

REVUE INTERNATIONALE DES ECONOMISTES DE LANGUE FRANÇAISE

RIELF 2023, Vol. 8, N°1

Association Internationale
des Economistes de Langue Française



avec la collaboration de



UNIwersYTET
EKONOMICZNY
W POZNANIU

l'Université des Sciences Economiques et de Gestion de Poznań



L'Université Bernardo O'Higgins - Chili

Rédacteur en chef

Krzysztof MALAGA, USEGP, Pologne

Rédactrice adjointe

Małgorzata MACUDA, USEGP, Pologne

Secrétaire de rédaction

Dorota CZYŻEWSKA-MISZTAL, USEGP, Pologne

Comité éditorial

Akoété Ega AGBODJI, Togo
Wissem AJILI BEN YOUSSEF, France
Alastaire ALINSATO, Bénin
Loubna ALSAGIHR OUEIDAT, Liban
Camille BAULANT, France
Matouk BELATTAF, Algérie
Francis BISMANS, France, Belgique
Horst BREZINSKI, Allemagne
Abdelaziz CHERABI, Algérie
Bernard COUPEZ, France
Jean-Jacques EKOMIE, Gabon
Jules Roger FEUDJO, Cameroun
Camelia FRATILA, Roumanie
Ewa FRĄCKIEWICZ, Pologne
Rosette GHOSSOUB SAYEGH, Liban
Marian GORYNIA, Pologne
Driss GUERRAOUI, Maroc
Juliana HADJITCHONEVA, Bulgarie
Vidal IBARRA-PUIG, Mexique
Nafii IBENRISSOUL, Maroc
Soumaïla Mouleye ISSOUFOU, Mali

Michel LELART, France
Laura MARCU, Roumanie
Tsvetelina MARINOVA, Bulgarie
Boniface MBIH, France
Mbodja MOUGOUE, États-Unis
Francisco OCARANZA, Chili
Thierry PAIRAULT, France
Jacques POISAT, France
Carlos QUENAN, France
Marek RATAJCZAK, Pologne
Alain REDSLOB, France
Jeannette ROGOWSKI, États-Unis
Paul ROSELE CHIM, France
Claudio RUFF ESCOBAR, Chili
Alain SAFA, France
Baiba ŠAVRIŅA, Lettonie
Piotr STANEK, Pologne
Abdou THIAO, Sénégal
Roger TSAFACK NANFOSSO, Cameroun
François VAILLANCOURT, Canada
Isabel VEGA MOCOROA, Espagne

Bureau de rédaction

Eliza SZYBOWICZ, soutien éditorial, USEGP, Pologne
Marta DOBRECKA, rédactrice technique, USEGP, Pologne

© Copyright by Association Internationale des Economistes de Langue Française, Université des Sciences Economiques et de Gestion de Poznań
Paris, Poznań 2023

La RIELF offre son contenu complet en accès libre sous licence Creative Commons BY NC SA 4.0

ISSN 2551-895X
e-ISSN 2727-0831

Edition digitale et imprimée
Editions de l'Université des Sciences Economiques et de Gestion de Poznań
Projet de couverture : Izabela Jasiczak, Bernard Landais, Krzysztof Malaga, Eduardo Téllez

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos (Claudio Ruff ESCOBAR et Krzysztof MALAGA).....	3
Alexis MATHEU, Paola JUICA Apport des modèles mathématiques et big data pour la prise de décisions de l'entreprise ; le cas d'épidémies telles que le SARS-CoV-2 dans le secteur de la santé au Chili	9
Cristian CORNEJO, Purificación GALINDO-VILLARDÓN Meta-Biplot comme mesure des variables de protection sociale pour les pays européens et latinoaméricains	20
Carlos SEBRANGO, Lizet SÁNCHEZ Prévision à court terme en temps réel de l'épidémie de COVID-19 à Cuba en utilisant la modélisation	34
Manuel E. CORTÉS La culture d'agrumes dans les communautés agricoles chiliennes : Vers un développement durable	49
Alexander A. PARSHINTSEV Élaboration et approbation d'un index global intellectuel capital orienté sur le sujet pour une analyse comparative sur tout le pays	63
Bastián GUTIÉRREZ, Roberto CORTÉS, Macarena DEHNHARDT Modèle logistique de désertion à travers des techniques de régression et un arbre de décision pour l'efficience dans la destination des ressources : Le cas d'une université privée chilienne	75
Camilo GONZÁLEZ Modèle d'élasticité de prix/demande du point de vue bayésien : le cas d'une entreprise de détail chilienne	90
Claudio RUFF, Marcelo RUIZ, Luis BENITES Modèle de caractérisation de la situation de qualité des universités chiliennes à partir d'indicateurs financiers et de gestion	106

Pedro CASTILLO

Concurrence dans la distribution au détail de combustibles liquides : Exploration de la dimension spatiale 124

Lidiya S. PARSHINTSEVA

Préparation estimée et vulnérabilité des pays face à la pandémie de COVID-19 : Elaboration et approbation de l'index global 145

Bartłomiej LACH, Krzysztof MALAGA

Évolution de la liberté économique dans les pays d'Amérique du Sud et de l'Union Européenne durant les années 1996–2022..... 163

Hassan Maman ABDO, Mahaman Laouan ABOUBE, Mbodja MOUGOUÉ

Convergence économique au sein de l'espace ouest-africain : L'intégration économique régionale à l'épreuve des faits 184

AVANT-PROPOS

Le numéro 1/2023 de la RIELF, que nous avons le plaisir de présenter aux lecteurs, a été édité par rédacteur invité Dr. Claudio RUFF ESCOBAR, en collaboration avec le Dr. Francisco OCARANZA BOSIO de l'Université Bernardo O'Higgins de Santiago du Chili. Il se compose de 12 articles dont les onze premiers concernent l'Amérique du Sud. L'article douzième, quant à lui, fait référence à l'espace ouest-africain.

Dans le premier article, *Apport des modèles mathématiques et big data pour la prise de décisions de l'entreprise ; le cas d'épidémies telles que le SARS-CoV-2 dans le secteur de la santé au Chili*, **Alexis MATHEU** et **Paola JUICA** proposent d'analyser, à partir des modèles théoriques mathématiques, l'apport de ce secteur de la science pour trouver et prévoir de possibles solutions afin de diminuer les effets de cette pandémie par le virus COVID-19. Pour cela, ils utilisent des analyses statistiques basées sur trois modèles, phénoménologiques non linéaires, configuration de données et modèle logistique généralisé, en espérant qu'ils contribueront à une meilleure évaluation et compréhension des mesures prises face à la crise sanitaire et qui seront adoptées à l'avenir pour faire face à de nouveaux virus, en utilisant mieux les données et les outils technologiques dont dispose l'humanité.

Dans le deuxième article, *Meta-Biplot comme mesure des variables de protection sociale pour les pays européens et latinoaméricains*, **Cristian CORNEJO** et **Purificación GALINDO-VILLARDÓN** constatent, que dans le cadre de la sécurité sociale, les systèmes de pensions constituent des mécanismes de protection sociale offrant des revenus aux personnes qui perdent leur capacité d'auto-génération en raison de leur âge (droits et bénéfices de la vieillesse), de leur incapacité (droits et bénéfices d'invalidité) ou du décès d'une des sources principales de revenus d'une famille (droits et bénéfices de survie). En ce qui concerne la Sécurité Sociale, les pays européens sont ceux qui ont le plus d'expérience. Quant à l'Amérique Latine, elle a été l'une des premières à introduire dans ses systèmes de pensions des schémas de capitalisation individuelle comme composant obligatoire depuis déjà plus de 30 ans, lorsque le Chili abandonna son système prévisionnel de distribution pour un de capitalisation individuelle. Ensuite, plusieurs pays en Amérique latine et en Europe suivirent le même chemin. Avec des systèmes de protection sociale bien conçus et implémentés, les pays peuvent renforcer le capital humain et améliorer la productivité, réduire les inégalités, stimuler la résilience et mettre fin au cycle de la pauvreté intergénérationnelle.

Dans le troisième article, *Prévision à court terme en temps réel de l'épidémie de COVID-19 à Cuba en utilisant la modélisation*, **Carlos SEBRANGO** et **Lizet SÁNCHEZ** notent que'en l'absence d'information fiable sur les mécanismes de transmission d'une infection émergente, de simples modèles phénoménologiques peuvent apporter une estimation précoce de l'étendue potentielle d'épidémies en temps réel. Un avertissement sur la taille finale d'une épidémie et en particulier de la COVID-19 actuellement actif peut servir aux autorités sanitaires pour y faire face. Une variété de modèles non-linéaires ont été développés pour définir les cas cumulés de maladies épidémiques infectieuses (e.g. Richards, logistique, modèles Gompertz). Tous ces modèles peuvent utiliser correctement les données pour obtenir des prévisions à court terme en temps réel. Typiquement, il s'agit de suivre la procédure d'estimation post-sélection, i.e., de sélectionner un modèle parmi tous ceux disponibles et d'ignorer ceux reposant sur l'incertitude dans l'estimation et l'inférence vu que ces procédures sont basées sur un seul modèle. Dans ce travail, ils établissent une prédiction en temps réel de la taille finale, point crucial de l'épidémie, et des prévisions 10 jours à l'avance de cas cumulatifs en utilisant plusieurs modèles non-linéaires où ces paramètres sont estimés via modélisation. La méthode est appliquée à l'épidémie de COVID-19 en 2020 à Cuba.

Dans le quatrième article, *La culture d'agrumes dans les communautés agricoles chiliennes : Vers un développement durable*, **Manuel E. CORTÉS** souligne l'importance des agrumes dans les communautés agricoles de la Province de Limarí du point de vue du développement agricole durable dans ces communautés, en soulignant les résultats de l'expérience des cultivateurs ruraux. D'abord, l'état de développement de la culture des agrumes au Chili. Ensuite, cette activité est traitée dans la perspective des communautés agricoles de Limarí. En troisième lieu, on présente une analyse pilote de la culture des agrumes dans la communauté agricole. Ce travail souligne l'attrait que présente le secteur des agrumes pour les communautés agricoles, en particulier la commercialisation du traditionnel citron jaune. Il se penche aussi sur l'implantation de programmes d'éducation agro-environnementale parmi ses habitants pour promouvoir le soin des ressources naturelles comme l'eau et la terre. La croissance et le développement de la culture des agrumes dans les communautés agricoles de Limarí doivent être consistants, avec une analyse de la disponibilité de ces ressources et leur utilisation responsable.

À son tour, dans le cinquième article, *Élaboration et approbation d'un index global intellectuel capital orienté sur le sujet pour une analyse comparative sur tout le pays*, **Alexander A. PARSHINTSEV** prétend que de nos jours, l'apprentissage, la formation, les innovations et la numérisation sont devenus des facteurs clés du développement. Dans ces conditions, le capital intellectuel devient l'un des éléments de base qui forment la compétitivité économique. En supposant que le capital intellectuel contribue à la réalisation de la majorité des objectifs de développement durable, la réalisation d'une évaluation complexe du capital

intellectuel revêt un intérêt particulier. Son étude est consacrée à l'élaboration de la méthodologie de calcul de l'indicateur global intégral pour évaluer le niveau de capital intellectuel qui pourrait être utilisé pour une analyse comparative entre les pays. L'auteur présente les suggestions sur les éléments de l'indice, le contenu et la structure même du capital intellectuel au niveau macro ; l'élaboration d'un système d'indicateurs statistiques pour évaluer l'état et le développement du capital intellectuel sur la base de l'analyse et de la synthèse des données disponibles, en tenant compte de l'expérience internationale dans le contexte du développement de l'innovation ; le développement d'un indice global intégral du capital intellectuel pour les comparaisons entre les pays. Les résultats de l'analyse expresse basée sur la liste restreinte d'indicateurs sont également présentés, mettant en évidence les leaders et les retardataires en 2016 et 2020.

Dans le sixième article, *Modèle logistique de, désertion à travers des techniques de régression et un arbre de décision pour l'efficience dans la destination des ressources : Le cas d'une université privée chilienne*, **Bastián GUTIÉRREZ**, **Roberto CORTÉS** et **Macarena DEHNHARDT** arrivent à la conclusion que lorsque l'éducation est devenue un droit fondamental qu'il faut conserver et consolider, une problématique apparaît, qui a suscité de nombreuses discussions académiques et qui prétend considérer de manière holistique et critique le phénomène de massification croissante des offres de formation, manifesté dans l'augmentation exponentielle de l'accès au troisième cycle. Certaines approches postulent que, non seulement il est nécessaire d'implémenter des politiques pour amplifier la couverture de l'accès, mais il faut aussi se pencher sur la qualité de l'éducation, en considérant la désertion et la rétention universitaire. Dans ce contexte, leur recherche vise à établir un modèle d'analyse qui permette le développement de la rétention et la prévention des causes de désertion. Les auteurs utilisent pour cela la méthodologie d'apprentissage supervisé déterminant les variables d'analyse à travers les techniques de régression et un arbre de décision, en créant un modèle logistique de désertion, capable d'améliorer l'efficience dans la destination de ressources. Finalement, ce travail visera à apporter une meilleure compréhension des phénomènes associés à la désertion et la rétention universitaire, pour aider dans la gestion et le processus de prise de décisions par les institutions d'enseignement supérieur.

Dans le septième article, *Modèle d'élasticité de prix/demande du point de vue bayésien: Le cas d'une entreprise de détail chilienne*, **Camilo GONZÁLEZ** présente les données d'une entreprise chilienne de détail pour modeler l'élasticité d'un point de vue bayésien. L'élasticité mesure le comportement des produits sur la base des prix et de la demande. Elle peut être obtenue à travers des régressions linéaires du logarithme des prix et les unités vendues. Le problème se pose avec les réductions, les jours spéciaux, etc. Cette relation temporelle provoque des biais dans les estimations que l'entreprise compense en réalisant une chaîne de régressions. La statistique bayésienne fixe une distribution pour les paramètres, et ensuite, avec

la plausibilité, utilise la règle de Bayes pour obtenir une distribution a posteriori. L'auteur utilise une a priori Normal-Gamma-Inverse pour spécifier le modèle de régression linéaire. Pour l'application, on obtient les élasticités au niveau de ligne à travers le modèle classique et les élasticités de produit avec le modèle bayésien, en incorporant l'information de la ligne. À travers un t-test on conclut que la moyenne des élasticités de la chaîne ne diffère pas de celles obtenues par le modèle bayésien. Par conséquent, en complétant les deux points de vue, on obtient de bons résultats qui peuvent être utilisés dans le commerce.

Dans le huitième article, *Modèle de caractérisation de la situation de qualité des universités chiliennes à partir d'indicateurs financiers et de gestion*, **Claudio RUFF**, **Marcelo RUIZ** et **Luis BENITES** constatent quel'un des indicateurs les plus significatifs de l'effectivité de systèmes d'assurance de qualité est le processus d'accréditation des institutions d'enseignement supérieur, car il considère une variété d'éléments essentiels au moment d'accréditer la qualité des systèmes de formation utilisés dans ces institutions. Dans ce contexte, leur recherche vise à créer un modèle de caractérisation, évolution et projection de la situation d'accréditation des universités chiliennes rattachées au Système d'Information de l'Enseignement Supérieur (SIES). Ils emploient une méthodologie de type quantitatif exploratoire corrélationnel et prédictif qui considère 56 institutions d'enseignement supérieur chiliennes, cataloguées comme universités, et leurs indicateurs publiés entre 2017 et 2021 par le SIES, afin de créer un modèle basé sur l'évolution des indicateurs consolidés et d'établir une information de référence sur les secteurs les plus pertinents dans les résultats du processus d'accréditation. Ainsi, cette recherche se présente comme un modèle contribuant à la planification stratégique des universités pour atteindre une meilleure qualité et davantage d'années d'accréditation.

Dans le neuvième article, *Concurrence dans la distribution au détail de combustibles liquides : Exploration de la dimension spatiale*, **Pedro CASTILLO** vise à étudier le niveau de concurrence spatiale entre les stations-services existant sur le marché de distribution au détail des combustibles liquides, à partir de l'analyse comparée de leur positionnement géospatial et de leur influence et variations de prix sur le marché national. Selon l'auteur dans le cas du Chili, l'industrie se caractérise par sa forte concentration en nombre de fournisseurs et intégration verticale avec les segments de distribution de gros, transport et stockage, d'où l'importance de l'analyse en matière de concurrence. De plus, il existe une grande différenciation des produits en termes de localisation géographique, ce qui rend l'analyse spatiale essentielle. Ainsi, il a analysé en premier lieu l'impact du nombre de stations proches, du même réseau, et d'un réseau rival ou indépendantes. Les résultats sont configurés selon deux approches. La première conclut que les résultats numériques sont consistants dans la dynamique des prix et le positionnement territorial des stations, car il apparaît que les stations indépendantes ont un effet négatif sur le niveau de prix dans un rayon de 20 minutes, avec un réseau-action moyen de 0,19%.

De même, on note un impact supérieur sur la distribution d'essence de 93 octanes et le Diesel que de l'essence de 97 octanes, car les segments de Diesel et 93 octanes sont les plus compétitifs de l'industrie, et dans le contexte où les stations indépendantes participent le plus. Dans la deuxième, les résultats montrent le rôle dominant de l'entreprise Copec : ce réseau est celui de plus grande influence négative sur le niveau des prix de ses rivales. Comme dans le premier modèle, les résultats varient par type de combustible, le rôle des réseaux d'essence de 97 octanes étant le plus important. Les résultats sont hétérogènes au niveau régional, plus élevés dans les zones géographiques densément peuplées par rapport aux zones australes et éloignées des principaux centres urbains.

Dans le dixième article, *Préparation estimée et vulnérabilité des pays face à la pandémie de COVID-19 : Elaboration et approbation de l'index global*, **Lidiya S. PARSHINTSEVA** stipule que la pandémie de COVID-19 et ses conséquences socio-économiques ont provoqué une augmentation notable du rôle de l'estimation de la préparation et la vulnérabilité des pays. Il s'agit d'un complément à la recherche existante et aux classements multidimensionnels, ainsi que d'une présentation des résultats d'une évaluation nationale complète de la préparation et de la vulnérabilité à la pandémie basée sur les indicateurs multidimensionnels proposés par les auteurs. L'objectif de cette recherche était d'estimer le niveau de préparation nationale et la vulnérabilité d'un point de vue complexe. Un index multidimensionnel global a été calculé et utilisé pour donner un classement des pays à partir de cette méthodologie. L'index a permis aux auteurs de conclure qu'il y a une différence importante dans le niveau de préparation face à une pandémie et une disproportion entre certains éléments du système pour chaque pays. L'analyse des données, les sources et les rapports ont souligné le besoin d'étendre la liste des indicateurs pour évaluer le niveau de vulnérabilité. L'opportunité d'utiliser cet index est prouvée par l'analyse corrélative statistique entre les sous-index et le niveau de morbidité et mortalité due au COVID-19. L'index est utilisé pour former des groupes multidimensionnels et le partitionnement de données permet d'estimer les conséquences économiques de la pandémie. Les résultats du partitionnement de données ont permis de former quatre groupes de pays : (1) très vulnérables avec faible niveau de préparation ; (2) vulnérables avec faible niveau de préparation ; (3) vulnérables avec haut niveau de préparation ; (4) peu vulnérables avec haut niveau de préparation. L'analyse comparative des conséquences économiques (changement annuel PIB en 2020–2019 par rapport à PIB en 2019–2017), taux de chômage et changement de l'inflation ont montré des disproportions de l'influence de la pandémie par groupes de pays.

Dans le onzième article, *Évolution de la liberté économique dans les pays d'Amérique du Sud et de l'Union Européenne durant les années 1996–2022*, **Bartłomiej LACH** et **Krzysztof MALAGA** reconnaissent que le but de leur recherche est de décrire et d'évaluer l'évolution de la liberté économique dans les pays d'Amérique du Sud et de l'Union européenne dans les années 1996–2022. La base d'inférence

sont les coefficients de liberté économique publiés depuis 1995 par The Heritage Foundation à Washington et *Wall Street Journal* pour 184 pays à travers le monde. L'analyse comparative est effectuée par pays et en trois sous-groupes, qui sont : les pays d'Amérique du Sud, les pays européens qui ont rejoint l'Union européenne avant 2003 (EU1) et après 2003 (EU2). Dans la recherche empirique, les méthodes d'analyse de corrélation, σ -convergence, σ -divergence et analyse comparative multivariée sont utilisées. Le programme R et les packages *dtw* et *dtwclus* sont également appliqués. En conséquence, une évaluation approfondie de l'évolution de la liberté économique a été réalisée dans les 41 pays évalués, ainsi que séparément dans les trois groupes de pays analysés. Il a été montré qu'en termes de liberté économique, les pays de la EU1 l'emportent sur les pays de la EU2 et d'Amérique du Sud. En conclusion on présente remarques générales sur la relation entre les étapes des changements dans la liberté économique et les réformes institutionnelles visant une démocratisation plus complète des pays et le développement d'une économie de marché moderne.

Enfin, dans le douzième article, qui est le seul traitant de l'Afrique, *Convergence économique au sein de l'espace ouest-africain : L'intégration économique régionale à l'épreuve des faits*, **Hassan Maman ABDO**, **Mahaman Laouan ABOUBE** et **Mbo-dja MOUGOUÉ**, proposent d'abord une discussion à la lumière des travaux récents sur la convergence économique ou non des pays ouest-africains qui sont dans le processus de régionalisation des échanges depuis 1975. Ils examinent, ensuite, les déterminants de la convergence en prenant appui sur une analyse économétrique spatiale de tous ces États sur la période 1990–2021. Les résultats obtenus font ressortir que les économies sont globalement et fortement divergentes ; les convergences absolue et conditionnelle n'étant pas réalisées. Mais trois clubs de convergence ont été décelés, avec le Sénégal qui fait bande à part. Le taux d'investissement, les dépenses publiques, le taux d'inflation, la parité du pouvoir d'achat, le taux d'ouverture commerciale, le taux de scolarisation et le taux de croissance démographique, variables structurelles de contrôle, ont joué un rôle important dans l'appréciation de la vitesse et du niveau de divergence des économies ouest-africaines. Ceci a mis en évidence les écarts des revenus par tête, le retard dans les mécanismes intégrateurs et les effets des chocs auxquels ces économies sont soumises.

Claudio Ruff Escobar et Krzysztof Malaga

PRÉVISION À COURT TERME EN TEMPS RÉEL DE L'ÉPIDÉMIE DE COVID-19 À CUBA EN UTILISANT LA MODÉLISATION

Real-time short-term forecast of COVID-19 epidemic in Cuba using model averaging

Carlos SEBRANGO¹

Université de Sancti Spiritus José Martí Pérez – Cuba
Centre d'étude de l'énergie et des procédés industriels
sebrango@uniss.edu.cu
<https://orcid.org/0000-0001-6453-1538>

Lizet SÁNCHEZ²

Centre d'immunologie moléculaire – Cuba
lsanchez@cim.sld.cu
<https://orcid.org/0000-0001-7747-1052>

Abstract : In the absence of reliable information about transmission mechanisms of an emerging infection, simple phenomenological models can provide an early assessment of the potential scope of outbreaks in near real-time. Early prediction of the final size of any epidemic and in particular for ongoing COVID-19 epidemic can be useful for health authorities in order to plan the response to the outbreak. A variety of nonlinear models have been developed to model reported cumulative cases in infectious disease outbreak (e.g., Richards, logistic, Gompertz models). All these models could fit epidemic data well in order to obtain real-time short-term forecasts. Typically, one follows the so called post selection estimation procedure, i.e., selects the best fitting model out of the set of candidate models and ignores the model uncertainty in both estimation and inference since these procedures are based on a single model. In this paper, we conduct a real-time prediction for the final size, turning point of the outbreak, and also generate 10-day ahead forecasts of cumulative case using several nonlinear models in which these parameters are estimated via model averaging. The proposed method is applied to COVID-19 epidemic data in 2020 Cuba outbreak.

¹ Comandante Manuel Fajardo s/n, Olivos 2, 60100, Sancti Spiritus, SS, Cuba.

² 15 Street and 216 Street, Siboney, Playa, La Habana 11600, Cuba.

Keywords : COVID-19, phenomenological models, real-time forecast, final size, model averaging.

Résumé : En l'absence d'information fiable sur les mécanismes de transmission d'une infection émergente, de simples modèles phénoménologiques peuvent apporter une estimation précoce de l'étendue potentielle d'épidémies en temps réel. Un avertissement sur la taille finale d'une épidémie et en particulier de la COVID-19 actuellement actif peut servir aux autorités sanitaires pour y faire face. Une variété de modèles non-linéaires ont été développés pour définir les cas cumulés de maladies épidémiques infectieuses (e.g. Richards, logistique, modèles Gompertz). Tous ces modèles peuvent utiliser correctement les données pour obtenir des prévisions à court terme en temps réel. Typiquement, il s'agit de suivre la procédure d'estimation post-sélection, i.e., de sélectionner un modèle parmi tous ceux disponibles et d'ignorer ceux reposant sur l'incertitude dans l'estimation et l'inférence vu que ces procédures sont basées sur un seul modèle. Dans ce travail, nous établissons une prédiction en temps réel de la taille finale, point crucial de l'épidémie, et des prévisions 10 jours à l'avance de cas cumulatifs en utilisant plusieurs modèles non-linéaires où ces paramètres sont estimés via modélisation. La méthode est appliquée à l'épidémie de COVID-19 en 2020 à Cuba.

Mots-clés : COVID-19, modèles phénoménologiques, prévision en temps réel, taille finale, modélisation.

JEL classification : C02, I12.

Introduction

L'actuelle épidémie d'un nouveau coronavirus (COVID-19) a commencé dans la province de Hubei, en Chine, en décembre 2019 et s'est rapidement répandue dans 185 pays. Le jour où la World Health Organization (WHO) a défini comme pandémie la COVID-19, 11 mars, les 3 premiers cas étaient rapportés à Cuba.

Des polices publiques efficaces ont été établies dans le pays pour contrôler l'épidémie de COVID-19 : isolation, quarantaines, distances sociales, réorganisation professionnelle, restrictions de voyage, etc.

Malgré ces mesures, le nombre de cas a continué d'augmenter et le pays a besoin de prendre des décisions sur les diverses ressources pour contrôler l'épidémie. Le modèle mathématique peut jouer un rôle clé dans l'atteinte de cet objectif.

Ces dernières années, l'intérêt pour l'utilisation des modèles mathématiques dans l'analyse des épidémies infectieuses a augmenté (Chowell, & Viboud, 2016). Ces modèles ont permis de décrire une attitude face à l'épidémie, facilité l'estimation des paramètres épidémiologiques clés, gérer l'impact des interventions de contrôle, réaliser des prédictions en temps réel et aider à comprendre et définir les dynamiques de transmission. Lorsque la connaissance de l'impact d'une maladie

infectieuse émergente, comme la COVID-19, est limitée, l'usage des modèles phénoménologiques peut aider à apporter une évaluation précoce de l'étendue potentielle des épidémies en temps réel.

Les modèles phénoménologiques (Hsieh et al., 2013) se débarrassent des suppositions mécaniques. Ils font des suppositions générales sur la forme de la courbe d'incidence. En général, ces simples modèles phénoménologiques utilisent moins de paramètres, font des suppositions plus directes et donnent probablement des estimations plus solides quand ils sont utilisés dans des contextes avec des données très limitées (une situation courante pour les épidémies historiques ou au début d'une épidémie de maladie émergentes ou réapparaissant) (Ma et al., 2014).

Un travail antérieur a montré que la croissance des modèles phénoménologiques peut saisir les structures empiriques des épidémies du passé et permettre de créer des prévisions de la trajectoire à court terme des épidémies en temps réel.

Ces approches sont utiles en particulier lorsque les données épidémiologiques sont limitées (Chowell, 2017 ; Chowell, Hincapie-Palacio et al., 2016 ; Chowell, Sattenspiel et al., 2016 ; Chowell, & Viboud, 2016 ; Chowell, Viboud et al., 2016). Les prévisions à court terme établies à partir de ces modèles peut aider à guider la gestion des ressources critiques pour mettre l'épidémie sous contrôle (Roosa et al., 2020a, 2020b).

L'un des modèles phénoménologiques les plus utilisés pour la modélisation des données sur les maladies est le modèle de Richards (Hsieh, 2015, 2017 ; Hsieh et al., 2016 ; Richards, 1959 ; Wang et al., 2012), quoique récemment Chowell et autres (Chowell, 2017 ; Chowell, Hincapie-Palacio et al., 2016 ; Chowell, Sattenspiel et al., 2016 ; Chowell & Viboud, 2016 ; Chowell, Viboud et al., 2016) ont utilisé une généralisation de ce modèle, le modèle de Richards généralisé, qui a aidé à caractériser les profils de croissance précoce à partir de données d'épidémie de maladie infectieuse comme Dengue, Zika, Ebola et HIV AIDS. Ces modèles considèrent seulement la taille de population cumulative infectante avec saturation de croissance à mesure que l'épidémie progresse. Leur hypothèse initiale est que la courbe d'incidence consiste en une seule poussée de forte incidence, créant une courbe en S avec un seul point tournant de l'épidémie (Chowell, 2017).

Une variété de modèles non-linéaires ont été développés pour établir les cas cumulatifs constatés pour les épidémies de maladies infectieuses. Tous ces modèles peuvent s'appliquer aux données sur une épidémie. L'utilisation de plusieurs modèles appliqués aux mêmes données soulève le problème de la sélection de modèle. En principe, on choisit le meilleur modèle disponible en ignorant l'incertitude en estimation et inférence due à la sélection de modèle. Pour ces raisons, plusieurs auteurs (Claeskens & Hjort, 2008 ; Sebrango-Rodríguez et al., 2017) recommandent les techniques de modélisation pour réaliser un multi-modèle pour les paramètres estimés. La modélisation est une méthode qui considère tous les modèles ajustés pour l'estimation des paramètres. Elle repose sur un équilibre

des paramètres de premier intérêt obtenus à partir des divers modèles, donnant davantage de poids à ceux qui suivent de plus près les données (Sebrango-Rodríguez et al., 2017).

Dans cette étude, nous établissons une prédiction en temps réel de la taille finale et du tournant de l'épidémie, et créons des prévisions de 10 jours de cas cumulés en utilisant plusieurs modèles phénoménologiques non-linéaires dans lesquels ces paramètres sont estimés à travers la modélisation. La méthode proposée est appliquée aux données sur l'épidémie de COVID-19 en 2020 à Cuba.

Le travail est organisé ainsi : nous commençons par la description des données utilisées ; nous présentons les modèles non-linéaires utilisés et nous commentons l'incertitude du modèle, sa sélection et la modélisation. La méthode utilisée est appliquée aux données par la suite, et enfin nous interprétons les résultats.

1. Méthodes

1.1. Données

Les données quotidiennes de cas de COVID-19 confirmés du 11 mars au 28 avril 2020 venaient de la page officielle du ministère de la Santé publique de Cuba Infomed (<https://www.infomed.sld.cu>), qui donne en temps réel l'information sur l'épidémie. Les données sur les nouveaux cas confirmés viennent par province (15 provinces et une municipalité spéciale) et par date, et sont répertoriées sur Excel.

1.2. Modèles phénoménologiques non-linéaires

Le modèle de Richards est l'un des modèles phénoménologiques les plus courants pour les cas cumulatifs dans les épidémies de maladies infectieuses. En particulier, Hsieh et al. (Hsieh, 2015, 2017 ; Hsieh, Arazoza et al., 2013 ; Hsieh, Huang et al., 2016) ont démontré qu'il peut être utilisé en prédiction de temps réel de la sévérité d'une épidémie en estimant la capacité porteuse (i.e. la taille finale de l'épidémie) et la détection en temps réel du tournant (i.e. le moment du maximum de cas).

Y_t sera le nombre cumulatif de cas au moment t . Assumons que Y_t sont asymptotiquement normal distribués avec une moyenne $\mu(t, \theta)$ et une variance σ^2 , $Y_t \sim N(\mu(t, \theta), \sigma^2)$. Ici, $\mu(t, \theta)$ est la structure moyenne pour $\mu(t, \theta)$ ou le modèle non-linéaire à utiliser et θ le vecteur paramètre à estimer.

Le modèle de Richards appartient à la famille des modèles non linéaires. Son expression analytique est donnée dans la première ligne du tableau 1 et le vecteur paramètre à estimer est $\theta = (\alpha, \gamma, k, \eta)$ où α est la taille finale de l'épidémie, γ est le taux de croissance intrinsèque per capita de la population infectée, k est l'exposant de la déviation de la courbe logistique standard et η le tournant.

En plus du modèle de Richards, d'autres modèles non linéaires ont été développés pour les données de croissance. Parmi eux, considérons la logistique tierce partie (3PL) et les modèles Sigmoidal Emax et Gompertz (Sebrango-Rodríguez et al., 2017). Tous ces modèles peuvent s'adapter aux données épidémiques pour obtenir des prévisions en temps réel à court terme. Le tableau 1 présente trois autres modèles non linéaires possibles. Le modèle 3PL est un cas spécial du modèle de Richards, obtenu lorsque l'exposant $k = 1$. Ici, la courbe de croissance est symétrique par rapport au tournant et a des périodes égales de croissance lente et rapide. Le modèle de Gompertz est un autre cas spécial de la fonction de Richards lorsque $\gamma \rightarrow 0$, et est fréquemment utilisé dans des situations où la croissance n'est pas symétrique par rapport au tournant. Le modèle Sigmoidal Emax est utilisé généralement pour la relation dose-effet. Il est obtenu par la transformation mathématique du modèle 3PL et réévaluer la variable indépendante par une transformation logarithmique. Notons que pour tous les modèles du tableau 1 le tournant (η) et la taille finale de l'épidémie (α) sont des paramètres dans le modèle.

Notons que la première dérivée de $\mu(t, \theta)$, $\mu^0(t, \theta) = \frac{\partial \mu(t, \theta)}{\partial t}$, est le nombre de cas en temps t , i.e., l'incidence en temps t .

Tableau 1. Modèles non-linéaires considérés pour les cas cumulatifs rapportés de COVID-19

Modèles	$\mu(t, \theta)$	$\mu'(t, \theta)$
Richards	$\frac{\alpha}{\left[1 + k \cdot e^{-\gamma \cdot k(t-\eta)}\right]^{\frac{1}{k}}}$	$\gamma \mu(t) \left[1 - \left(\frac{\mu(t)}{\alpha}\right)^k\right]$
3P Logistic	$\frac{\alpha}{1 + e^{-\gamma(t-\eta)}}$	$\gamma \mu(t) \left[1 - \frac{\mu(t)}{\alpha}\right]$
Sigmoid Emax	$\alpha_0 + \frac{t^n(\alpha - \alpha_0)}{t^n + \eta^n}$	$\frac{n}{t} [\mu(t) - \alpha_0] \left[1 - \frac{\mu(t) - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0}\right]$
4P Gompertz	$\alpha_0 + (\alpha - \alpha_0)e^{-e^{-\gamma(t-\eta)}}$	$-\gamma [\mu(t) - \alpha_0] \ln \left[\frac{\mu(t) - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0}\right]$

Source : élaboration des auteurs.

1.2.1. Incertitude du modèle, sélection et modélisation

Dans cette section, nous décrivons la technique de modélisation (MA), utilisée pour expliquer l'incertitude du modèle en combinant les estimations de tous les modèles ajustés. Les techniques de modélisation permettent d'estimer le composant dans θ en utilisant l'information de tous les modèles ajustés et ainsi de tenir compte de l'incertitude du modèle. Assumons que la sélection du modèle soit

faite sur le critère d'information d'Akaike (AIC). Pour un groupe de R modèles candidats g_1, g_2, \dots, g_R , Burnham et Anderson (2004) proposent de redimensionner l' AIC à :

$$\Delta AIC_i = AIC_i - AIC_{min}, i = 1, \dots, R$$

Ici, AIC_{min} est la plus petite valeur d' AIC dans les modèles de R . Les différences d' AIC , ΔAIC_i , sont interprétées comme perte d'information quand le modèle g_i , plutôt que le meilleur modèle g_{min} , est utilisé pour s'approcher du modèle correct et inconnu. Burnham et Anderson (2004) définissent les poids d'Akaike comme :

$$w_i(AIC) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\Delta AIC_i\right)}{\sum_{i=1}^R \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta AIC_i\right)}$$

où l'Akaike $w_i(AIC)$ peut être interprété comme le poids de l'évidence que le modèle g_i est le meilleur du groupe de R modèles car l'un des modèles doit être le meilleur. Le modèle non linéaire avec le plus haut poids d'Akaike (i.e. le minimum AIC) est considéré comme le modèle avec la meilleure qualité d'ajustement aux données.

En suivant Burnham et Anderson (2004), on peut calculer le modèle moyen pour l'estimation avec le tournant ($\hat{\eta}_{MA}$) et la taille finale de l'épidémie ($\hat{\alpha}_{MA}$) comme suit :

$$\hat{\eta}_{MA} = \sum_{i=1}^R w_i(AIC) \hat{\eta}_i, \hat{\alpha}_{MA} = \sum_{i=1}^R w_i(AIC) \hat{\alpha}_i$$

Ici, η_i et α_i sont les estimations de paramètre pour le tournant et la taille finale de l'épidémie, respectivement. Les estimateurs de la variance pour η_{MA} et α_{MA} sont donnés respectivement par

$$\widehat{\text{var}}(\hat{\eta}_{MA}) = \left[\sum_{i=1}^R w_i(AIC) \sqrt{\widehat{\text{var}}(\hat{\eta}_i | M_i) + (\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_{MA})^2} \right]^2$$

$$\widehat{\text{var}}(\hat{\alpha}_{MA}) = \left[\sum_{i=1}^R w_i(AIC) \sqrt{\widehat{\text{var}}(\hat{\alpha}_i | M_i) + (\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_{MA})^2} \right]^2$$

Notons que l'on peut remplacer l' AIC par d'autres critères d'information comme BIC ou KIC et calculer le poids du modèle à partir d'eux.

1.2.2. Incertitude de paramètre et prévisions à partir de modèles basés sur une incertitude quantifiée

Nous calibrons chaque modèle selon les rapports cumulés de cas quotidiens pour Cuba. Les données débutent le 11 mars 2020, début de l'épidémie. La première procédure de calibration inclut 25 observations : du 11 mars au 4 avril 2020. Cette période de calibration augmente de cinq jours avec chaque nouvelle publications de données, avec la dernière période entre le 11 mars et le 28 avril 2020 (points de données).

Pour quantifier l'incertitude d'estimation des paramètres, des intervalles de confiance ont été construits en simulant 200 réalisations de la courbe $C(t)$ estimée par la modélisation en utilisant les techniques de *bootstrap* avec la structure d'erreur de Poisson, comme dans les études antérieures (Chowell, 2017 ; Roosa et al., 2020a, 2020b). Chaque réalisation du nombre cumulatif de cas confirmés $C_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 200$) est créé comme suit : pour chaque observation $C(t)$ (ajustement de modélisation) pour $t = 2, 3, \dots, n$ jours, crée une nouvelle observation $C'_i(t)$ for $t \geq 1$ ($C'_i(t) = C_i(t)$) à partir de la distribution de Poisson où : $C(t) - C(t-1)$ (croissance journalière $\dot{C}(t)$ du jour $t-1$ au jour t). La réalisation correspondante du nombre

cumulatif de cas est donnée par $C_i(t) = \sum_{j=1}^t C'_i(j)$, où $t = 1, 2, \dots, n$. Le tournant et la taille finale de l'épidémie ont été estimés à partir de chaque 200 courbes simulées pour caractériser leur distribution empirique et dérivation nominale 95% d'intervalles de confiance.

Un modèle de données proprement calibré peut permettre d'établir des prévisions à court terme du nombre cumulatif de cas confirmés. Créant une prévision basée sur l'incertitude du modèle donnée par l'ajustement aux 200 courbes d'épidémie simulées, est un travail informatique relativement simple qui requiert la propagation de l'incertitude de l'état actuel du système à un horizon de 10 jours. Ainsi, nous prévoyons l'entière incertitude du système en utilisant les incertitudes du paramètre, précédemment dérivées du processus de quantification de l'incertitude décrit plus haut.

2. Résultats

2.1. Modèles phénoménologiques non-linéaires et modélisation

Le système normal de modèle est utile pour les prédictions en temps réel car on utilise seulement une partie des données pour celle à long terme. Nous ne voulons pas baser l'estimation sur un seul modèle. Tous les modèles non-linéaires mentionnés plus haut étaient conçus pour une seule phase de l'épidémie de COVID à Cuba sur différentes périodes de 25 (11/3–4/4), 30 (11/3–9/4), 35 (11/3–14/4), 40 (11/3–19/4),

45 (11/3–24/4) et 50 (11/3–29/4) jours. Les modèles étaient ajustés à un nombre cumulatif quotidien de cas rapportés, tournant et taille finale étant estimés. Pour cela le *R* software 3.6.2 était utilisé, avec la fonction *gnls* des packages *nlme* et *DengueRT*.

Le tableau 2 montre les critères d'information Akaiques et les poids Akaiques pour tous les modèles non-linéaires servant à calculer l'estimation moyenne du tournant et de la taille finale de l'endémie sur différentes périodes de la COVID-19 à Cuba. Pour la première période, tous les modèles étaient proches de l'*AIC*.

Les poids Akaiques pour la logistique, les modèles Sigmoid Emax et Richards sont de 0,47, 0,24 et 0,17 respectivement.

Mais pour les autres périodes, les estimations de taille finale et de tournant étaient dominées par un seul modèle ou maximum deux modèles. Le modèle Sigmoid Emax dominait la seconde période ($AIC = 187,88$, $w_i = 0,879$). Pour les périodes 11/3–14/4, 11/3–19/4, 11/3–24/4, les modèles avec l'*AIC* le plus bas étaient les Gompertz et Richards, avec des poids Akaiques 1) 0,862, 0,138 ; 2) 0,775, 0,225 and 3) 0,599, 0,40, respectivement. Pour la plus grande période (11/3–29/4), le modèle de Richards avait un poids Akaike égal à $w_i = 0,928$, tandis que les poids obtenus pour les autres modèles sont relativement réduits, ce qui implique que le paramètre moyen du modèle estimé est surtout basé sur le modèle de Richards.

Tableau 2. *AIC* et poids de tous les modèle non-linéaires et moyenne sur différentes périodes de l'épidémie de COVID-19 à Cuba

Modèles	Période											
	11/3–4/4		11/3–9/4		11/3–14/4		11/3–19/4		11/3–24/4		11/3–29/4	
	<i>AIC</i>	W_i	<i>AIC</i>	W_i	<i>AIC</i>	W_i	<i>AIC</i>	W_i	<i>AIC</i>	W_i	<i>AIC</i>	W_i
3P Logistic	143,13	0,47	210,04	1,4E-05	276,50	2,9E-09	323,08	1,8E-10	379,19	9,5E-14	425,56	1,9E-13
Richards	145,11	0,17	198,06	0,005	240,84	0,138	281,17	0,225	321,05	0,40	367,08	0,928
Sigmoid Emax	144,52	0,24	187,88	0,879	267,16	2,7E-07	304,47	1,9E-06	337,91	8,7E-05	388,49	2,1E-05
4P Gompertz	145,92	0,12	191,94	0,115	237,18	0,862	278,69	0,775	320,24	0,599	372,21	0,071

Source : élaboration des auteurs.

L'estimation et l'erreur standard obtenus pour tous les modèles non-linéaires et la modélisation, pour le tournant et la taille finale de l'épidémie de COVID à Cuba, sont présentées dans les tableaux 3 et 4 sur différentes périodes. La figure 1 présente les données de l'épidémie, les modèles ajustés, les prévisions pour tous les modèles non-linéaires et la modélisation sur différentes périodes. Notons que le modèle 3PL sous-estime toujours la taille finale de l'épidémie. L'estimation du modèle pour la taille finale est lentement stabilisée après la deuxième période (voir tableau 3). Si l'on utilise la limite supérieure de l'intervalle de confiance pour la taille finale comme le pire scenario, l'estimation de cette limite va de 3661,10 au jour 35 à 1939,65 au jour 50. Cette information peut être utile aux autorités de la santé.

Tableau 3. Taille final prévue (erreur standard) de l'épidémie en utilisant tous les modèles non-linéaires et la moyenne sur différentes période de l'épidémie de COVID-19 à Cuba

Période	Modèle 3PL	Modèle Richards	Sigmoid Emax	Gompertz	Modélisation
11/3-4/4	431,90 (25,42)	436,60 (75,64)	2746,14 (3129,39)	1311,49 (377,47)	1081,27 (1307,96)
11/3-9/4	599,53 (39,69)	1507,98 (650,63)	4733,26 (4013,54)	1924,70 (379,51)	4391,09 (3845,11)
11/3-14/4	1237,40 (60,69)	2900,97 (1042,39)	4448,44 (1720,42)	2720,49 (365,35)	2745,44 (457,83)
11/3-19/4	1413,09 (37,23)	2604,87 (410,42)	2805,35 (276,68)	2774,41 (201,90)	2736,29 (256,17)
11/3-24/4	1588,90 (28,81)	2401,02 (178,05)	2556,07 (108,85)	2658,44 (108,89)	2559,02 (181,35)
11/3-29/4	1664,75 (18,68)	2107,83 (75,54)	2246,28 (50,82)	2438,01 (67,71)	2131,35 (95,85)

Source : élaboration des auteurs.

Comme pour la taille finale de l'épidémie, l'estimation du tournant de l'épidémie se stabilise lentement après la seconds période (voir tableau 4). Notons que si l'on utilise la limite supérieure de l'intervalle de confiance pour le tournant, moment maximum de confirmation de cas, comme le pire scenario, l'estimation de cette limite va de 43,52 au jour 35 à 34,39 au jour 50.

Tableau 4. Tournant prévu (erreur standard) de l'épidémie en utilisant tous les modèle non-linéaires et moyenne sur différentes période de l'épidémie de COVID-19 à Cuba

Période	Modèle 3PL	Modèle Richards	Sigmoid Emax	Gompertz	Modélisation
11/3-4/4	21,10 (0,49)	21,16 (0,99)	47,63 (20,76)	29,62 (3,16)	28,36 (11,79)
11/3-9/4	23,44 (0,58)	31,50 (4,75)	58,67 (19,29)	33,93 (2,54)	55,66 (19,82)
11/3-14/4	31,07 (0,62)	39,59 (5,27)	56,41 (9,80)	38,40 (2,01)	38,56 (2,48)
11/3-19/4	32,74 (0,39)	38,08 (2,24)	45,94 (2,33)	38,74 (1,21)	38,59 (1,46)
11/3-24/4	34,43 (0,31)	36,94 (0,99)	43,85 (1,04)	38,08 (0,73)	37,62 (1,00)
11/3-29/4	35,19 (0,22)	35,29 (0,42)	40,92 (0,54)	36,65 (0,52)	35,39 (0,50)

Source : élaboration des auteurs.

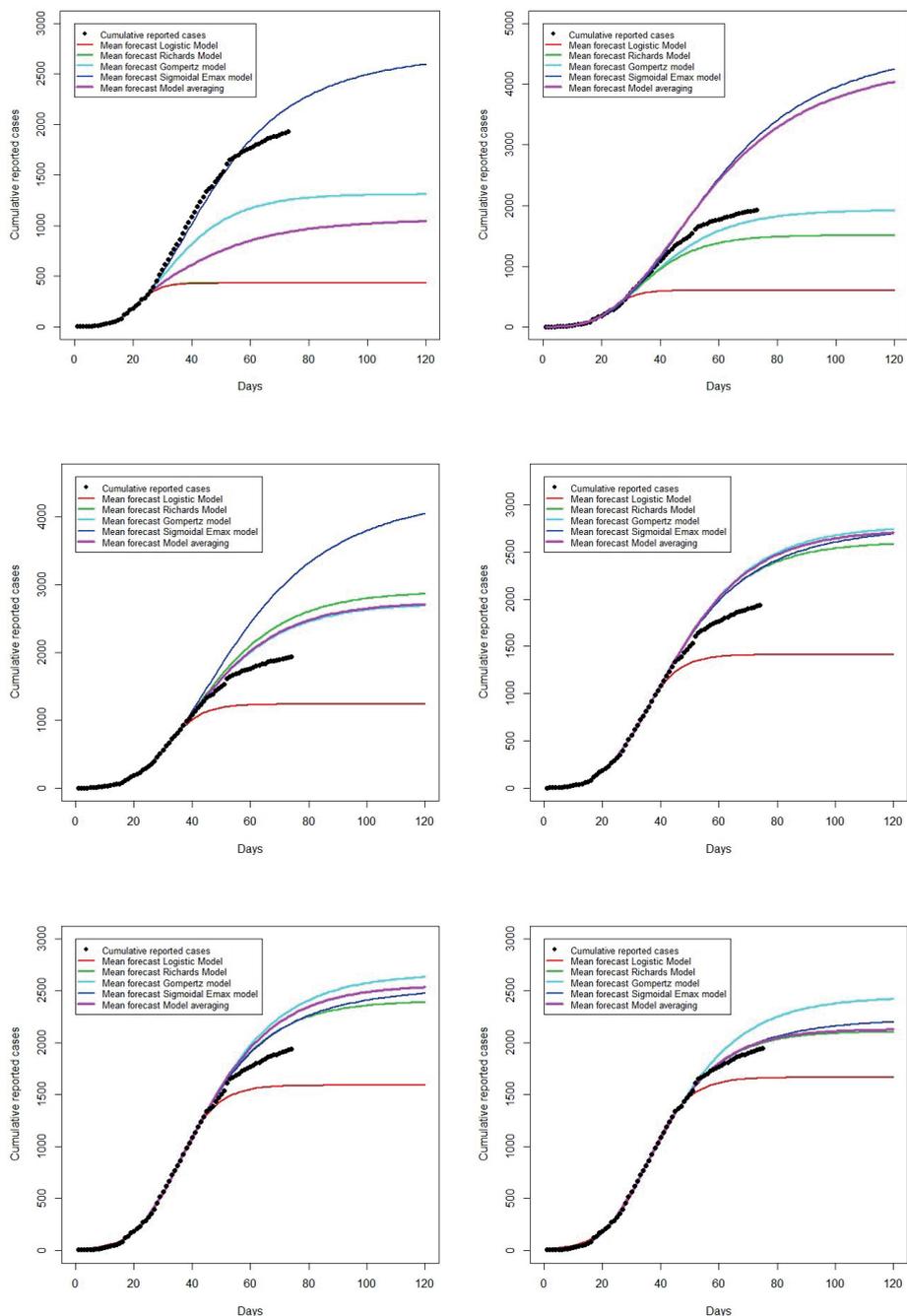


Figure 1. Simples prévisions de tous les modèles phénoménologiques et modèle moyen sur différentes périodes

Source : élaboration des auteurs.

2.2. Prévisions basées sur les modèles avec incertitude quantifiée

Nous présentons les résultats pour des prévisions de 10 jours faites le 14 avril et 24 avril 2020 pour l'épidémie de COVID-19 à Cuba à partir des estimations de modélisation avec les données apportées. La figure 2 contient les estimations du total de cas cumulatifs sur des prévisions 10 jours à l'avance pour les périodes 11/3–14/4 (figure 2 panel a) et 11/3–14/4 (figure 2 panel b), respectivement. Les prévisions à 10 jours prévoient entre 1820 et 3650 cas pour la période 11/3–14/4, et entre 1930 et 2300 cas pour l'autre période de la modélisation.

3. Discussion

Les modèles phénoménologiques sont utiles dans le contexte de données épidémiologiques limitées ou face à des épidémies déclenchées par de nouveaux pathogènes, comme SARS-CoV-2. Dans ce travail, nous avons prédit en temps réel la taille finale et le tournant de l'épidémie, et créé des prévisions 10 jours à l'avance du nombre de cas en utilisant plusieurs modèles phénoménologiques non-linéaires : Richards, 3PL, Sigmoid Emax et 4P Gompertz, où ces paramètres et prévisions sont estimés par le biais de la modélisation.

Nous défendons la technique de la modélisation car elle apporte une structure attirante de prédiction en temps réel, considérant un ensemble de modèles et l'incertitude de ceux-ci. La prédiction en temps réel est dominée par le(s) modèle(s) avec les données les mieux adaptées. De plus, les méthodes de modélisation produisent des limites d'incertitude plus réalistes pour les estimations de paramètres et les prévisions en intégrant l'incertitude dérivée d'un ensemble de modèles plausibles.

Nous avons observé que sur les diverses périodes de calibrations les estimations et prévisions étaient dominées par différents modèles phénoménologiques. Le cadre de modélisation pour la prédiction en temps réel est le plus utile car l'estimation est basée sur les modèles les plus ajustés.

Nous avons aussi noté que la prévision basée sur la modélisation, ou même sur un seul modèle, est très vulnérable, surtout pendant la première phase de l'épidémie. Tant que les données disponibles incluent le tournant et un intervalle peu de temps après, la courbe prévoyant le nombre futur de cas sera raisonnablement correcte. De plus, l'ampleur des intervalles de prédiction diminue en moyenne à mesure que des données sont ajoutées.

Dans ce travail, tous les modèles phénoménologiques considèrent une phase de croissance exponentielle précoce. Chowell, Sattenspiel et al. (2016) ont illustré l'impact d'une supposition incorrecte d'un modèle de croissance exponentielle pour caractériser une phase précoce d'épidémies de maladies infectieuses suivant

une croissance quasi-exponentielle. Dans une recherche à venir, nous étendrons cette approche de modélisation à l'utilisation de logistique généralisé et au modèle Richards.

En temps réel à court terme, les prévisions élaborées à partir de la modélisation pourraient être utiles aux responsables de la santé publique pour guider l'allocation de ressources essentielles au contrôle de l'épidémie et pour affronter des épidémies futures.

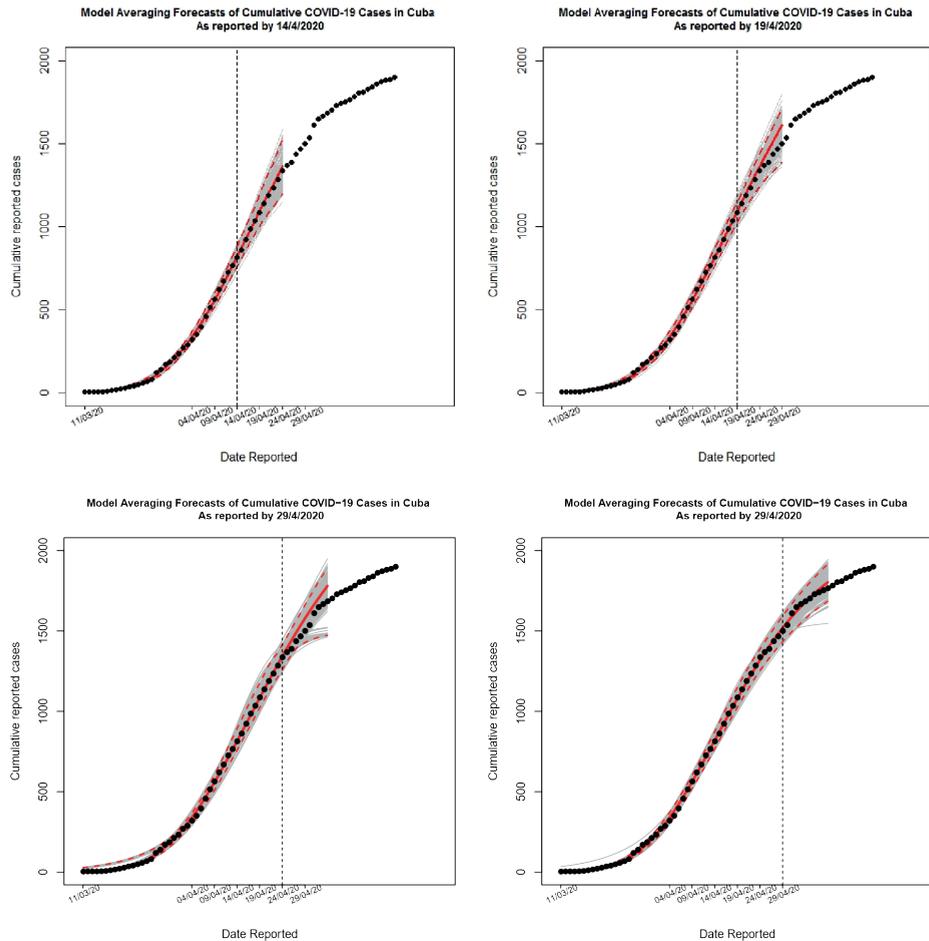


Figure 2. Prévisions de modélisation de cas de COVID-19 à Cuba 10 jours à l'avance, élaborées le 14 avril 2020 (Panel a) et le 24 avril 2020 (Panel b)

Les pointillés correspondent aux cas jusqu'au 15 mai 2020, les lignes rouges continues correspondent à la solution du modèle simple, les lignes rouges en tirets présentent 95% des intervalles de prédictions et les lignes noires verticales en tirets séparent la calibration et les périodes prévisionnelles.

Source : élaboration des auteurs.

Conclusion

Cette étude souligne l'importance des modèles phénoménologiques dynamiques dans le contexte de données épidémiologiques limitées et d'épidémies de nouveaux pathogènes. Ces modèles, tels que le modèle logistique et le modèle de Richards généralisé, se sont révélés être des outils précieux pour prédire l'incidence des cas confirmés, en particulier lors d'épidémies de maladies causées par des agents pathogènes inconnus, comme le SARS-CoV-2.

La flexibilité et l'adaptabilité des modèles phénoménologiques dynamiques sont mises en évidence, car ils permettent d'étudier et de caractériser des modèles de croissance plus complexes qui ne peuvent pas être expliqués par des modèles plus traditionnels. Cela est essentiel pour améliorer la précision des prévisions et mieux comprendre l'évolution d'une épidémie à mesure que l'on dispose de plus de données épidémiologiques.

L'utilisation de données épidémiques de plus en plus nombreuses pour calibrer ces modèles est une stratégie efficace, car elle améliore la capacité de prévision et fournit des informations précieuses sur l'évolution de l'épidémie dans le temps.

Toutefois, ces modèles de croissance phénoménologique ne conviennent que pour représenter des épidémies avec un seul pic, ce qui peut limiter leur applicabilité dans des situations où les épidémies ont des trajectoires de transmission plus complexes. Pour traiter ces cas, il est suggéré d'utiliser l'approche du modèle sous-épidémique, qui permet d'estimer les paramètres de transmission et de prévoir des trajectoires épidémiques plus réalistes.

Enfin, il est souligné que les prévisions à court terme dérivées des modèles phénoménologiques peuvent constituer un outil précieux pour les décideurs en matière de santé publique. Ces prévisions fournissent des informations essentielles pour allouer efficacement les ressources et prendre des décisions stratégiques afin de contrôler et de répondre aux épidémies de maladies infectieuses actuelles et futures.

Dans l'ensemble, cette étude met en évidence la valeur et le potentiel des modèles phénoménologiques dynamiques en tant qu'outils fondamentaux pour prédire et comprendre les épidémies, mais reconnaît également l'importance d'explorer d'autres approches pour faire face à des épidémies plus complexes et à divers scénarios épidémiologiques.

References

- Burnham, K., & Anderson, D. (2004). Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods Research*, 33(2), 261–304. <https://doi.org/10.1177/0049124104268644>

- Chowell, G. (2017). Fitting dynamic models to epidemic outbreaks with quantified uncertainty: A primer for parameter uncertainty, identifiability, and forecasts. *Infectious Disease Modelling*, 2(3), 379–398. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2017.08.00>
- Chowell, G., Hincapie-Palacio, D., Ospina, J., Pell, B., Tariq, A., Dahal, S., Moghadas, S., Smirnova, A., Simonsen, L., & Viboud, C. (2016). Using phenomenological models to characterize transmissibility and forecast patterns and final burden of Zika epidemics. *PLOS Currents*, 8, <https://doi.org/10.1371/currents.outbreaks.f14b2217c902f453d9320a43a35b9583>
- Chowell, G., Sattenspiel, L., Bansal, S., & Viboud, C. (2016). Mathematical models to characterize early epidemic growth: A review. *Physics of Life Reviews*, 18, 66–97. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2016.07.005>
- Chowell, G., & Viboud, C. (2016). Is it growing exponentially fast?—Impact of assuming exponential growth for characterizing and forecasting epidemics with initial near-exponential growth dynamics. *Infectious Disease Modelling*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2016.07.004>
- Chowell, G., Viboud, C., Simonsen, L., & Moghadas, S. M. (2016). Characterizing the reproduction number of epidemics with early subexponential growth dynamics. *Journal of The Royal Society Interface*, 13(123), 1–12. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0659>
- Claeskens, G., & Hjort, N. L. (2008). *Model selection and model averaging*. Cambridge University Press.
- Hsieh, Y. (2015). Temporal course of 2014 Ebola virus disease (EVD) outbreak in West Africa elucidated through morbidity and mortality data: A tale of three countries. *PLOS ONE*, 10(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140810>
- Hsieh, Y. (2017). Temporal patterns and geographic heterogeneity of Zika virus (ZIKV) outbreaks in French Polynesia and Central America. *PeerJ*, 5, e3015. <https://doi.org/10.7717/peerj.3015>
- Hsieh, Y., Arazoza, H., & Lounes R. (2013). Temporal trends and regional variability of 2001–2002 multiwave DENV-3 epidemic in Havana City: Did Hurricane Michelle contribute to its severity? *Tropical Medicine and International Health*, 18(7), 830–838. <https://doi.org/10.1111/tmi.12105>
- Hsieh, Y., Huang, H., Lan, Y. (2016). On temporal patterns and circulation of influenza virus strains in Taiwan, 2008–2014: Implications of 2009 pH1N1 pandemic. *PLOS ONE*, 11(5), e0154695. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154695>
- Ma, J., Dushoff, J., Bolker, B., & Earn, D. (2014). Estimating initial epidemic growth rate. *Bulletin of Mathematical Biology*, 76, 245–260. <https://doi.org/10.1007/s11538-013-9918-2>
- Richards, F. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290–301. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
- Roosa, K., Lee, Y., Luo, R., Kirpich, A., Rothenberg, R., Hyman, J., Yan, P., & Chowell, G. (2020a). Real-time forecasts of the COVID-19 epidemic in China from February 5th to February 24th, 2020. *Infectious Disease Modelling*, 5, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.02.002>
- Roosa, K., Lee, Y., Luo, R., Kirpich, A., Rothenberg, R., Hyman, J., Yan, P., & Chowell, G. (2020b). Short-term forecasts of the COVID-19 epidemic in Guangdong and Zhejiang, China: February 13–23, 2020. *Journal of Clinical Medicine*, 9(2), 596. <https://doi.org/10.3390/jcm9020596>

- Sebrango-Rodríguez C. R., Martínez-Bello, D. A., Sánchez-Valdés, L., Thilakarathne, P. J., Del Fava, E., Van Der Stuyft, P., López-Quílez, A., & Shkedy, Z. (2017). Real-time parameter estimation of Zika outbreaks using model averaging. *Epidemiology and Infection*, *145*(11), 2313–2323. <https://doi.org/10.1017/S0950268817001078>
- Wang, X., Wu, J., & Yang, Y. (2012). Richards model revisited: Validation by and application to infection dynamics. *Journal of Theoretical Biology*, *313*, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.07.024>

Alain REDSLOB

Professeur émérite à l'Université Panthéon Assas (Paris 2)
Président de l'AIELF

L'Association Internationale des Economistes de Langue Française (AIELF) réunit des économistes sans parti pris, respectueux des convictions de celles et de ceux qui les portent. Fusion d'une diversité culturelle dans le creuset d'une communauté d'intérêt, elle rassemble universitaires, chercheurs et hommes de culture qui réfléchissent, coopèrent et diffusent une pensée économique vivée à la passion de la langue de Molière.

Vaste est sa mission. Parce qu'elle instaure, élargit et renforce des liens culturels aux fins de propager notre discipline, dans son aspect humain, institutionnel et formel. Parce qu'elle participe au rayonnement de la recherche, favorise l'élévation des niveaux d'éducation et incite les jeunes à s'investir. Parce qu'en écartant toute pompe, elle encourage le rapprochement des peuples en densifiant des échanges propres à la compréhension de cultures si diverses.

Aujourd'hui, les difficultés abondent, les défis se multiplient, les solutions tardent. À vrai dire, l'économie politique se trouve contrainte d'explorer des champs dont l'étendue grandissante n'a de cesse de le disputer à une aridité parfois inquiétante. Aussi, avec l'ardeur qui nous anime, valorisons nos connaissances, suscitons des confrontations d'opinions, propageons des idées neuves, tout en portant haut les couleurs de ce si beau langage qui est le nôtre.

La Revue Internationale des Economistes de Langue Française (RIELF) ambitionne de prendre sa juste part à cet élan avoué et prometteur.

Prof. dr hab. Maciej ŻUKOWSKI

Recteur de l'USEGP

L'Université des Sciences Economiques et de Gestion de Poznań est l'une des écoles d'économie et d'affaires les plus anciennes et les plus prestigieuses de Pologne. Depuis 1926, nous développons continuellement l'enseignement supérieur et garantissons des études scientifiques de haute qualité et un développement constant des infrastructures de recherche. Nous préparons de nombreux expertises économiques et réalisons des projets innovants. Une éducation de haute qualité, que nous offrons depuis des années, permet à nos étudiants et diplômés de relever avec succès les défis d'un marché du travail dynamique.

L'innovation de nos méthodes de recherche et d'enseignement a été confirmée par de nombreux classements et réalisations de nos étudiants et employés. Nous combinons notre souci de la meilleure qualité d'enseignement avec le développement de la coopération avec d'autres pays et des pratiques commerciales largement définies.

Dr Claudio RUFF ESCOBAR

Recteur de l'Université Bernardo O'Higgins, Chili

L'Université Bernardo O'Higgins (UBO), de Santiago du Chili, est une fondation sans but lucratif, de droit privé, accréditée par la Commission Nationale d'Accréditation (CNA-Chile), pour sa qualité académique, sa gestion et sa politique en matière de relations extérieures avec la Société. Comptant près de 7.000 étudiants répartis sur quatre facultés offrant des programmes de niveaux Licence, Master et Doctorat, ainsi que des départements et centres de recherche, l'Université a pour axe stratégique de développer l'excellence académique et consolider sa politique d'internationalisation, vecteur de croissance académique et culturelle pour toute la communauté universitaire. Cette stratégie est d'ailleurs distinguée par les ranking internationaux (Scimago et Times Higher Education (THE), et régionaux (Revue América Economía), notamment sur les axes de Recherche et d'ouverture à l'international.

L'Université Bernardo O'Higgins compte plus de 125 accords de coopération internationale, parmi lesquels, nombreux sont célébrés avec des pays francophones, cherchant à promouvoir la Francophonie comme axe stratégique d'internationalisation se positionnant ainsi comme l'Université chilienne la plus engagée dans cette vocation tant sur plan académique, que culturel et linguistique. Depuis 2018, l'UBO est membre actif de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF). Dans ce contexte, l'adhésion au prestigieux réseau de l'AIELF, et l'organisation de son 61^e Congrès à Santiago du Chili en mai 2019, contribuent largement à enrichir cette vision et au rayonnement de la francophonie en Amérique Latine.

Note aux lecteurs : Les textes à soumettre sont à adresser en version électronique à l'adresse de la revue RIELF Krzysztof.Malaga@ue.poznan.pl

Le « guide de soumission » est disponible auprès de site officiel de la RIELF <http://rielf.aielf.org> ou bien sur le site de l'AIELF : <http://www.aielf.org>

