

Propagation de la covid-19 en Côte d'Ivoire : une simulation à partir du logiciel MATLAB

Spread of covid-19 in Ivory Coast : a simulation using MATLAB software

FOFANA Moustapha
Enseignant chercheur
Université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire

Date de soumission : 19/12/2023

Date d'acceptation : 02/02/2024

Pour citer cet article :

FOFANA.M. (2024) « Propagation de la covid-19 en Côte d'Ivoire : une simulation à partir du logiciel MATLAB », Revue Française d'Economie et de Gestion «Volume 5 : Numéro 2 » pp : 132 – 143.

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License



Résumé

Dans cet article, nous présentons un modèle épidémiologique conceptuel qui permet de mieux comprendre la propagation de la COVID-19 en Côte d'Ivoire. Le modèle mathématique S.I.R et quelques-unes de ses variantes sont utilisés pour prédire l'évolution de l'épidémie. Ce modèle permet de comprendre les mesures préconisées par le Gouvernement ivoirien (l'isolement du grand Abidjan, le couvre-feu, les campagnes de sensibilisation sur le respect de la distanciation sociale...) pour réduire le taux de reproduction de la maladie.

Mots clés : modèle SIR ; covid-19 ; épidémie ; crise sanitaire ; Côte d'Ivoire

Abstract

In this article, we present a conceptual epidemiological model that allows us to better understand the spread of COVID-19 in Côte d'Ivoire. The S.I.R mathematical model and some of its variants are used to predict the evolution of the epidemic. This model makes it possible to understand the measures recommended by the Ivorian Government (the isolation of greater Abidjan, the curfew, awareness campaigns on respecting social distancing, etc.) to reduce the reproduction rate of the disease.

Keywords : SIR model ; covid-19 ; epidemic ; health crisis ; Côte d'Ivoire

Introduction

A l'instar des autres continents, l'Afrique est confrontée à une crise sanitaire, sans précédent, faisant de nombreuses victimes. En sus, les mesures prises pour endiguer la propagation de la COVID-19 ont perturbé la production et réduit la demande mondiale. Elles ont aussi entraîné l'effondrement de la croissance économique mondiale et la baisse des cours des produits. Ainsi, selon le Fonds Monétaire International (FMI), une contraction de 1,6% est attendue en Afrique subsaharienne. En Côte d'Ivoire, depuis la détection du premier cas le 11 mars 2020, le nombre de personnes infectées n'a cessé d'augmenter obligeant nos autorités compétentes à prendre des mesures pour atténuer la propagation du virus. Parmi les mesures adoptées et mises en œuvre par les autorités ivoiriennes figurent : (i) l'instauration du couvre-feu nocturne, (ii) l'isolement sanitaire du grand Abidjan, (iii) la fermeture des frontières terrestres, maritimes et aériennes, (iv) l'interdiction des événements et des réunions de plus de 50 personnes, (v) la fermeture des restaurants et des espaces de loisirs et fermeture des écoles, (vi) l'imposition des règles de distanciation sociale, (vii) et la réduction des horaires de travail.

Par ailleurs, la crise du Coronavirus (COVID-19) a mis en exergue le rôle des modèles à compartiment dans la compréhension, l'analyse et l'anticipation de la dynamique d'une épidémie. Dans cet article, nous allons utiliser le modèle S.I.R (Sains, Infectieux et Rétablis) pour prédire l'évolution de la maladie en Côte d'Ivoire. En effet, les modèles SIR occupent une place prépondérante dans la compréhension du coronavirus car les malades guéris de la Covid-19 sont immunisés contre cette maladie (Satsuma et al., 2004 ; Bacaër, 2011). En outre, ce modèle a été usité par plusieurs chercheurs pour prédire le taux de mortalité et de guérison de la population. L'on peut citer à titre d'exemple, Anatassopoulou et al. (2020) qui ont travaillé sur la province de Wuhan en Chine et Moein et al., (2021) qui ont stimulé l'épidémie dans la province d'Ispahan en Iran.

La modélisation par des équations différentielles peut être appliquée car la population de personnes saines, contaminées et guéries change dans le temps et l'espace. Dès lors, il convient de se demander comment modéliser la propagation de la Covid-19 en Côte d'Ivoire ? Notre article se scinde en deux sessions : la première traite de l'impact de la covid-19 sur l'économie ivoirienne et la seconde du modèle SIR appliqué à la Côte d'Ivoire.

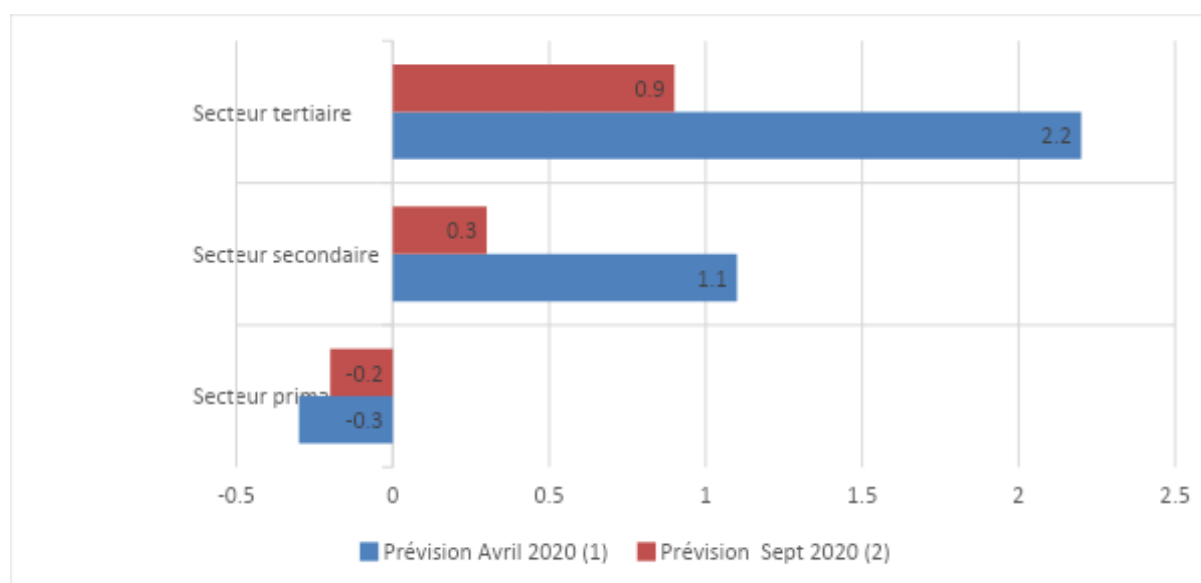
1. L'impact de la Covid-19 sur l'économie ivoirienne

L'analyse des effets du COVID-19 sur les secteurs d'activités permet d'observer que les conséquences économiques et financières du COVID-19 ont été de plusieurs ordres et variaient significativement selon l'activité. En effet, au regard de son caractère inédit, singulier et

planétaire, la crise du COVID-19 a éprouvé durement les entreprises la quasi-totalité des secteurs économiques et leurs organisations professionnelles. C'est ainsi que, selon les organisations professionnelles d'entreprises, tous les secteurs ont été impactés, d'une manière ou d'une autre dans des proportions différentes (CCR-UEMOA, 2020).

Dans le tableau ci-dessous, nous constatons que le secteur tertiaire en paye lourdement le prix de la pandémie à COVID-19 suivi par le secteur secondaire.

Graphique 1 : Contributions à la croissance du PIB en période de la COVID-19 (2020).



Source : MEF/DGE/DPPSE/INS.

Dans la zone UEMOA, en cette période de COVID-19, l'emploi a connu une baisse d'ensemble de l'ordre de 25% selon les organisations professionnelles d'entreprises (CCR-UEMOA, 2020). Cette baisse, si elle semble faible dans l'ensemble par rapport aux effets attendus du COVID-19, s'expliquerait par les contraintes en matière de licenciement, le sentiment de confiance des entreprises à une reprise prochaine rapide des activités, le choix d'éviter les coûts de rotation et ceux liés à d'éventuels nouveaux recrutements.

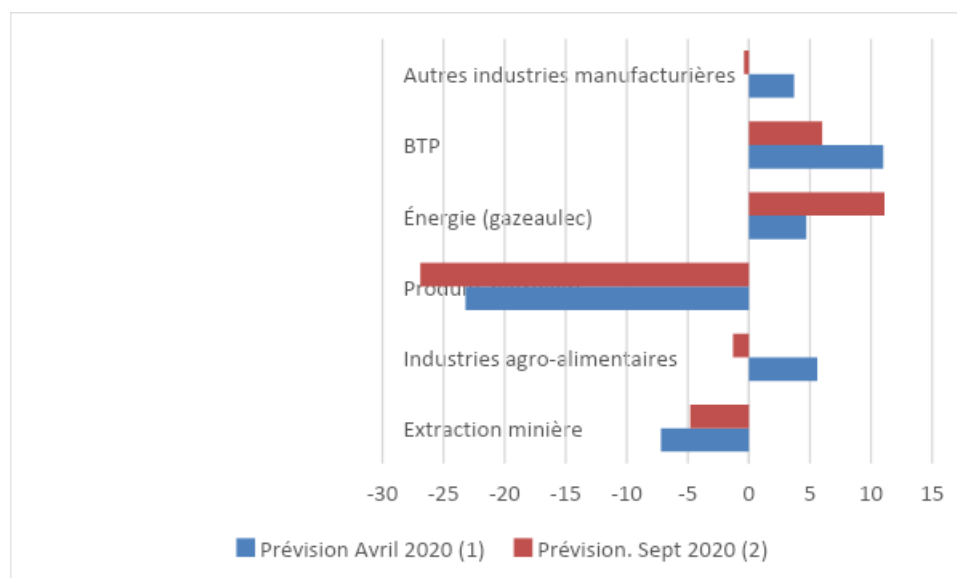
Au niveau du secteur primaire, les risques de pénurie de travailleurs saisonniers pouvant entraîner des récoltes partielles des productions et l'insuffisance de main d'œuvre pour la création et l'entretien des plantations en sont quelques facteurs explicatifs.

Concernant spécifiquement la noix de cajou, sa demande est fortement tributaire des importations du Vietnam et de l'Inde qui sont à ce jour des pays affectés par le COVID-19. Cette situation pourrait fortement entraver la campagne et contraindre les réalisations annuelles.

S'agissant du cacao, les ventes à terme devraient permettre d'échapper au risque de mévente. Toutefois, si les entreprises se trouvent face à une baisse de demande mondiale de produits chocolatés, les impacts pourraient se ressentir sur le respect des engagements contractuels. Cette situation pourrait rendre difficile le respect du prix garanti bord champ aux producteurs et affecter le bien-être des paysans (MEF, 2020).

En Côte d'Ivoire, dans l'industrie, les secteurs d'activités les plus impactées par la pandémie à COVID-19 sont respectivement l'agro-industrie, le BTP, les autres industries manufacturières et les produits pétroliers.

Graphique 2 : Contributions à la croissance du PIB en période de la COVID-19, du secteur secondaire (2020).



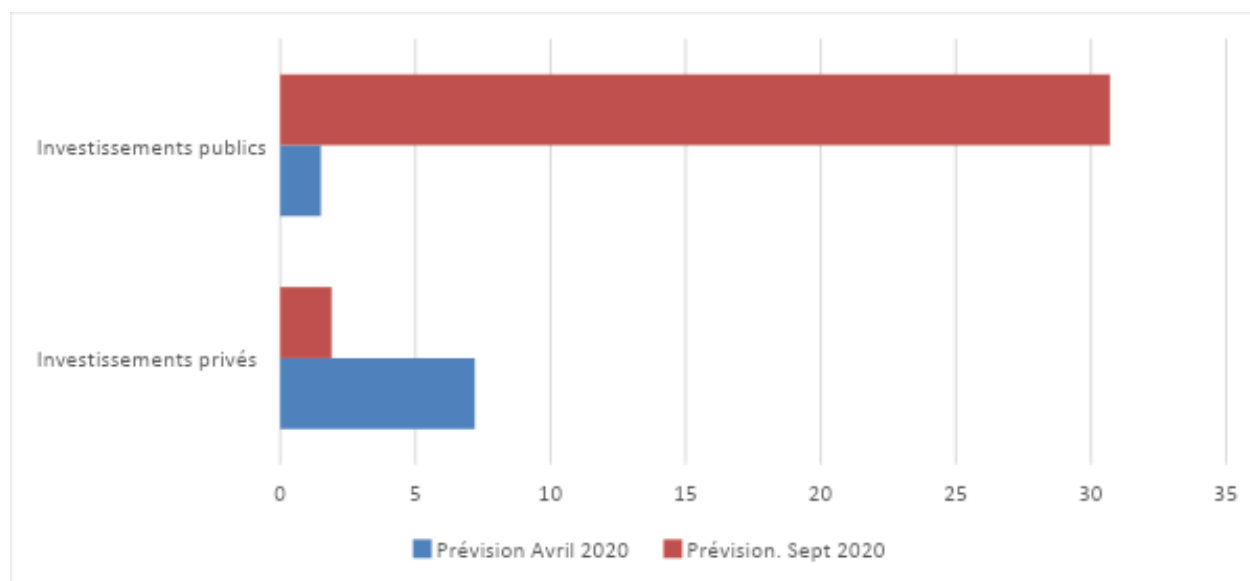
Source : MEF/DGE/DPPSE/INS.

Ce secteur subit les effets de la rupture des circuits/ perturbation d'approvisionnement en matières premières, de la diminution des volumes importés des matières premières du fait du confinement des populations des principaux pays fournisseurs, de la mise en hibernation de certains marchés publics du fait de la situation de crise, des mesures de restrictions sur les regroupements de personnels et des investissements dans les équipements de protection. L'industrie du Pétrole, quant à lui subit les effets de la baisse des cours sur le marché international.

Au niveau des emplois, grâce aux plans de soutien du gouvernement Ivoirien, les industriels ont en majorité maintenu les emplois malgré les conditions difficiles qu'elles traversent. Les pertes d'emplois ont été plus observées dans le secteur du BTP en raison des mesures de distanciation sociale à observer sur les chantiers.

En ce qui concerne l'investissement dans le secteur industriel, la conjoncture économique n'est pas favorable au maintien du niveau des investissements prévus en début d'année. Ainsi, rare sont les industriels qui ont maintenu leur niveau d'investissement en raison des engagements en cours tandis que nombreux d'entre eux préféreraient reporter les investissements.

Graphique 3 : les investissements opérés en période de COVID-19 (2020)



Source : MEF/DGE/DPPSE

En somme, l'analyse de l'impact de la covid-19 sur l'économie réalisée par le ministère de l'économie et des finances de la Côte d'Ivoire en Avril 2020 a montré que les sous-secteurs ou branches d'activités les plus affectées par la crise sont l'agriculture d'exportation/industrielle (-14,28%), la pêche (-18,24%), la fabrication des textiles, habillement et travail du cuir (-14,96%), le commerce (-11,96%), les activités d'hébergement et de restauration (-19,99%), les transports et communications (-14,47%), les activités financières (-16,15%), les autres services (-14,10%).

En termes de montant, cela représente pour le commerce (-217,4 milliards), les autres services y compris l'hôtellerie et le tourisme (-247,9 milliards), le transport (-116,1 milliards), le BTP (-126 milliards), les industries manufacturières (-106,5 milliards) et l'extraction minière (-25,5 milliards), l'énergie (-17,8), produits pétroliers (-8,7 milliards), les télécommunications (-5,8 milliards), l'agriculture d'exportation (-3,5 milliards).

2. Le modèle

La prédiction des épidémies à l'aide de la modélisation mathématique a commencé en 1760, avec les travaux de Bernoulli qui visaient à évaluer l'efficacité de l'inoculation contre la variole.

Toutefois, l'un des modèles fréquemment utilisé, pour prédire la propagation d'un virus dans une population donnée est connu sous le nom de modèle S.I.R. Ce modèle a été développé en 1927 par Kermack et McKendrik, pour décrire la transition entre des populations d'individus Sains (S), Infectieux (I) et Rétablis (R) dans le cadre d'une étude sur la propagation de la grippe espagnole en 1918. Dubey et al., (2015) montrent que le modèle SIR comporte deux points d'équilibre (l'équilibre sans maladie et l'équilibre endémique). Mohajan (2021) développe un modèle SIR qui met l'accent sur la vaccination pour réduire la propagation de la maladie en indiquant le nombre de personnes qui doivent être vaccinées pour créer une immunité collective.

Notre modèle inspiré de celui de Kermack et McKendrik (1927) considère une population de taille fixe qui est divisée en trois groupes de personnes : le groupe des sains, le groupe des infectés et le groupe des guéris. Les individus « Susceptibles » ne sont pas immunisés contre l'agent contagieux. Les individus « Infectieux » sont infectés et, sans être nécessairement malades, peuvent contaminer d'autres individus « Susceptibles ». Les individus « Rétablis » sont immunisés contre la maladie après l'avoir combattue. Chacune de ces trois populations est variable au cours du temps. De plus, les auteurs de ce modèle considèrent l'effectif de la population totale N constant d'où $S(t) + I(t) + R(t) = N$.

La taille des personnes saines qui quittent le compartiment S pour le compartiment R est le produit de trois quantités à savoir : le nombre de susceptibles $S(t)$, la part de la population qui est déjà infectieuse $\frac{I(t)}{N}$ et d'un coefficient (le taux d'incidence) β qui dépend d'une multitude de paramètres (la durée et les conditions de vie de l'agent pathogène, les comportements sociaux de la population...).

Ainsi, on passe de S à I par un mécanisme contrôlé β et on passe de I à R par un autre mécanisme contrôlé λ . Ce paramètre λ est égal à l'inverse du temps moyen (T) nécessaire à une personne contaminée pour cesser d'être infectieuse.

Un autre paramètre, très important pour la compréhension de l'évolution de l'épidémie, est R_0 . Le paramètre R_0 est le nombre moyen de nouveau cas que peut produire chaque personne infectée au cours de sa maladie. Il est le produit du nombre moyen de sains qu'un infecté peut contaminer en un jour et le nombre moyen de jours pendant lequel un infecté reste infectieux. Ainsi $R_0 = \beta \times T$ et l'idée des mesures prises par les gouvernements consiste à tendre R_0 vers des valeurs inférieures à 1 (c'est-à-dire annuler la transmission d'un individu à un autre).

En terme mathématique, cela se traduit par un système d'équations différentielles ordinaires (EDO) non linéaire.

$$\begin{cases} \dot{S}(t) = -\beta S(t)I(t) \\ \dot{I}(t) = \beta S(t)I(t) - \lambda I(t) \\ \dot{R}(t) = \lambda I(t) \end{cases} \quad (I)$$

Pour l'application de ce modèle à la propagation du COVID-19 en Côte d'Ivoire, nous considérons $I(t=0) = 1$, correspondant au premier cas détecté à Abidjan le 11 mars 2020. À cette date, il n'y avait pas encore de cas de guérison ou de décès. Donc, $R(t=0) = 0$ et toute la population est considérée comme des personnes susceptibles d'être contaminées avec $S(t=0) = N - I(t=0)$.

La population de la Côte d'Ivoire est de 26.453.542 en 2020, selon la projection de l'Institut National de la Statistique (INS).

L'une des difficultés de cette simulation consiste à déterminer la valeur des paramètres β et λ . En effet, les deux paramètres varient dans le temps en fonction des mesures prises par la population. Pour faire notre simulation nous allons utiliser $R_0=8$, $R_0=3$ et $R_0=1$. En outre, nous allons supposer que le temps moyen (T) nécessaire à une personne contaminée pour cesser d'être infectieuse est de quinze jours.

L'une des faiblesses du modèle S.I.R de base est qu'il ne fait pas la distinction entre les personnes décédées de la maladie et les personnes rétablies. Pour lever cette insuffisance, nous allons rajouter une équation pour caractériser le nombre de personnes infectées mortes : $D' = \gamma * I(t)$. Par ailleurs, l'équation (2) du système (I) sera corrigée en y soustrayant le terme $\gamma * I(t)$ qui s'interprète comme le nombre de personnes infectées qui sont mortes et donc qui ne peuvent plus infecter. Le taux de mortalité de la Côte d'Ivoire choisi est $\gamma = 0,0128$. Ce chiffre a été déterminé en utilisant les données de John Hopkins University du 18 mai 2020.

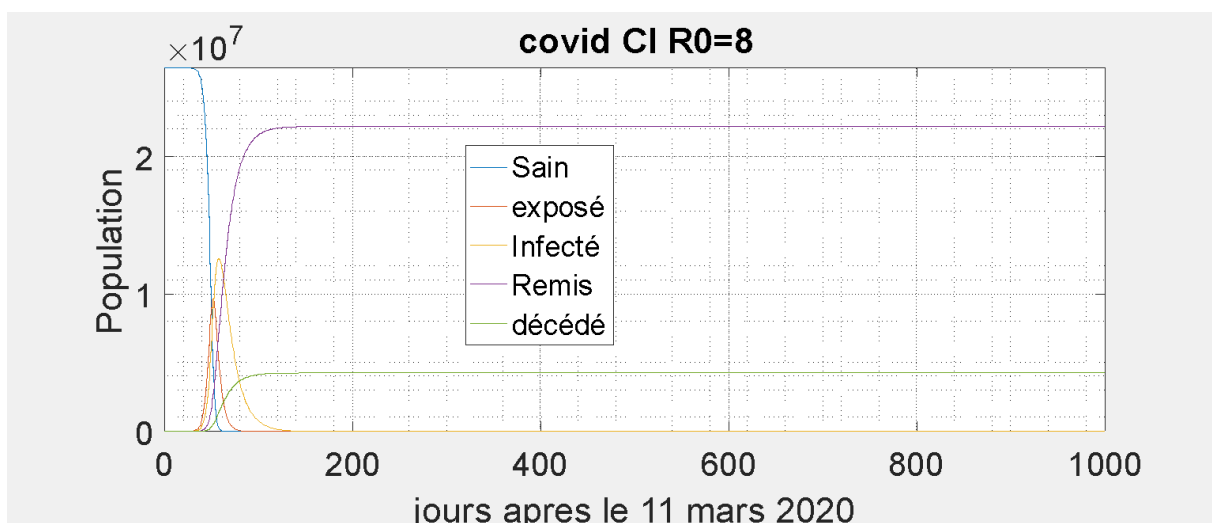
$$\begin{cases} \dot{S}(t) = -\beta S(t)I(t) \\ \dot{I}(t) = \beta S(t)I(t) - (\lambda + \gamma) I(t) \\ \dot{R}(t) = \lambda I(t) \\ \dot{D}(t) = \gamma I(t) \end{cases} \quad (II)$$

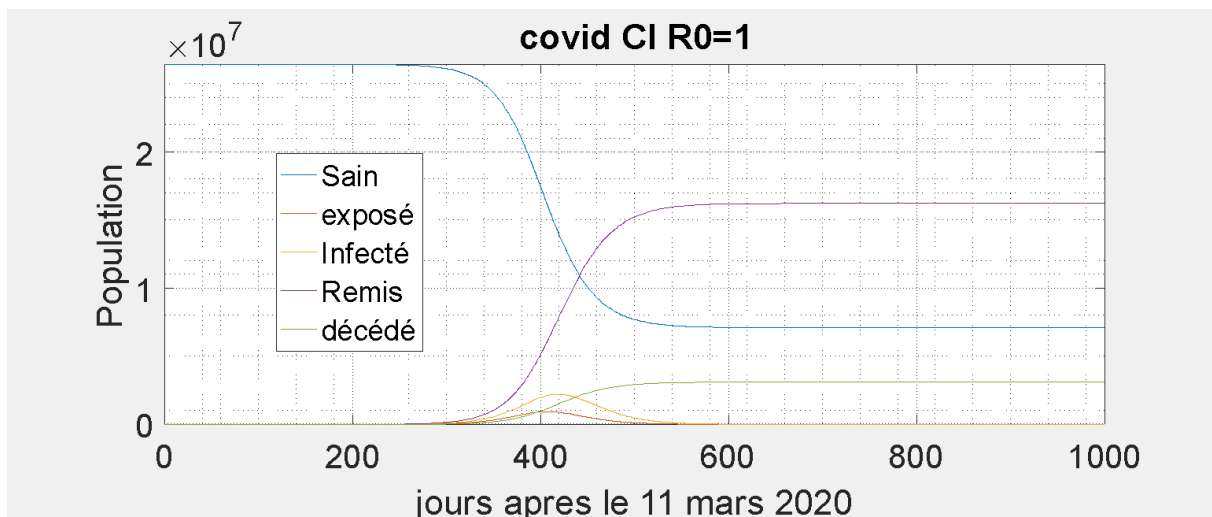
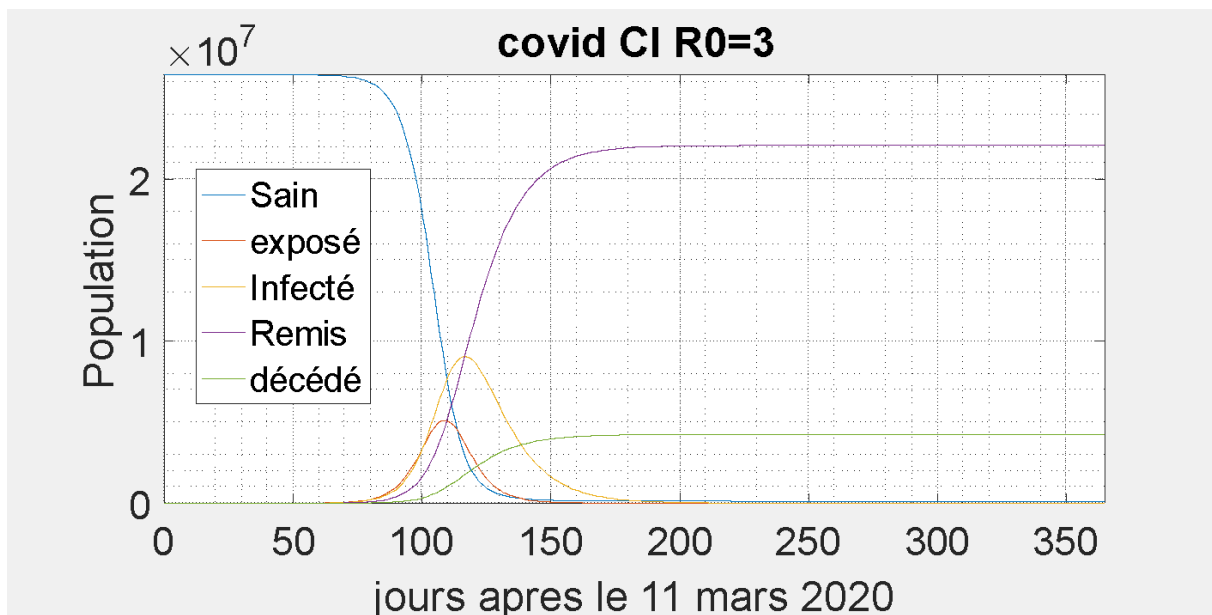
Dans le cas de la Covid 19, il serait utile d'ajouter une cinquième équation pour caractériser la population d'individus exposés à cette maladie. En effet, les personnes infectées non-infectieuses (exposés), qui ne sont donc pas encore contagieuses, sont représentées par la fonction $E(t)$. Ce qui permet de prendre en compte la durée d'incubation (via α le taux d'incubation) d'une maladie. Ainsi, le système du modèle SIR devient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}(t) = -\beta S(t)I(t) \\ \dot{E}(t) = \beta S(t)I(t) - \alpha E(t) \\ \dot{I}(t) = \alpha E(t) - (\lambda + \gamma)I(t) \\ \dot{R}(t) = \lambda I(t) \\ \dot{D}(t) = \gamma I(t) \end{array} \right. \quad (\text{III})$$

Selon le New England Journal of Medicine, la plupart des patients qui deviennent symptomatiques, ont développé les premiers signes dans les 11 ou 12 jours et la grande majorité dans les 14 jours suivant leur contamination. De plus, le temps d'incubation de la COVID-19 est de 5,1 jours. On peut donc estimer le taux d'incubation à 0,196.

La solution du système d'équations peut se présenter sous la forme d'un graphe ou à l'aide d'une résolution numérique. Dans ce dernier cas, en absence de solutions explicites, on discrétise le système en temps en utilisant la méthode d'Euler. Voici ce que nous pouvons obtenir après la résolution numérique de ce système.





On observe qu'en début d'épidémie tout le monde est susceptible, personne n'est infectée et personne n'est remise et en fin d'épidémie, après être passé par un pic épidémique, nous enregistrons plus de personnes infectées, une majorité de la population est devenue résistante et une minorité n'a toujours pas été infectée.

Pour une valeur de R_0 élevée, l'épidémie est courte et une grande partie de la population est infectée à un moment donné. Dans le cas de la Covid 19, où une part des infectées développe des symptômes graves et doit être hospitalisée, le système de santé du pays peut se retrouver rapidement saturé.

Conclusion

Cet article avait pour objectifs d'expliquer les différents concepts qui sont utilisés par les médias depuis l'avènement de la Covid-19 et d'avoir une idée de l'évolution de cette maladie en Côte d'Ivoire. Cependant, il est nécessaire de savoir lire les modélisations mathématiques de cette

pandémie. Car celles-ci s'appuient sur de nombreux coefficients, qui dépendent, entre autres, des politiques mises en place et de la manière dont elles sont suivies.

Par ailleurs, il existe des modèles mathématiques plus complexes qui prennent en compte le taux de natalité, le taux brut de mortalité, la migration, la structure par âge de la population...

BIBLIOGRAPHIE

- **Anastassopoulou, C., Russo, L., Tsakris, A. et Siettos, C.** (2020). Analyse, modélisation et prévision de l'épidémie de COVID-19 basées sur les données. PLoS ONE 15, e0230405.
- **Bacaër, N. In A** (2021). Short History of Mathematical Population Dynamics (éd. Nicolas, B.) 89-96 (Springer, Londres, 2011).
- **Banque mondiale** (2020), Évaluation de l'impact économique du covid-19 et des réponses politiques en Afrique subsaharienne Washington, D.C.
- **Banque Mondiale** (2020), Taking stock and looking ahead : Côte d'Ivoire and the COVID-19 Pandemic. Washington, D.C.
- **Cabinet du Premier Ministre**, (2020), Rapport sur l'état d'exécution du programme social du gouvernement (PSGouv) au 30 juin 2020
- **Commission de l'UEMOA.** (2020), Impact de la pandémie de COVID-19 sur le secteur privé de l'UEMOA, mai 2020 ;
- **Dubey, B., Dubey, P., & Dubey, U. S.** (2015). Dynamics of an SIR Model with Nonlinear Incidence and Treatment Rate. Applications and Applied Mathematics: An International Journal, 10(2), 718-737.
- **Institut National de la Statistique (INS) de Côte d'Ivoire.** (2020), Evaluation de l'impact de la COVID-19 sur l'activité des entreprises du secteur formel, mai 2020;
- **Institut National de la Statistique (INS) de Côte d'Ivoire.** (2020), Evaluation de l'impact de la COVID-19 sur l'activité des entreprises du secteur informel;
- **Liu, Ying & Gayle, Albert & Wilder-Smith, Annelies & Rocklöv, Joacim.** (2020). the reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus. Journal of travel medicine. 27. 10.1093/jtm/taaa021.
- **Ministère de l'économie et des finances**, (2020), Note de cadrage macroéconomique de la Côte d'Ivoire
- **Ministère de l'économie et des finances**, (2020), Plan de soutien économique, social et humanitaire en réponse à la pandémie du Covid-19

- Mohajan, H. K. (2021). Global COVID-19 Pandemic: Prevention and Protection Techniques. *Journal of Economic Development, Environment and People*, 10(1), 51-72.
- NEJM Journal Watch March 13, 2020 COVID-19 Incubation Period: An Update
- **Niko Speybroeck** (2020). La modélisation au temps du covid-19, uclouvain
- **Moein, S., Nickaeen, N., Roointan, A. et coll.** (2021). Inefficacité des modèles SIR dans la prévision de l'épidémie de COVID-19 : une étude de cas d'Ispahan. *Sci Rep* **11**, 4725.
- **Satsuma, J., Willox, R., Ramani, A., Grammaticos, B. & Carstea,** (2004). A. Extension du modèle épidémique SIR. *Phys. A* 336, 369–375.
- **Souleymane Zio, Inoussa Tougri et Bernard Lamien** (2020). Propagation du COVID-19 au Burkina Faso : Modélisation Bayésienne et Quantification des incertitudes : première approche