 245–269.
- Clark, C. W. 2010. *Mathematical Bioeconomics: The Mathematics of Conservation*, 3rd Edition, United Kingdom, Wiley.
- Eisenack, K., et al. 2006. Viability analysis of management frameworks for fisheries. *Environ. Model. Assess.*, Vol. 11, No. 1, pp. 69–79.
- Martinet, V., Thébaud, O., et Rapaport, A. 2010. Hare or Tortoise? Trade-offs in Recovering Sustainable Bioeconomic Systems. *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 15, pp. 503–517.
- McClanahan, T. et Castilla, J. C. (eds). 2008. *Fisheries Management: Progress Toward Sustainability*, Germany, Wiley.

AUTRICE

Nadia Raissi

Université Mohammed V à Rabat, Maroc





MESURER LA BIODIVERSITÉ

UTILISATION DES DONNÉES POUR PRÉSERVER LA NATURE DANS LE MONDE

La biodiversité mondiale est en crise. Les espèces modernes s'éteignent à un rythme des centaines de fois plus rapide qu'à n'importe quel autre moment de l'histoire de l'humanité. Le cadre mondial pour la biodiversité post-2020 guide l'action pour préserver et protéger la nature et ses services essentiels. La production d'indicateurs permettant de suivre les progrès réalisés vers les objectifs nécessitera des systèmes de surveillance pour produire des données primaires ainsi que la classification et l'analyse de ces données. Les mathématiques sont à la base de toutes ces actions, depuis les indices utilisés pour mesurer la biodiversité jusqu'aux algorithmes accélérant la classification des données. La coopération mathématique et scientifique et le transfert technologique permettront d'atteindre les objectifs de 2030 en vue de l'objectif 2050 de « vivre en harmonie avec la nature ».

Des écosystèmes sains sont le fondement de la santé humaine et du bien-être humain. Les taux d'extinction extraordinairement élevés ont dégradé la structure et la fonctionnalité des écosystèmes, rendant urgent des engagements mondiaux visant à atténuer la perte de biodiversité. De nombreux efforts ont été déployés pour mesurer objectivement la biodiversité. Pour ce faire, on utilise généralement des indices de biodiversité.

PLUS SIGNIFIE-T-IL MIEUX ?

La mesure la plus emblématique et la plus simple de la biodiversité est la richesse spécifique, soit le nombre absolu d'espèces dans un écosystème. Bien qu'il s'agisse d'une mesure clé largement utilisée par de nombreux planificateurs de la conservation, la richesse des espèces en tant qu'estimation quantitative de la biodiversité présente des lacunes. En particulier, les mesures de la richesse spécifique en disent très peu sur l'importance ou l'étendue des espèces individuelles. Toutes les espèces sont traitées sur un pied d'égalité, de l'extrêmement rare à l'incroyablement abondante. Les espèces envahissantes, par exemple, peuvent contribuer à la richesse immédiate, mais leur présence peut faire diminuer la richesse spécifique dans le futur car des espèces endémiques seront évincées. La richesse spécifique est également particulièrement sensible au degré d'échantillonnage, de sorte que le nombre d'espèces augmente avec le nombre et la taille des unités d'échantillonnage. Des mesures doivent être prises pour normaliser les échantillons et limiter les erreurs d'échantillonnage. Des outils mathématiques ont été développés pour optimiser le plan d'échantillonnage afin de maximiser l'information et de minimiser l'effort.

UNIFORMITÉ OU NON UNIFORMITÉ ?

Une autre composante importante de la diversité écologique est l'uniformité de la répartition des individus entre les différentes espèces de la communauté, ce que l'on appelle la régularité. Des études suggèrent que les communautés non uniformes sont

MESSAGES CLÉS

- ✓ La biodiversité est essentielle au maintien d'écosystèmes sains. Les indices de biodiversité permettent aux scientifiques d'estimer quantitativement la biodiversité à partir d'observations sur le terrain.
- ✓ Les indices de biodiversité permettent aux écologistes d'estimer la variabilité biologique dans l'espace et le temps, de fixer des objectifs de biodiversité et de mesurer les progrès accomplis, et de concevoir des interventions pour améliorer la biodiversité et la durabilité des écosystèmes.
- ✓ Pour calculer les indices de biodiversité, il faut disposer de données exactes et non biaisées. Traditionnellement, les données sont collectées par des techniques d'échantillonnage écologique sur le terrain. Ces dernières années, le crowdsourcing, la science citoyenne et l'intelligence artificielle sont de plus en plus utilisées à la fois pour l'échantillonnage et pour l'analyse des données.
- ✓ Les fondements mathématiques des indices de biodiversité sont très variés. Des axiomes mathématiques peuvent être utilisés pour choisir le meilleur indice en fonction du contexte d'une application ou d'une étude écologique particulière.

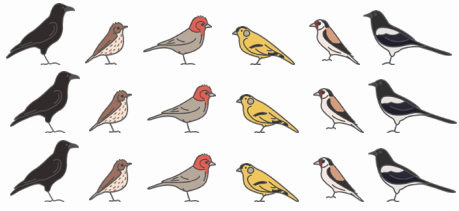
moins résistantes aux chocs et aux stress et plus sensibles aux invasions.

L'indice de régularité le plus largement utilisé dans la littérature écologique est basé sur la théorie de l'information, à savoir les premiers travaux de Claude Shannon sur l'entropie. L'indice de diversité de Shannon-Wiener quantifie l'incertitude de prédire l'espèce d'un individu pris au hasard dans un échantillon. Cette incertitude est plus grande lorsque le nombre d'individus dans chaque espèce est le même. L'indice de Shannon est généralement plus influencé par le nombre d'espèces rares dans une communauté.

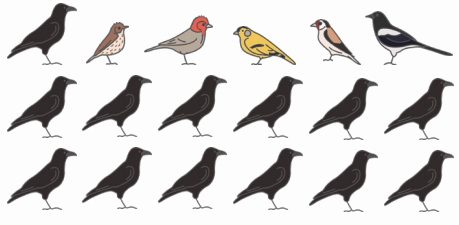
L'une des mesures de régularité les plus connues et les plus anciennes est l'indice de Simpson, utilisé pour les grandes communautés échantillonnées. Cet indice mesure à la fois le nombre d'espèces présentes et la proportion de chaque espèce. Il exprime la probabilité que deux individus tirés au hasard appartiennent à la même espèce. Une valeur élevée implique un regroupement des individus dans un petit nombre d'espèces, et une petite valeur suggère une distribution plus uniforme des individus parmi les espèces. L'indice de Simpson est particulièrement sensible aux changements dans l'abondance relative des espèces les plus importantes.

VISUALISATION DE LA DIVERSITÉ ÉCOLOGIQUE

COMMUNAUTÉ A



COMMUNAUTÉ B



Dans cet exemple, les écologistes comparent les oiseaux passereaux dans deux communautés européennes tempérées de feuillus. Les communautés A et B comptent 18 individus d'espèces différentes. Dans les deux communautés, la richesse est égale à 6. L'uniformité est la répartition régulière des espèces. Dans la communauté A, toutes les espèces sont présentes en égale abondance. La communauté B est très inégale car elle est dominée par les corbeaux.

Un problème avec les mesures traditionnelles de diversité, notamment les indices de régularité, est que toutes les espèces ne sont pas égales, que ce soit sur le plan fonctionnel, évolutif, ou écologique. Comme les traits fonctionnels et écologiques des espèces résultent de l'évolution, certains écologistes ont suggéré d'incorporer des mesures de diversité phylogénétique ou taxonomique. Des mesures de diversité évolutive peuvent aider les décideurs à donner une « valeur de conservation » aux différentes zones et à donner la priorité à la conservation des régions plus diversifiées sur les plans fonctionnel et génétique, et donc plus aptes à s'adapter aux changements futurs.

CHOISIR LE MEILLEUR INDICE

Un grand nombre d'indices variés sont activement utilisés pour mesurer la diversité écologique. Comme les fondements mathématiques de ces différents indices varient considérablement, il est difficile de choisir le meilleur indice dans le contexte d'une application ou d'une étude écologique particulière. Certains chercheurs se sont tournés vers des axiomes mathématiques — des principes non prouvables acceptés comme vrais et naturels — pour servir de prémisse ou de point de départ. Les axiomes sont utilisés pour identifier les propriétés les plus importantes des indices de diversité et pour sélectionner les indices en fonction des axiomes qu'ils satisfont ou ne satisfont pas. Les approches axiomatiques ont été largement utilisées dans d'autres domaines. Les célèbres axiomes d'Arrow, par exemple, illustrent les défis de la conception d'un système de vote équitable.

L'IA RENCONTRE LA SCIENCE CITOYENNE

Toute mesure de la biodiversité nécessite des données, mais leur acquisition par le biais d'un échantillonnage de terrain conventionnel ou par télédétection prend beaucoup de temps et coûte cher. Le crowdsourcing et la science citoyenne s'avèrent de plus en plus utiles pour collecter et classer les

données biométriques. Le projet Snapshot Serengeti a fait appel à des volontaires pour aider à classer les images recueillies par des centaines de caméras piège activées par le mouvement dans le parc national de Serengeti, en Tanzanie. Plus de 30 000 volontaires ont aidé à classer plus d'un demi-million d'images à ce jour.

L'introduction de l'IA peut traiter de nombreux risques associés à la collecte de données scientifiques citoyennes, depuis les biais d'observation jusqu'aux erreurs de classification. L'IA et les techniques d'apprentissage automatique sont maintenant utilisées pour identifier et valider les images classées. L'apprentissage profond a permis d'économiser environ 17 000 heures d'efforts humains dans le cadre du projet Snapshot Serengeti.

Lorsque des images d'animaux sont collectées à l'aide de caméras piège, les individus de la même espèce sont le plus souvent captés dans le même habitat. Cela peut conduire les systèmes de vision par ordinateur à classer le fond au lieu de l'animal, ce qui entraîne un biais. Des approches comme la co-segmentation contournent ce problème en isolant automatiquement l'objet d'intérêt sans aucune intervention humaine. Les systèmes les plus avancés d'identification d'objets utilisent des boîtes englobantes, puis rééchantillonnent les caractéristiques pour les boîtes, et enfin utilisent l'apprentissage automatique pour classer les objets. Des outils mathématiques sont en cours de développement pour entraîner des réseaux neuronaux à identifier des individus à partir de données biométriques, telles que les motifs des plumes, du pelage ou de la peau; de caractéristiques faciales telles que les moustaches; d'empreintes de pas; et de vocalisations.

CONCLUSIONS

Les mesures de biodiversité sont essentielles pour surveiller la santé des écosystèmes. De nouveaux outils sont nécessaires pour guider, surveiller et mesurer les progrès accomplis pour stopper la perte de la biodiversité d'ici 2030 et parvenir à la restauration et au rétablissement d'ici 2050. Les approches mathématiques peuvent contribuer à stimuler le développement et la sélection d'indices et d'indicateurs, et à améliorer les techniques de collecte de données et de validation.

RÉFÉRENCES

- Cadotte, M. W. et Davies, J. T. 2010. Rarest of the rare: advances in combining evolutionary distinctiveness and scarcity to inform conservation at biogeographical scales. *Diversity and Distributions*, Vol. 16, pp. 376-385.
- Norouzzadeh, M.S., et al. 2018. Automatically identifying, counting, and describing wild animals in camera-trap images with deep learning. *PNAS*, Vol. 115, No. 25, pp. E5716-25.
- Pimm, S. L., Jenkins, C.N., et al. 2014. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, Vol. 344, No. 6187, 1246752.
- Roberts, F. S. 2019. Measurement of biodiversity: Richness and evenness. H. G. Kaper et F. S. Roberts (eds), *Mathematics of Planet Earth: Protecting Our Planet, Learning from the Past, Safeguarding for the Future*, Springer, pp. 203-224.

AUTEUR

Fred Roberts
Université Rutgers, États-Unis





ÉCOUTER LA FAUNE

CLASSIFICATION DES SONS D'ANIMAUX PAR APPRENTISSAGE PROFOND

Les récents rapports sur le déclin de la biodiversité dans le monde soulignent l'importance de la surveillance des populations et de la protection des espèces et de leurs habitats. Les méthodes traditionnelles d'échantillonnage sont coûteuses et souvent invasives. Pour les animaux communiquant par la voix, la surveillance acoustique passive offre un moyen plus rentable, évolutif et non invasif de collecte de données. Cependant, le traitement d'ensembles de données audio souvent massifs reste laborieux et nécessite un stockage de données important. Comme l'a démontré une équipe interdisciplinaire et transcontinentale de chercheurs, les techniques d'intelligence artificielle, en particulier l'apprentissage profond, peuvent constituer un moyen rapide et efficace d'analyser les données sonores provenant de la faune et, en définitive, soutiennent plus efficacement les efforts de conservation.

Le gibbon de Hainan (*Nomascus hainanus*) est le primate le plus rare du monde et compte parmi les mammifères les plus rares. La dernière population survivante, d'à peine 30 individus, vit dans un petit vestige de forêt dans la réserve naturelle nationale de Bawangling, sur l'île chinoise de Hainan.

Traditionnellement, le suivi de cet animal rare repose sur des études de terrain intensives et par intermittence, où les équipes enregistrent les gibbons turbulents depuis des stations d'écoute surélevées. Des outils efficaces et peu coûteux sont donc urgemment nécessaires pour surveiller de manière continue et non invasive cette population ainsi que d'autres populations très vulnérables et, éventuellement, aider à en détecter de nouvelles non encore découvertes.

Une large équipe de chercheurs internationaux a entrepris de développer une nouvelle méthode de surveillance acoustique passive (SAP) pour détecter et isoler automatiquement les cris des gibbons de Hainan. En 2016, ils ont déployé des enregistreurs sonores autonomes à Bawangling pour écouter passivement les animaux pendant près de six mois. L'équipe a capturé plus de 6 000 heures d'enregistrements audio totalisant des centaines de gigaoctets de données. De tels volumes massifs de données — typiques des études SAP — sont coûteux à stocker et longs à traiter et à classer manuellement. Automatiser la collecte et l'analyse de ces données permet un suivi moins coûteux et à plus long terme. Cela permet une compréhension presque en temps réel de la dynamique de la population, ainsi que des réponses plus rapides en terme de conservation.

VISUALISATION DU SON

Les capteurs acoustiques détectent et convertissent les ondes sonores entrantes en un signal électrique, stocké numériquement comme une suite de nombres binaires. Comme il est difficile pour l'oreille humaine — ou les ordinateurs d'ailleurs — de distinguer les sons dans ce format, le signal doit être traité afin de récupérer les informations fréquentielles et les

MESSAGES CLÉS

- ✓ Pour les animaux qui vocalisent, leurs sons distinctifs peuvent fournir des informations utiles sur leur distribution, leur abondance et leur comportement. Les enregistreurs acoustiques passifs permettent aux chercheurs de surveiller efficacement et de manière non invasive les populations des différentes espèces et la façon dont elles se déplacent ou évoluent au fil du temps.
- ✓ La surveillance acoustique passive en continu produit d'énormes quantités de données qui prennent du temps à traiter et nécessitent un stockage coûteux. Les progrès de l'intelligence artificielle permettent aux chercheurs de créer des modèles mathématiques complexes, entraînés à reconnaître les cris d'une espèce particulière en une fraction du temps des méthodes conventionnelles.
- ✓ L'automatisation du traitement et de la classification des données acoustiques, permet non seulement un suivi moins coûteux et sur plus longtemps, mais permet aussi aux chercheurs de passer plus rapidement de la collecte des données à l'analyse, générant ainsi des informations en temps quasi-réel sur la dynamique des populations, ce qui permet la prise de décision en matière de gestion et de conservation.

restituer visuellement. Ce traitement est généralement effectué à l'aide d'une technique mathématique connue sous le nom de transformée de Fourier rapide, qui génère un spectrogramme — une représentation temps-fréquence qui permet d'identifier visuellement le son.

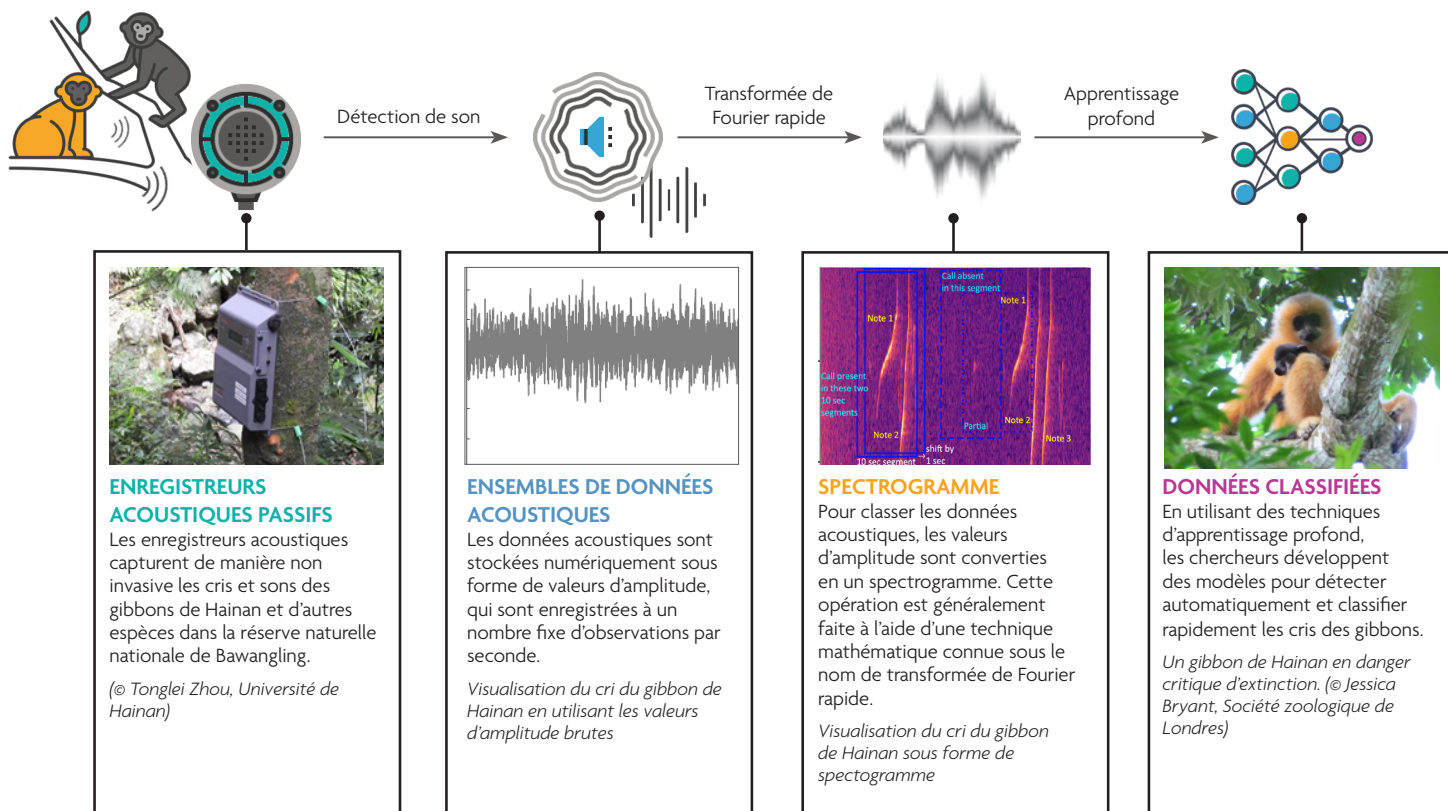
Les cris d'espèces spécifiques sont généralement détectés et classés manuellement, ce qui est subjectif et, en raison de la taille des ensembles de données, long et fastidieux. Les technologies d'intelligence artificielle peuvent rendre les analyses automatisées ou semi-automatisées, ce qui réduit considérablement le temps et les efforts nécessaires pour détecter et classifier ces cris.

ÉCOUTE AUTOMATIQUE

Parmi les nombreuses techniques d'intelligence artificielle, l'apprentissage profond s'est avéré particulièrement utile pour la détection et la classification. Les modèles d'apprentissage profond peuvent être entraînés à repérer des motifs et des concepts abstraits dans les données, d'une manière similaire au système perceptif humain.

Les chercheurs peuvent développer et entraîner des modèles pour reconnaître automatiquement et classer rapidement le cri d'un animal spécifique. Par exemple, le modèle de classification du gibbon de Hainan a non seulement généré des prédictions très précises, mais a aussi traité plus de 6 000 heures d'enregistrements audio en deux jours seulement, soit une fraction du temps qu'aurait requis un traitement manuel.

UN CLASSIFICATEUR AUTOMATISÉ POUR IDENTIFIER LES CRIS DES GIBBONS DE HAINAN



LA PROBLÉMATIQUE DES ESPÈCES RARES

Si l'intelligence artificielle et la surveillance acoustique pourraient transformer le domaine de la gestion et de la conservation de la faune, certains défis subsistent, parmi lesquels la sensibilité au bruit de fond et la fiabilité de l'entraînement sur des ensembles de données. Lorsque disponibles, les bibliothèques d'appels de la faune sont souvent trop petites pour entraîner efficacement des modèles d'intelligence artificielle, ce qui limite leur utilisation pour les espèces rares ou celles pour lesquelles il existe un nombre limité d'échantillons de cris. De nouvelles méthodes algorithmiques, telles que l'approche d'apprentissage en quelques coups qui permet la détection avec des ensembles de données très limités, pourraient s'avérer cruciales pour le développement de modèles de détection d'espèces extrêmement rares, comme le paon faisandé de Hainan, espèce menacée, pour laquelle il n'existe que trois enregistrements accessibles au public.

CONCLUSIONS

Les progrès de l'intelligence artificielle permettent aux chercheurs de créer des modèles mathématiques complexes entraînés à reconnaître les cris d'une espèce particulière en une fraction du temps requis par les approches conventionnelles. Bien que les progrès soient prometteurs, des recherches supplémentaires permettront le développement de modèles plus fiables. Des équipes interdisciplinaires composées d'écologistes, de mathématiciens et de scientifiques des données ont joué un rôle essentiel dans les avancées réalisées à ce jour et, sur le long terme, aideront les décideurs à mieux gérer et conserver les espèces menacées et leurs habitats.

RÉFÉRENCES

Dufourq, E., Durbach, I., Hansford, J. P., Hoepfner, A., Ma, H., Bryant, J. V., Stender, C. S., Li, W., Liu, Z., Chen, Q., Zhou, Z. et Turvey, S. T. 2021, Automated detection of Hainan gibbon calls for passive acoustic monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, Vol. 7, pp. 475-487.

Ruff, Z. J., Lesmeister, D. B., Appel, C. L. et Sullivan, C. M. 2021. Workflow and convolutional neural network for automated identification of animal sounds. *Ecological Indicators*, Vol. 124, No. 107419.

Bjorck, J., Rappazzo, B. H., Chen, D., Bernstein, R., Wrege, P. H. et Gomes, C. P. 2019. Automatic Detection and Compression for Passive Acoustic Monitoring of the African Forest Elephant. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 33, No. 01, pp. 476-484.

Shiu, Y., Palmer, K.J., Roch, M.A., et al. 2020. Deep neural networks for automated detection of marine mammal species. *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 607.

AUTEURS

Emmanuel Dufourq

Université de Stellenbosch et African Institute for Mathematical Sciences

Ian Durbach

Université de Cape Town, Afrique du Sud & Université de St. Andrews, Écosse



COMBATTRE LES ENVAHISSEURS

APPROCHES MATHÉMATIQUES DE LA GESTION DES ESPÈCES ENVAHISSANTES

Les espèces envahissantes constituent une menace majeure pour les systèmes naturels et humains. Avec l'expansion du commerce mondial et le changement climatique, elles se propagent dans le monde entier, coûtant à l'économie mondiale plus de 1400 milliards de dollars par an, et provoquant l'extinction de centaines d'espèces. À l'aide de modèles mathématiques, les scientifiques parviennent à mieux comprendre la dynamique des espèces envahissantes et à prévoir leur expansion et leurs potentielles réactions aux changements climatiques. Les approches mathématiques offrent aux décideurs et aux gestionnaires des outils pour identifier et hiérarchiser des stratégies visant à réduire ou stopper la propagation des espèces invasives, ainsi que la capacité de quantifier les coûts et d'allouer des ressources pour contrôler et éradiquer les populations nuisibles.

Les espèces envahissantes s'établissent et se propagent rapidement en dehors de leurs frontières naturelles, souvent introduites, intentionnellement ou par inadvertance, par l'homme dans de nouvelles régions. Elles peuvent avoir de graves répercussions sur les écosystèmes en s'attaquant aux espèces indigènes et/ou les supplantant, et en introduisant de nouveaux agents pathogènes. L'augmentation du commerce mondial, le changement climatique et la perte d'habitats ont accéléré leur mouvement. Et aujourd'hui, les prédateurs et les ravageurs invasifs et les plantes envahissantes ont contribué à l'extinction de centaines d'espèces et causé d'énormes dommages naturels et économiques aux systèmes agricoles, forestiers, d'eau douce et marins.

Le contrôle ou l'éradication des espèces invasives sont souvent coûteux et nécessitent de nombreuses ressources. Pour hiérarchiser les actions de gestion, les scientifiques modélisent mathématiquement les effets des espèces envahissantes dans des systèmes non indigènes. Le travail commence habituellement par la compréhension ou la prévision des impacts compétitifs ou prédateurs sur les espèces indigènes.

MODÉLISER LES IMPACTS DES INVASIONS

L'un des premiers modèles d'écologie mathématique est l'équation de Lotka-Volterra, un modèle prédateurs-proies proposé en 1925 par Alfred Lotka, biophysicien américain, et Vito Volterra, mathématicien italien. Basé sur des équations différentielles, ce modèle simple, avec une espèce de prédateurs et une espèce de proies constitue la base de nombreux modèles utilisés aujourd'hui. De tels modèles simulent les interactions dynamiques entre deux espèces. Par exemple, les chats sauvages sont des prédateurs non indigènes connus pour avoir un impact significatif sur la biodiversité, en particulier sur des îles. Récemment, ils ont été introduits sur des îles isolées de la Méditerranée autrefois exemptes de prédateurs. Le puffin yelkouan, oiseau marin de taille moyenne, niche sur ces îles

MESSAGES CLÉS

- ✓ Si elles ne sont pas contrôlées, les espèces envahissantes peuvent dévaster les écosystèmes, en modifiant les habitats et en privant les espèces indigènes de nourriture et d'autres ressources. La modélisation mathématique fournit aux gestionnaires et aux décideurs de puissants outils permettant de hiérarchiser les stratégies et d'allouer efficacement les ressources pour limiter leur propagation.
- ✓ Les modèles mathématiques peuvent aider les scientifiques à prédire l'impact des espèces invasives sur les espèces indigènes menacées et en voie de disparition, et à quantifier les efforts nécessaires pour contrôler et éradiquer les populations invasives nuisibles.
- ✓ Un réchauffement de l'atmosphère est susceptible de permettre à davantage d'espèces de se déplacer plus loin. Quant aux plantes envahissantes, certaines espèces bénéficieront d'une saison de croissance plus longue. Les simulations mathématiques et statistiques peuvent aider à prévoir les risques futurs en prévoyant quels écosystèmes pourraient être envahis et les impacts potentiels des invasions.

pendant sa saison de reproduction en novembre. Bien qu'agiles en mer, ces oiseaux sont maladroits et vulnérables lorsqu'ils nichent au sol, devenant une cible facile pour les chats sauvages et autres prédateurs introduits. Sur l'île française du Levant, les chats sauvages furent à l'origine de la mort d'environ 800 à 3 000 de ces oiseaux par an. En raison de la prédation, les populations de puffins yelkouans sont en constante diminution, et l'espèce est désormais classée en danger d'extinction par l'Union internationale pour la conservation de la nature.

Un modèle décrit l'évolution dans le temps de l'abondance respective de deux espèces, l'une de prédateurs et l'autre de proies, en fonction de paramètres clés de leurs dynamiques propres et de leurs interactions :

- **Le taux de croissance des proies.** La population croît de façon exponentielle lorsque la population est petite, et plus le taux de croissance est élevé, plus la croissance est rapide.
- **La capacité de charge des proies,** soit la taille maximale de la population qu'une région peut supporter. La croissance de la population ralentit lorsque la population s'approche de la capacité de charge.
- **Le terme d'interaction prédateur-proie.** Les interactions entre le prédateur et la proie font augmenter la population de prédateurs et diminuer la population de proies.

MODÈLES DE DISTRIBUTION DES ESPÈCES : LE CRAPAUD BUFFLE EN AUSTRALIE



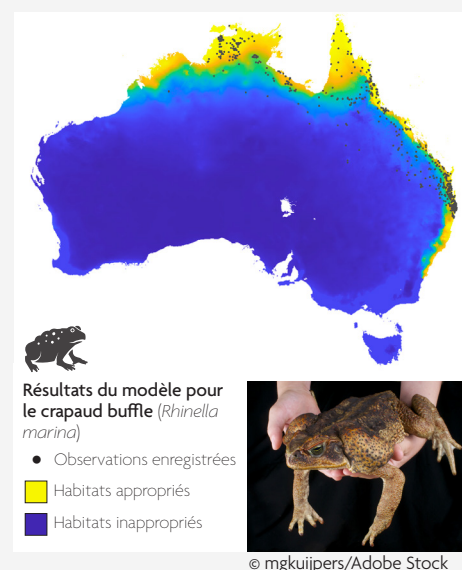
Les modèles de distribution des espèces (MDE) sont parmi les plus utilisés en écologie de la conservation. Ils font appel à des données environnementales telles que la couverture du sol, les précipitations, la température, l'altitude, et des indices de végétation comme prédicteurs d'habitats appropriés. Sans habitats hospitaliers, les espèces envahissantes ne peuvent s'établir de manière durable dans de nouvelles régions. Les données environnementales doivent être mesurées dans les habitats existants de l'espèce et sont ensuite utilisées pour estimer si nouvelles régions inoccupées sont sujettes à invasion. Les MDE peuvent être un outil utile pour prévoir les zones d'invasion par des espèces non indigènes, aider à guider les efforts de surveillance et de gestion, et cibler efficacement les ressources.

Les crapauds buffles sont indigènes aux Amériques, du Pérou au Texas, et ils ont aussi été introduits dans de nombreux endroits de par le monde. En Australie, ils ont été introduits intentionnellement en 1935, dans le cadre d'un effort malavisé et totalement infructueux de contrôle

des coléoptères de la canne à sucre qui détruisaient les plantations. Avec un très fort taux de reproduction et aucun prédateur naturel, en partie à cause de la toxicité de leurs sécrétions cutanées, les populations de crapauds buffles ont explosé en Australie, et occupent maintenant plus de 1,2 millions de kilomètres carrés.

Les scientifiques peuvent utiliser des modèles statistiques sur la répartition actuelle des crapauds buffles et sur leur répartition d'origine en Amérique du Sud, pour mieux comprendre les types d'environnements qu'ils peuvent coloniser. Les résultats révèlent que l'espèce continuera d'envahir le sud et l'ouest de l'Australie dans les années à venir.

Comme pour tout modèle, l'utilité des MDE dépend en grande partie du type et de la qualité des données. Les MDE ne tiennent généralement pas compte des interactions biotiques ou des limites de la dispersion, deux variables connues pour limiter l'abondance des espèces. Ainsi, si une espèce ne peut pas occuper un habitat approprié parce qu'elle ne peut pas l'atteindre ou qu'une autre espèce le



bloque, les MDE ne permettraient pas de prévoir que l'habitat est approprié. De même, le changement climatique a poussé des espèces à occuper des habitats sous-optimaux parce que leurs habitats ont changé, et qu'elles n'ont pas pu se déplacer assez rapidement vers de nouvelles régions.

- **Le terme de contrôle de la population de prédateurs.** Grâce à différentes interventions externes, les populations de prédateurs peuvent être contrôlées — ou même éradiquées — pour permettre à la population de proies de se rétablir.

Chaque paramètre peut varier dans le temps. Certains peuvent également varier avec le changement climatique, car des régions inappropriées à l'invasion deviennent plus hospitalières en raison des changements de température, de précipitations et d'autres paramètres environnementaux. Grâce à des modèles mathématiques, les scientifiques peuvent prévoir comment ces changements affecteront la gestion des espèces invasives au cours du temps.

Les modèles prédateurs-proies sont à la base de nombreux outils mathématiques qui soutiennent les décisions de gestion et de politique. En pratique, il est souvent difficile d'estimer les paramètres avec précision. Pour modéliser de manière réaliste une stratégie de gestion, le coût d'élimination de chaque individu de l'espèce invasive doit être estimé et inclus. La gestion des espèces invasives peut être améliorée en adoptant une approche de gestion adaptative, dans laquelle les modèles sont utilisés pour guider les premières actions de contrôle et d'éradication. Les résultats de ces premières interventions sont ensuite utilisés pour comprendre la dynamique du système et ajuster et améliorer les futures interventions.

CONCLUSIONS

La collecte des données est importante pour construire et valider un modèle mathématique. Dans le cas particulier des espèces invasives, la collecte des données doit être coordonnée

avec les stratégies de gestion des espèces. En consultant d'abord des mathématiciens, les scientifiques peuvent s'assurer que toutes les données recueillies puissent s'intégrer dans l'analyse de suivi, de manière à optimiser le processus de collecte des données.

RÉFÉRENCES

- Baker, C.M., Gordon, A. et Bode, M. 2017. Ensemble ecosystem modeling for predicting ecosystem response to predator reintroduction. *Conservation Biology*, Vol. 31, pp. 376-384.
- Bonnaud, E., Berger, G., Bourgeois, K., Legrand, J. et Vidal, E. 2012. Predation by cats could lead to the extinction of the Mediterranean endemic Yelkouan Shearwater *Puffinus yelkouan* at a major breeding site. *Ibis*, Vol. 154, pp. 566-577.
- Briscoe Runquist, R.D., Lake, T., Tiffin, P., et al. 2019. Species distribution models throughout the invasion history of Palmer amaranth predict regions at risk of future invasion and reveal challenges with modeling rapidly shifting geographic ranges. *Sci Rep*. Vol. 9, No. 2426.
- Medina, F. M., Bonnaud, E., Vidal, E., Tershy, B. R., Zavaleta, E. S., Donlan, C. J., Keitt, B. S., Le Corre, M., Horwath, S. V. et Nogales, M. 2011. A global review of the impacts of invasive cats on island endangered vertebrates. *Glob Change Biol*, Vol. 17, pp. 3503-3510.

AUTEURS

Christopher M. Baker
Université de Melbourne, Australie

Michael Bode
Queensland University of Technology, Australie

PRÉSERVER LA VIE PRIVÉE

PALLIER LE MANQUE DE DONNÉES PAR L'APPRENTISSAGE FÉDÉRÉ

Il est difficile de construire des modèles d'apprentissage automatique précis dans des domaines où la gouvernance des données et la vie privée empêchent leur partage. Les récentes avancées en matière d'apprentissage fédéré permettent de construire des modèles complexes d'apprentissage machine entraînés de manière distribuée, de sorte que les données privées ne quittent jamais une partie ou institution donnée. Un modèle de meilleure qualité peut être entraîné en exploitant un ensemble de données plus vaste et plus diversifié que ce qui pourrait être fait avec les données d'une seule partie. Et parce que toutes les parties impliquées gardent leurs données sensibles au niveau local et privé, l'approche est particulièrement appropriée pour les organisations où les règles de protection des données imposent des barrières au partage des données, comme les systèmes de santé, le système bancaire et la sécurité.

L'apprentissage automatique utilisant des réseaux neuronaux profonds a été appliqué avec succès à un large éventail de problèmes, permettant des solutions inimaginables il y a peu de temps. Rien qu'au cours des cinq dernières années, les réseaux neuronaux profonds ont permis de reconnaître automatiquement des objets d'intérêt dans des images, de répondre à des questions écrites, et d'automatiser la traduction et le résumé simultanés de documents audio. Ces progrès remarquables ont été accomplis grâce à la combinaison d'une puissance de calcul accrue, au développement de meilleurs algorithmes et à la grande quantité de données disponibles pour entraîner ces modèles.

Cependant, de telles quantités de données ne sont pas toujours disponibles pour entraîner des réseaux neuronaux profonds et de nouvelles applications ont été entravées précisément par le manque d'ensembles de données d'entraînement suffisamment grands et diversifiés. Dans certains cas, une quantité considérable de données existe, mais elle ne peut être collectée de manière centralisée pour des raisons juridiques ou réglementaires. Le domaine de l'apprentissage fédéré a vu le jour pour résoudre cette difficulté et élargir le champ d'applications de l'apprentissage profond.

L'apprentissage automatique conventionnel utilise des données d'entraînement collectées, souvent à partir de nombreuses sources différentes et agrégées sur une seule machine. Cependant, cette approche centralisée peut porter atteinte à la vie privée si les données contiennent des informations d'identification personnelle. Dans l'apprentissage fédéré, les modèles d'apprentissage automatique sont entraînés par plusieurs parties fonctionnant ensemble de façon distribuée, chaque partie pouvant conserver ses données privées sur son système local. Les paramètres du modèle – et non les données d'entraînement – sont envoyés périodiquement à un serveur central et agrégés à un nouvel algorithme composite, dont

MESSAGES CLÉS

- ☑ L'apprentissage fédéré entraîne des modèles d'apprentissage automatique sur des ensembles de données disjoints, répartis entre différentes parties. Au lieu d'agréger leurs données, les institutions participantes s'entraînent sur le même modèle, en utilisant leurs propres données privées, stockées localement. Les paramètres du modèle sont mis en commun dans un serveur central, qui agrège les contributions dans un nouveau modèle composite.
- ☑ En permettant à plusieurs parties de s'entraîner en collaboration sans avoir à échanger ou à centraliser des ensembles de données privées, l'apprentissage fédéré permet d'atteindre la pleine puissance en apprentissage des données et facilite les collaborations multi-institutionnelles à grande échelle, tout en contournant les obstacles techniques, de concurrence, et de propriété des données.
- ☑ En médecine et dans le secteur bancaire, l'apprentissage fédéré permet de répondre aux exigences des réglementations sur la protection des données telles que le Règlement général européen sur la protection des données (RGPD) et le Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA) des États-Unis.

les paramètres sont rediffusés aux parties afin de finaliser l'entraînement local.

De cette façon, le modèle de chaque participant peut être amélioré par les données des autres, sans qu'il soit nécessaire de transférer les données elles-mêmes. Le résultat est que chaque partie impliquée dans la fédération peut développer un modèle d'apprentissage automatique pour son application en exploitant ses propres données et les données confidentielles des autres parties, et obtenir ainsi un modèle meilleur et plus précis que ce qu'elle aurait obtenu toute seule. Cette approche fédérée permet d'apporter la puissance du plus grand nombre au plus petit nombre sans compromettre l'intégrité des données qui appartiennent à chaque partie.

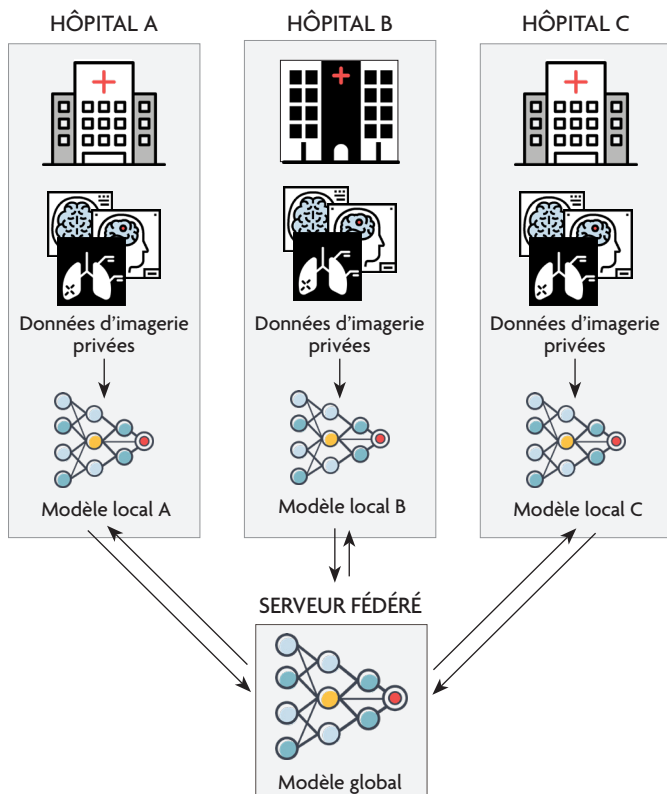
AMÉLIORER LES OUTILS DE DÉTECTION DES MALADIES

Les modèles d'apprentissage automatique ont démontré un énorme potentiel dans la détection des maladies, mais ils nécessitent des ensembles de données importants et diversifiés pour entraîner les algorithmes, ce qui est souvent difficile à réaliser en pratique. Par exemple, si un hôpital dispose d'un appareil d'imagerie médicale utilisé pour évaluer des pathologies, le nombre de ses scans n'est probablement pas assez important ou diversifié pour entraîner et valider efficacement un réseau neuronal de grande capacité. Il serait possible de pallier ce problème en entraînant le réseau avec les données

de plusieurs institutions, mais les réglementations sur la vie privée rendent très difficile de mettre en commun les scans des patients de plusieurs hôpitaux. Cependant, avec des garanties appropriées, les hôpitaux peuvent participer à des méthodes d'apprentissage fédéré.

Chaque hôpital participant formera son modèle local et n'enverra que les paramètres du modèle à un serveur central sans exposer les informations privées des patients, ni transférer de scans. Le modèle d'apprentissage fédéré intégrera les différents paramètres locaux en de nouveaux paramètres globaux. En pratique, le résultat sera similaire à celui obtenu si le modèle avait été entraîné sur un ensemble de données plusieurs fois plus grand que celui dont dispose chaque hôpital. Chaque hôpital gagnera en précision et réduira les biais institutionnels. De plus, cela lui permettra de généraliser et de transférer à de nouveaux types de maladies, n'ayant peut-être même pas encore été observés dans le groupe de patients de l'hôpital. En personnalisant les modèles formés par l'apprentissage fédéré, chaque hôpital gagne le meilleur des deux mondes : un modèle de diagnostic des maladies validé sur sa propre population de patients, et en même temps capable de reconnaître des maladies observées uniquement dans d'autres hôpitaux.

APPRENTISSAGE FÉDÉRÉ POUR L'IMAGERIE MÉDICALE



IDENTIFIER ET DISSUADER LA FRAUDE FINANCIÈRE

La fraude financière coûte au secteur bancaire des milliards de dollars par an. Et bien qu'il y ait un appétit significatif pour l'automatisation des systèmes permettant de reconnaître

les signes de fraude financière, plusieurs défis entravent le développement de systèmes de détection de fraude précis et efficaces. Les ensembles de données financières sont très déséquilibrés, et il y a beaucoup moins d'échantillons de transactions frauduleuses que de transactions légitimes. La confidentialité des données et d'autres réglementations imposent également des obstacles au partage des ensembles de données sur les transactions financières entre les banques, les institutions et aux partages transfrontaliers. Par conséquent, il est difficile d'entraîner avec précision des modèles permettant de reconnaître des schémas de fraude et de détecter des activités illicites.

Alors qu'une seule banque peut ne pas avoir suffisamment de cas confirmés de fraude pour entraîner ses modèles de manière efficace, de nombreuses banques s'unissant le feraient probablement. En utilisant des méthodes d'apprentissage fédéré, chaque institution financière peut bénéficier d'un modèle partagé collectivement, lequel modèle a analysé plus de fraudes que ce qu'elle aurait fait seule, et ce, sans partager les données privées de ses clients.

CONCLUSIONS

Les réseaux de neurones profonds ont transformé la capacité d'utiliser et de tirer parti de grands ensembles de données dans de nombreuses applications. Pourtant, ils ont été lents à démontrer la même valeur dans des domaines où la confidentialité ou la compétitivité empêchent le partage des données. L'apprentissage fédéré a vu le jour pour permettre des solutions distribuées d'apprentissage automatique même avec peu de données tout en respectant les règlements sur la vie privée dans les secteurs de la santé, des banques et de la sécurité. Les gouvernements peuvent contribuer à ces progrès en facilitant la création de processus et de normes d'apprentissage fédéré dans les secteurs clés et en soutenant la recherche pour élargir le spectre des problèmes qui peuvent être résolus par l'apprentissage fédéré.

RÉFÉRENCES

- Yu, P., Kundu, A., Wynter, L. et Lim, S. H. 2021. *Fed+: A Unified Approach to Robust Personalized Federated Learning*, <https://arxiv.org/abs/2009.06303>.
- Ludwig H., Baracaldo, N., Thomas, G., Zhou, Y., et al. 2020. *IBM Federated Learning: an Enterprise Framework White Paper V0.1*, <https://arxiv.org/abs/2007.10987>.
- Aggarwal, R., Sounderajah, V., Martin, G. et al. 2021. Diagnostic accuracy of deep learning in medical imaging: a systematic review and meta-analysis. *npj Digit. Med.*, Vol. 4, No. 65.
- Zheng, W. et al. 2020. Federated Meta-Learning for Fraudulent Credit Card Detection, *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-20)*.

AUTRICE

Laura Wynter
IBM Research, Singapour



RETROUVER LES DISPARUS

LES RÉSEAUX COMPLEXES PERMETTENT DE RECHERCHER LES PERSONNES DISPARUES

Dans le monde entier, des centaines de milliers de personnes sont portées disparues dans le cadre de violations des droits de l'homme, de conflits armés, d'autres situations de violence, de migrations et de catastrophes de masse. Ces disparitions causent des souffrances incalculables aux familles et aux communautés et constituent un obstacle à la paix. Les décideurs politiques ont besoin de meilleures données et de meilleurs outils pour traiter objectivement les disparitions et répondre aux demandes humanitaires. L'analyse de réseaux complexes peut être un instrument puissant pour rechercher et collecter des informations pertinentes sur les disparus dans de multiples contextes. En outre, de telles approches permettent d'obtenir des informations que les techniques usuelles n'auraient pas pu mettre à jour.

Le droit international humanitaire contient des dispositions visant à garantir que « les personnes décédées sont traitées de façon appropriée, et le sort des personnes disparues et les lieux d'inhumation sont établis ». Le manque de données fiables sur le nombre de personnes disparues ainsi que les systèmes décentralisés pour traiter ce type de problème posent un défi à la conception et à la mise en œuvre de politiques de résolution des disparitions. Dans certains cas, les mathématiques des réseaux complexes combinées aux techniques statistiques peuvent aider le processus de recherche en permettant d'exploiter des indices pour identifier des groupes de personnes qui peuvent partager le même sort.

LES LIENS INVISIBLES DANS LES RÉSEAUX

Un réseau complexe est un ensemble de nœuds connectés qui interagissent de différentes manières. Les systèmes modélisés sous forme de réseau sont courants et très diversifiés dans le monde, depuis les réseaux alimentaires jusqu'aux routes de distribution postale, en passant par les réseaux à haute tension, ou encore les réseaux sociaux sur la base de relations amicales, relations entre individus ou organisations, et relations commerciales. Des études suggèrent que les propriétés des réseaux complexes — notamment la structure communautaire et l'organisation hiérarchique — peuvent contribuer à expliquer le comportement des systèmes sous-jacents. Par exemple, les groupes de nœuds fortement interconnectés correspondent souvent à des unités fonctionnelles connues du système.

Dans certains réseaux, il manque de l'information, à la fois sur les nœuds et les liens. Ces dernières années, les scientifiques ont développé des techniques mathématiques pour prédire les connexions manquantes dans des systèmes modélisant le monde réel.

MESSAGES CLÉS

- ✓ Un réseau complexe est constitué de nœuds reliés par des liens, aussi appelés connexions. Dans les réseaux sociaux, les nœuds représentent des individus et un lien entre deux nœuds représente une relation entre les individus respectifs.
- ✓ Les réseaux complexes constituent un outil puissant pour aider à clarifier le sort des personnes disparues en classant les individus partageant des propriétés communes ou d'autres similarités au sein de groupes ou de grappes.
- ✓ La structure d'un réseau complexe aide les chercheurs à suggérer des hypothèses qui peuvent être explorées ultérieurement à l'aide d'autres informations, et également testées statistiquement.
- ✓ La structure d'un réseau complexe peut être affinée pour améliorer les résultats. Cela peut se faire, par exemple, en classant les connexions en connexions fortes et faibles, ou en attribuant une valeur à la force de la connexion.

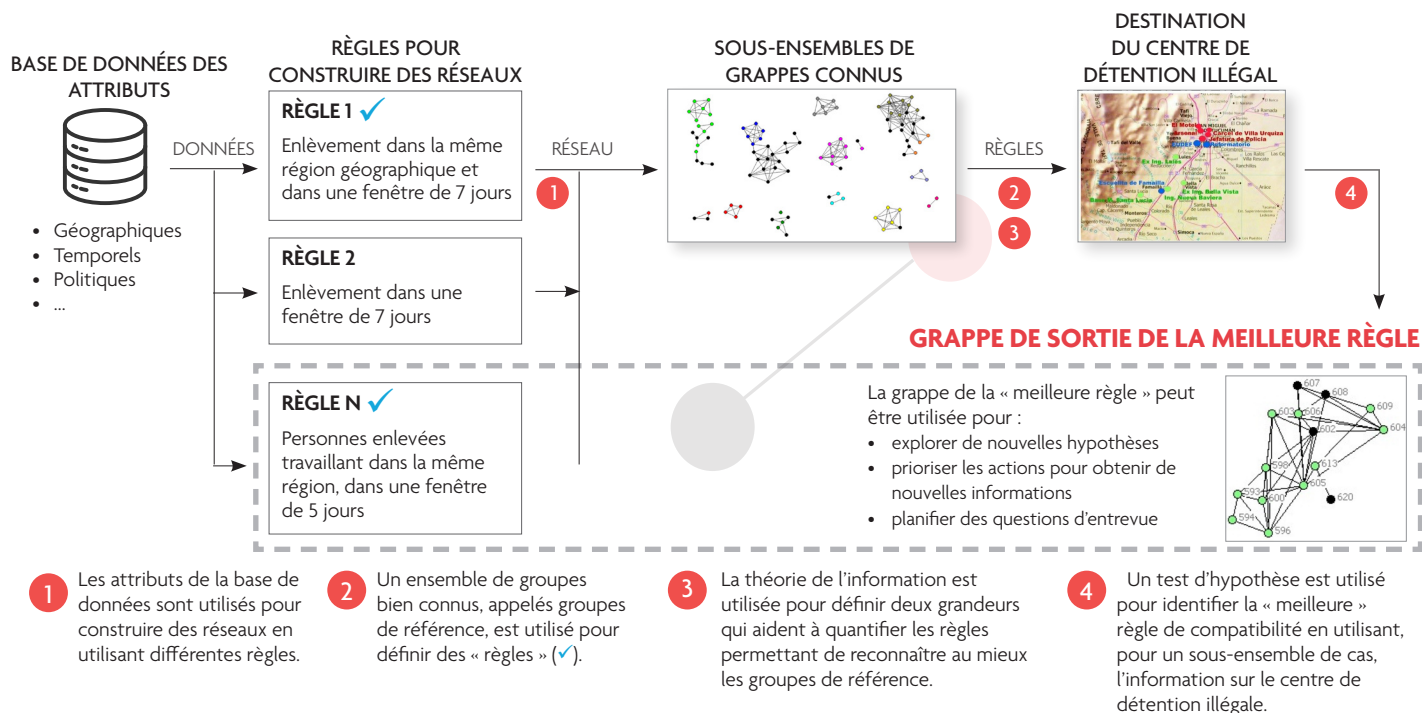
EXPLOITER LES INDICES

En 2011, des scientifiques de l'équipe d'anthropologie médico-légale d'Argentine et CONICET ont entrepris de construire un réseau complexe modélisant les personnes qui ont disparu pendant la dictature militaire du pays, au pouvoir de 1976 à 1983. Les nœuds représentent des individus, et les liens entre les nœuds représentent des relations explicites ou implicites entre les individus à un moment donné. Par exemple, les individus peuvent avoir vécu dans la même région, avoir appartenu au même groupe politique, ou avoir disparu dans un même intervalle de 7 jours. Ces relations peuvent varier dans le temps.

Des grappes de nœuds interconnectés sont apparues au sein du réseau. Les nœuds ont été classés en fonction de la quantité d'informations connues sur le destin de l'individu. L'équipe a d'abord utilisé des informations anthropologiques et médico-légales pour classer 64 nœuds en 12 groupes de référence codés par des couleurs. Après avoir construit le réseau, ces nœuds ont été connectés avec 41 autres nœuds, colorés en noir. On avait alors un sous-ensemble de 105 nœuds, parmi lesquels on avait pas mal d'informations sur 64 d'entre eux, y compris leur sort, et moins d'informations sur les 41 autres.

L'objectif de l'équipe était de déterminer une structure de grappes dans le réseau complexe compatible avec ces groupes de référence. Que des nœuds noirs se trouvent liés à un groupe de nœuds d'une même couleur pouvait suggérer que les individus auraient partagé le même destin. Par exemple, ils pourraient avoir été détenus dans le même centre de détention illégal. Cela suggère également les prochaines informations à collecter, les personnes à interroger et les questions à poser.

RELIER LES POINTS POUR AIDER À RETROUVER LES DISPARUS D'ARGENTINE



Il existe de nombreuses manières différentes de choisir les relations entre les individus dans ces analyses, et différentes relations peuvent conduire à des réseaux différents. Déterminer quelle relation choisir implique de tester différents types de relations afin de trouver un ensemble de règles de compatibilité permettant de discriminer les groupes de référence. Pour sélectionner l'ensemble des règles de compatibilité générant les meilleures grappes, l'équipe a utilisé les données de destination du centre de détention illégale combinées à des techniques d'inférence statistique.

La méthode a également été appliquée pour étudier le circuit des centres de détention illégale, où plusieurs milliers de personnes ont été retenues en captivité pendant la dictature argentine. Deux critères ont été utilisés pour les relations. Les relations fortes étaient celles entre des individus ayant la même affiliation politique et kidnappés dans la même région dans une fenêtre de 7 jours. Les relations faibles étaient celles entre individus de la même région, qui ont disparu dans une fenêtre de 3 jours.

Ces techniques peuvent être utilisées globalement pour analyser et connecter des informations concernant le sort d'autres personnes disparues. Les relations entre les compagnons de voyage le long des routes migratoires d'Afrique ou d'Amérique centrale, par exemple, pourraient orienter les recherches, aider à la collecte d'informations et contribuer à localiser des migrants. Dans les contextes de migration, il pourrait être particulièrement utile de travailler avec des réseaux à différents endroits et à différents moments, par exemple avant le départ, pendant le voyage, et à l'arrivée à la destination finale. Les nœuds ou les liens peuvent changer au fil du temps, et les grappes correspondantes associées à un nœud donné peuvent suggérer un ensemble d'indices qui, exploités ensemble, révèlent de meilleures informations.

CONCLUSIONS

Les réseaux complexes ont été étudiés dans un large éventail de sujets, de la génétique aux réseaux de communication évolutifs, aux stratégies de vaccination, ainsi qu'à la stabilité et au fonctionnement des écosystèmes. Des techniques mathématiques sophistiquées, combinées à des outils informatiques, peuvent aider à comprendre et à exploiter la structure et la dynamique très riches d'un réseau complexe, et contribuer à répondre à des questions fondamentales qui interpellent l'humanité. De telles avancées nécessiteront des efforts pluridisciplinaires.

RÉFÉRENCES

- Argentine Forensic Anthropology Team, eaaf.org
- Buchanan, M. 2003. *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Theory of Networks*, United Kingdom, W. W. Norton.
- Caridi, I., Dorso, C. O., Gallo, P. et Somigliana, C. 2011. A framework to approach problems of forensic anthropology using complex networks, *Physica A*, Vol. 390, No. 1662.
- Baraybar, J. P., Caridi, I. et Stockwell, J. 2020. A forensic perspective on the new disappeared: Migration revisited. D. H. Ubelaker, R. C. Parra, and S. C. Zapico eds), *Forensic Science and Humanitarian Action: Interacting with the Dead and the Living*, United Kingdom, Wiley.

AUTRICE

Inés Caridi
Université de Buenos Aires et CONICET, Argentine



Des maths pour agir, accompagner la prise de décision par la science, présente les mathématiques en action dans des exemples de résolution réussie de plusieurs défis sociaux et environnementaux majeurs. Rédigée par des mathématiciennes, des mathématiciens et des scientifiques du monde entier, la collection d'articles fournit une illustration remarquable du rôle des mathématiques pour relever les défis les plus urgents face à l'accélération du changement global. Elle couvre un large éventail de sujets liés aux Objectifs de développement durable, de la cartographie de la pauvreté à la prévision du changement climatique, en passant par la caractérisation de la mesure de l'écart entre les sexes, la modélisation des pandémies et des organisations alimentaires, ou la mesure de la biodiversité. Ces questions complexes revêtent de multiples facettes, qui exigent des mises en perspectives complexes et des solutions interdisciplinaires.

