
IMPORTANCE DU COMPORTEMENT INDIVIDUEL DANS L'ETABLISSEMENT D'UNE STRATEGIE DE DECONFINEMENT FACE A LA COVID-19 : MISE EN PLACE D'UNE SOLUTION MOYEN-TERME PAR UNE MODELISATION MULTIDIMENSIONNELLE BIOECONOMIQUE

THESE
pour obtenir le titre de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse
par*

MOUTIER Louis
Né le 03/09/1994 à CAEN (14)

et

BORNET Rémy
Né le 14/01/1993 à NOGENT-SUR-MARNE (94)

Directeur de thèse : M. Didier RABOISSON

JURY

PRESIDENT :

M. Laurent MOLINIER

Professeur à l'Université Paul Sabatier

ASSESEURS :

M. Didier RABOISSON
Mme WARET-SZKUTA

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRE INVITE :

M. Ahmed FERCHIOU
M. Guillaume LHERMIE

Chargé d'enseignement contractuel à l'Ecole vétérinaire
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

Directeur : Professeur Pierre SANS

**PROFESSEURS CLASSE
EXCEPTIONNELLE**

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie – Thérapeutique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- Mme **HAGEN-PICARD, Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

**PROFESSEURS 1^{ère}
CLASSE**

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*

**PROFESSEURS 2^{ème}
CLASSE**

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*

Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
M. **RABOISSON Didier**, *Médecine de population et Économie de la santé animale*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie- Bactériologie-Pathologie infectieuse*
Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*
M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et Industrie des aliments*
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie – Analgésie*
M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*
Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales règlementées*
Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

CHARGES D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS

Mme **CHARTIER Camille**, *Nouveaux animaux de compagnie*
M. **FERCHIOU Ahmed**, *Economie, production animale*

Mme **MANTELLI Morgane**, *Médecine interne*
Mme **MAURIN Claire**, *Nouveau animaux de compagnie*
Mme **TOUSSAINT Marion**, *Pathologie des équidés*

ENSEIGNANTS DE PREMIERE ANNEE COMMUNE AUX ETUDES VETERINAIRES
--

M. **AUFFRET JérémY**, *Physique-Chimie*
Mme **GAUCHARD Cécile**, *Biologie-écologie-santé*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

M. **BESSIERE Pierre**, *Microbiologie infectiologie*
Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*
M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*
M. **LESUEUR JérémY**, *Gestion de la santé des ruminants – Médecine collective de précision*
M. **TOUITOU Florian**, *Alimentation animale*

Remerciements

A Monsieur le Professeur Laurent Molinier

Professeur des Universités. Praticien Hospitalier

*Département d'Epidémiologie, Economie de la Santé et Santé Publique, Université Toulouse III,
Département d'information médicale, CHU de Toulouse*

Qui nous fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse.

Hommages respectueux.

A Monsieur le Professeur Didier Raboisson

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Médecine des populations et économie de la santé animale.

Qui nous a confié ce sujet, encadré et guidé lors de l'élaboration de cette thèse,

Sincères remerciements.

A Madame le Professeur Agnès Waret-Szkuta

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Production et pathologie porcine

Qui nous a fait l'honneur d'accepter de participer à notre jury de cette thèse.

Sincères remerciements.

A Monsieur le Professeur Ahmed Ferchiou

Chargé d'enseignement et de recherches à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Médecine des populations et économie de la santé animale

Qui nous a encadré tout au long de ce travail.

Sincères remerciements

A Monsieur le Professeur Guillaume Lhermie

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Santé animale, Santé publique vétérinaire

Qui nous a encadré tout au long de ce travail.

Sincères remerciements

Table des matières

Table des figures.....	9
Table des tableaux.....	10
Liste des abréviations.....	11
Introduction.....	12
Matériel et méthodes.....	16
I. Modèle bioéconomique	16
II. Modèle épidémiologique compartimental	16
a. Scénarios de confinement et déconfinement.....	19
b. Modèle d'optimisation économique.....	21
III. Paramétrage du modèle.....	24
a. Modèle SIR	24
b Paramètres économiques	27
Résultats.....	28
I. Validation et sensibilité du modèle bioéconomique.....	28
II. Optimisation multidimensionnelle sur le long terme	31
Discussion.....	36
CONCLUSION	40
Bibliographie :	41
Annexes :	45

Table des figures

Figure 1 : Modèle compartimental.....	16
Figure 2: Frise chronologique des évènements observés ainsi que des options et scénarios simulés dans les 3 phases épidémiques de la COVID-19.....	20
Figure 3: Validation épidémiologique du modèle. Nombre quotidien de lits utilisés dans les hôpitaux	29
Figure 4 : Nombre quotidien de lits utilisés dans les hôpitaux (Les lits des unités de soins intensifs étant exclus) pour les différents scénarios (L1 à L15)	31
Figure 5: Représentation graphique de la solution optimale en fonction de la force de la contrainte appliquée sur une période de 300 jours	34
Figure 6 : Représentation graphique de la solution optimale en fonction de la force de la contrainte appliquée sur une période de 600 jours.	35

Table des tableaux

Tableau 1 : Description des catégories socio-professionnelles et des scénarios de déconfinements. 18	18
Tableau 2 : Scénarios économiques et production globale pour les 4 populations actives 21	21
Tableau 3 : Paramètres, valeurs, et sources pour définir le modèle bio-économique 25	25
Tableau 4 : Matrice de contact (valeur de $Contact_{Pop_i * Pop_j, Init}$) pour les différentes populations 26	26

Liste des abréviations

D : individu décédé

E : individu exposé

E_k : correspond au scénario économique numéroté « k »

H : les cas graves admis à l'hôpital mais pas en soins intensifs

Ia : infecté asymptomatique

Ims : infecté avec symptômes modérés

Ip : infecté en phase prodromique

Ips : infecté paucisymptomatique

Iss : infecté avec symptômes graves

ICU : les cas les plus graves admis en unité de soins intensifs

L_j : correspond au scénario numéroté « j »

O_i : correspond à l'option numérotée « i »

R : individu rétabli

REc : individu rétabli avec activité économique

REp : individu rétabli sans activité économique

S : individu sensible

Tr : Taux de transmission

Introduction

La COVID-19 a engendré un changement de paradigme vis-à-vis de notre société et de notre système de santé. Depuis quelques décennies, nous avons réussi à restreindre la propagation des épidémies en termes de localisation et de durée, ce qui fait de la COVID-19 une nouvelle entité épidémiologique (1).

Début 2020, face à l'arrêt net de l'économie française, une première étude (34) mettait en lumière l'intérêt d'une approche holistique et empirique de la question. Pour cela il convient donc de prendre en compte une combinaison de facteurs de risques et de paramètres bioéconomiques en incluant les comportements des citoyens. En effet cette approche est essentielle pour comprendre la situation inédite engendrée par la pandémie, c'est-à-dire, vivre avec cette maladie qui perturbe nos libertés individuelles et nos comportements. Les enjeux des dirigeants consistent à définir la méthode de déconfinement qui correspondra le mieux à la reprise de l'activité économique, le bien-être social et l'endigement de la pandémie. Cependant il n'existe pas de méthode simple pour prendre en compte simultanément divers objectifs opposés tout en adaptant continuellement les stratégies et les règles à la situation. Ainsi nous avons proposé un cadre pour la création d'une politique de santé précise et basé sur les faits qui considère simultanément les questions de santé publique, d'économie et de bien-être sociétal. Ce cadre est basé sur les quatre principes suivants : intégrer des informations multiples et hétérogènes, accepter et prendre en compte l'incertitude, ajuster de manière dynamique la stratégie grâce à des mécanismes de rétrocontrôle et gérer les clusters grâce à une conception multi-scalaire. Ces rétrocontrôles ont été configuré à partir d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs pour espérer obtenir une méthode de gestion précise et ainsi éviter de potentiels chocs politiques et sociaux (34) (annexe 1).

Mi-2020 nous nous sommes rendus compte qu'éradiquer la COVID-19 ne semblait pas réalisable, du moins à court terme, dans un contexte où la vaccination n'était pas disponible avant plusieurs mois. Les défis des dirigeants consistaient alors à mettre en place une approche pour contenir au mieux l'épidémie, limiter le nombre de morts et empêcher l'épuisement du personnel soignant tout en atténuant l'impact sur l'économie du pays et sur le bien-être de la population (2). Cela implique de considérer conjointement divers objectifs potentiellement opposés tout en adaptant continuellement la stratégie et les règles en fonction des avancées

réalisées sur le sujet, tel que proposé précédemment (34). Nous sommes donc devant un problème d'optimisation économique dynamique où interviennent de nombreuses contraintes dans un environnement en perpétuelle évolution. L'optimisation bioéconomique séquentielle peut aider à trouver la meilleure solution à moyen terme en établissant un compromis entre différents paramètres qui sont pour la plupart opposés. Ainsi, les modèles épidémiologiques et bioéconomiques apportent un contexte scientifique sur la base d'éléments concrets dans l'élaboration de mesures qui vont influencer la société, l'économie et la santé publique.

Les contraintes engendrées par la COVID-19 sont liées, d'une part par les caractéristiques intrinsèques de l'épidémie (paramètres épidémiologiques, sévérité de l'infection) et d'autre part par la structure des systèmes de santé (nombre de lits disponibles au sein des hôpitaux, facilité d'accès aux tests, personnel soignant) (3-7). Les contraintes économiques vont souvent prendre le pas sur les contraintes biologiques dès lors que la crise se prolonge dans le temps et plus spécifiquement lorsque la maladie devient endémique. La reprise économique et la diminution de qualité de la santé publique nous pousse à nous interroger sur le rapport coût-efficacité des mesures et leur acceptation par les individus dans la mise en place d'un compromis entre la reprise des activités et la sécurité sanitaire (8-10). De plus, les dirigeants doivent prendre en compte les incertitudes biologiques liées à l'émergence d'un nouveau virus (traitement, disponibilité d'un vaccin, durée de l'immunité, rechutes) et les incertitudes économiques (impact d'un confinement ayant engendré un choc à grande échelle et résilience du système socio-écologique), d'autant que l'incertitude est très difficile à gérer par les citoyens comme par les hommes politiques. Cette situation va donc justifier l'élaboration d'une gestion adaptable à court, moyen et long terme.

Sans prendre en compte la situation sociodémographique de chacune des nations, la gestion des confinements et déconfinements est très variable selon les pays. Jusqu'à la mi-2020, les stratégies adoptées sur le court et moyen terme ont privilégiées la santé publique tout en prenant en compte les contraintes économiques et sociétales (tel que le bien-être individuel). Les stratégies sur le moyen et sur le long terme vont sûrement être amenées à évoluer pour certains pays qui avaient initialement privilégié la santé (confinement strict). Tout cela dans le but de limiter les conséquences économiques et psychologiques potentiellement engendrées par la stratégie initiale. D'autres pays, ayant choisis de ne pas imposer un confinement strict en

première stratégie, devront peut-être revoir leurs stratégies et faire face à de grandes tensions politiques.

Une publication récente (11) a permis d'identifier les 5 facteurs clés qui ont entraînés une diminution de l'activité économique : les pertes directes dues aux décès et aux infections, les pertes liées aux mesures restrictives mises en place par les gouvernements (confinement, restrictions des libertés individuelles), les pertes dues à une diminution de la consommation des foyers, les pertes liées au ralentissement de la production et des échanges et enfin les pertes liées à la peur qui a empêché un retour à la normale rapide (11). Les limites de certaines études sur le sujet par rapport à l'incertitude prise en compte et par rapport au fait que leur pertinence diminuait inexorablement avec le temps ont été mises en évidence dans la publication de Gollier (12). Les études macroéconomiques se focalisant sur les problématiques internationales et nationales cherchent à évaluer les anciens et/ou les futurs impacts de la pandémie (13-16). Elles apportent ou non des solutions ou des suggestions pour essayer d'atténuer les futures conséquences (17). D'autres études économiques se focalisent sur les stratégies des entreprises pour limiter les impacts de la crise, elles ont tendance à sous-estimer les impacts sur la santé mentale (18). Les études sociologiques et psychologiques basées sur l'observation ou sur des stimulations tendent à amplifier l'efficacité des mesures sur le changement de comportement individuel et la modification de la dynamique de l'épidémie (19-21).

Quelques études bioéconomiques (22, 23) ont traité des compromis qui existent entre les alternatives pour contrôler la COVID-19 comme l'attente d'un vaccin, le développement d'une immunité collective, les gestes barrières et plus généralement toutes les interventions non médicamenteuses. Il est intéressant de noter que peu d'études bioéconomiques ayant une approche à la fois économique et sociologique qui prend en compte plusieurs critères de décisions sont disponibles pour la COVID-19. Une politique de confinement optimisé a été proposée en Inde utilisant un apprentissage renforcé (24).

Une stratégie de déconfinement ciblé pourrait aider à atteindre plusieurs objectifs simultanément en trouvant un compromis entre les questions économiques, sociétales et de santé publique (2). Nous proposons une application empirique d'une telle approche d'optimisation économique. En prenant l'exemple de la quatrième ville la plus peuplée de France : Toulouse, nous avons modélisé différents scénarios de déconfinement à appliquer mi-

2020 pour évaluer la meilleure stratégie à long terme et mettre en évidence les mesures sur lesquelles il faut se focaliser afin de limiter au maximum les impacts à long-terme.

Cette modélisation a pour but d'être une preuve de concept de l'utilité des approches multicritères dans la décision politique et elle ne vise pas à se substituer aux instances officielles françaises de simulation et de conseil en matière de santé publique.

Matériel et méthodes

I. Modèle bioéconomique

Nous avons développé un modèle bioéconomique pour évaluer, sur le long terme, la stratégie de déconfinement pour Toulouse, ville française de 475 000 habitants. Celui-ci consiste en un modèle basé sur une étude épidémiologique comportementale qui mime la dynamique de l'épidémie et sur un modèle optimisation économique prenant en compte d'une part les impacts financiers (diminution de la production locale et coûts des soins médicaux) et d'autre part le bien-être du personnel soignant et des citoyens. Cette approche bioéconomique prend en compte le profil démographique et socio-professionnel des habitants en se focalisant sur l'influence des impacts économiques sur le bien-être de différents groupes de citoyens.

II. Modèle épidémiologique compartimental

Nous avons construit un modèle déterministe en temps discret structuré par âge, en considérant la démographie et l'âge de la population (moins de 18 ans, adultes, seniors), en se basant sur le travail réalisé par Di Domenico et al (25). Ce modèle compartimental est décrit en Figure 1.

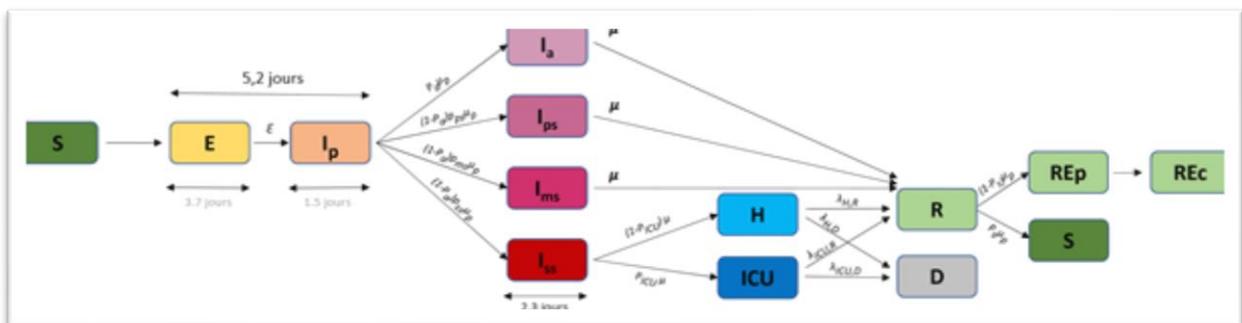


Figure 1 : Modèle compartimental : S : individu sensible ; E : individu exposé ; I_p : infecté en phase prodromique ; I_a : infecté asymptomatique ; I_{ps} : infecté paucisymptomatique ; I_{ms} : infecté avec symptômes modérés ; I_{ss} : infecté avec symptômes graves ; ICU : les cas les plus graves admis en Unité de soin intensif ; H : les cas graves admis à l'hôpital mais pas en soins intensif ; R : individu rétabli ; REp : individu rétabli sans activité économique ; REc : individu rétabli avec activité économique ; D : individu décédé Adapté de Di Domenico et al, 2020

En bref, les individus sont divisés selon leur statut vis-à-vis de la maladie ; sensible, exposé, infectieux, hospitalisé, en soins intensifs, soigné, décédé. Une phase prodromique est prise en

compte avant l'apparition des premiers symptômes. Pendant cette phase, les individus ont un taux de transmission plus faible (Tr) comparé aux individus symptomatiques. Lors de la seconde étape de la phase infectieuse, les individus peuvent rester asymptomatiques (Ia) ou développer différents degrés de sévérité de symptômes. Ainsi ils peuvent rester paucisymptomatiques (Ips) ou développer des symptômes modérés (Ims) ou sévères (Iss). Les individus asymptomatiques (comprenant les enfants) ont un taux de transmission (Tr) plus faible que les individus symptomatiques. Les enfants sont considérés comme ne pouvant être qu'asymptomatiques ou paucisymptomatiques mais sont autant sensible à l'infection que les adultes. Une adaptation majeure du modèle proposé ici est l'introduction de la période de convalescence en plusieurs catégories : la convalescence d'un point de vue épidémiologique (REp) qui correspond à rester chez soi après la maladie, et d'un point de vue économique (REc) correspondant au retour au travail. Après la maladie, une petite partie de la population (10%) est considérée comme étant encore sensible à une nouvelle infection.

Trois populations principales ont été déterminées pour l'approche épidémiologique (jeunes, adultes et seniors) puis affinées par addition de l'environnement socio-professionnel pour le groupe des adultes pour considérer différentes stratégies de déconfinement au sein de ces sous-catégories (tableau 1). Les catégories prenant en compte le personnel médical et les travailleurs essentiels furent créés et représentent 30% de la population active. Les catégories prenant en compte les étudiants et les individus sans emploi furent également créées car les mouvements et interactions de ces citoyens étaient supposés être différent du reste de la population des adultes lors du confinement puis du déconfinement (26,27). Quatre autres catégories socio-professionnelles furent créées (26) en prenant en compte leur impossibilité d'exercer leur métier en distanciel (population appelée Fixed) et en simplifiant la classification officielle des milieux socio-professionnels pour ne retenir que : occupation technique ou à responsabilité limitée (appelée lower), occupation intermédiaire (appelée intermediate) et occupation professionnelle administrative ou de management supérieures (appelée higher).

Il n'y eu pas de catégories spéciales pour les petites entreprises et les auto-entrepreneurs dès lors où ils s'inscrivent dans les catégories déjà existantes ; fixed ou intermediate. De la même manière les profils où il a été noté une diminution d'occupation dans les aspects administratifs, professionnels et de management ne furent pas différenciés des autres profils dont l'occupation avaient diminué. Tous font donc partie de la catégorie lower.

	Jeune (<18 ans)	Etudiant	Sans emploi	Senior	Personnel médical	Travailleur essentiel	Active_ lower	Active_ fixed	Active_ Intermediate	Active_ higher
Catégorie de risque épidémiologique	Enfant	Adulte	Adulte	Séniort	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte
Nombre d'habitants	80,500	75,000	43,500	64,500	26,775	26,775	33,500	41,650	41,650	41,650
ActReleasePopi,Lj	L0	3%	3%	3%	3%	100%	100%	3%	3%	3%
	L1	3%	3%	3%	3%	100%	100%	50%	50%	50%
	L2	3%	3%	3%	3%	100%	100%	75%	75%	75%
	L3	3%	3%	3%	3%	100%	100%	100%	50%	50%
	L4	3%	3%	3%	3%	100%	100%	50%	100%	100%
	L5	3%	3%	3%	3%	100%	100%	50%	50%	50%
	L6	100%	3%	25%	20%	100%	100%	50%	50%	50%
	L7	100%	3%	25%	20%	100%	100%	75%	75%	75%
	L8	100%	3%	25%	20%	100%	100%	100%	50%	50%
	L9	100%	3%	25%	20%	100%	100%	50%	100%	100%
	L10	100%	3%	25%	20%	100%	100%	50%	50%	50%
	L11	100%	3%	25%wc	25%wc	100%	100%	40%wc	40%wc	40%wc
	L12	100%	3%	25%wc	25%wc	100%	100%	75%hwc	75%hwc	75%hwc
	L13	100%	3%	25%wc	25%wc	100%	100%	75%hwc	40%wc	40%wc
	L14	100%	3%	25%wc	25%wc	100%	100%	40%wc	75%hwc	75%hwc
	L15	100%	3%	25%wc	25%wc	100%	100%	40%wc	40%wc	40%wc
	L16	100%	3%	25%wc	25%wc	100%	100%	40%hwc	40%hwc	40%hwc
	L99	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 1 : Description des catégories socio-professionnelles et des scénarios de déconfinements. ActReleasePopi,Lj représente le pourcentage d'activité pour le scénario Lj et la population i. De L11 à L15, wc représente un endiguement des contacts d'une catégorie qu'à sa propre catégorie et hwc représente un endiguement de la moitié des contacts d'une catégorie qu'à sa propre catégorie

Le modèle biologique repose sur le fait que les contacts au sein et entre les sub-populations sont modulés lors de confinement et qu'ils vont dépendre des diverses stratégies de déconfinement mises en place. La probabilité de devenir Exposé (Figure1) dépend donc de la matrice de contact et du taux de transmission (i.e., probabilité de devenir exposé s'il y a contact avec une personne infectée). Le nombre de contacts simulés pendant le confinement et pour chaque scénario de déconfinement fut donc défini en relation avec le pourcentage d'activité restante, comme indiqué dans la formule [1] :

$$\text{ContactsPopi*Popi',Lj} = \text{CoefContact} * \text{ContactPopi*Popi',Init} * \text{ActReleasePopi,Lj} \quad [1]$$

Où

$\text{ContactsPopi*Popi}',L_j$: matrice de contact pour le scénario L_j et les populations i et i'

CoefContact : pondération de la matrice de contact initiale due aux changements de comportement au cours du temps

$\text{ContactPopi*Popi}',\text{Init}$: matrice de contact initiale pour les populations i et i'

$\text{ActReleasePopi},L_j$: pourcentage d'activité pour le scénario L_j et la population i .

a. Scénarios de confinement et déconfinement

Dans le scénario de confinement L_0 (tableau 1), toutes les sous-populations sont enfermées (3% d'activité restantes en termes de contacts) excepté les professionnels de santé et les métiers dit "essentiels". Cela représente la politique mise en place en France lors de la phase 1 (Figure 2), c'est-à-dire du 18 mars au 11 mai 2020 (28). Les écoles furent fermées et 70% de la population active jugée "non-essentielle", fut contraint de travailler en distanciel.

Durant la deuxième phase, qui débuta le 11 mai, trois stratégies de déconfinements contrôlés (L_1 - L_5 , L_5 - L_{10} , and L_{11} - L_{15}) furent simulées (tableau 1) et appliquées. Pour tous ces scénarios, les professionnels de santé et les métiers essentiels restèrent déconfinés. Dans les scénarios allant de L_1 à L_5 , toute les sous-populations non-active étaient considérées comme confinées, tandis que les populations ayant une activité économique, même faible, furent déconfinées. Les scénarios L_6 à L_{10} furent définis de manière équivalente aux précédents à la différence que l'on considérait une réouverture de toutes les écoles et un déconfinement partiel des personnes sans emplois et des séniors. Les scénarios L_{11} à L_{15} représentent la même situation que pour L_6 à L_{10} en prenant en compte un endiguement total des contacts au sein des catégories (w_c) ou un endiguement partiel (réduit de moitié) de ces contacts au sein des catégories ($h_w c$). Cela veut dire, concrètement, que le déconfinement est adapté pour permettre une reprise des activités certains jours de la semaine en fonction des activités de chaque sous-population, ce qui limite drastiquement les contacts entre les sous populations. Une stratégie mixte a également été adoptée, elle consiste à limiter de moitié les contacts au sein des sous-populations grâce à la mise en place d'un système de régulation des populations à la semaine (chaque catégorie

socio-professionnelle aura une combinaison de règles précises de sorties). En plus de tous ces scénarios, un déconfinement total de l'ensemble de la population dès le début de la phase 2 a été considéré (scénario L99).

Pour mieux correspondre aux mesures observées sur le terrain, les simulations de déconfinement de la phase 2 furent combinés à différentes options (figure 2). Le déconfinement fut implanté brutalement le 11 mai (O1) ou progressivement après 4 ou 8 semaines (respectivement O2 et O3). De plus, comme les scénarios L1 à L5 ne pouvaient être appliqués indéfiniment du fait de leur fort impact sur l'économie et la société, une troisième phase fut créée et 2 autres options furent ajoutées (basées sur l'option O3) pour visualiser la dynamique à long terme. L'option O34 planifiait un déconfinement total 2 semaines après la fin de la saturation des hôpitaux ou après le pic d'hospitalisation si la saturation n'était pas atteinte. Pour cette option le déconfinement était transitoire, c'est-à-dire basé sur une stratégie de déconfinement puis reconfinement, à la différence de l'option O35 basé sur le même principe initial mais avec une stratégie de déconfinement définitif. La date de démarrage de la phase 3 dépend, par conséquent, du scénario de déconfinement.

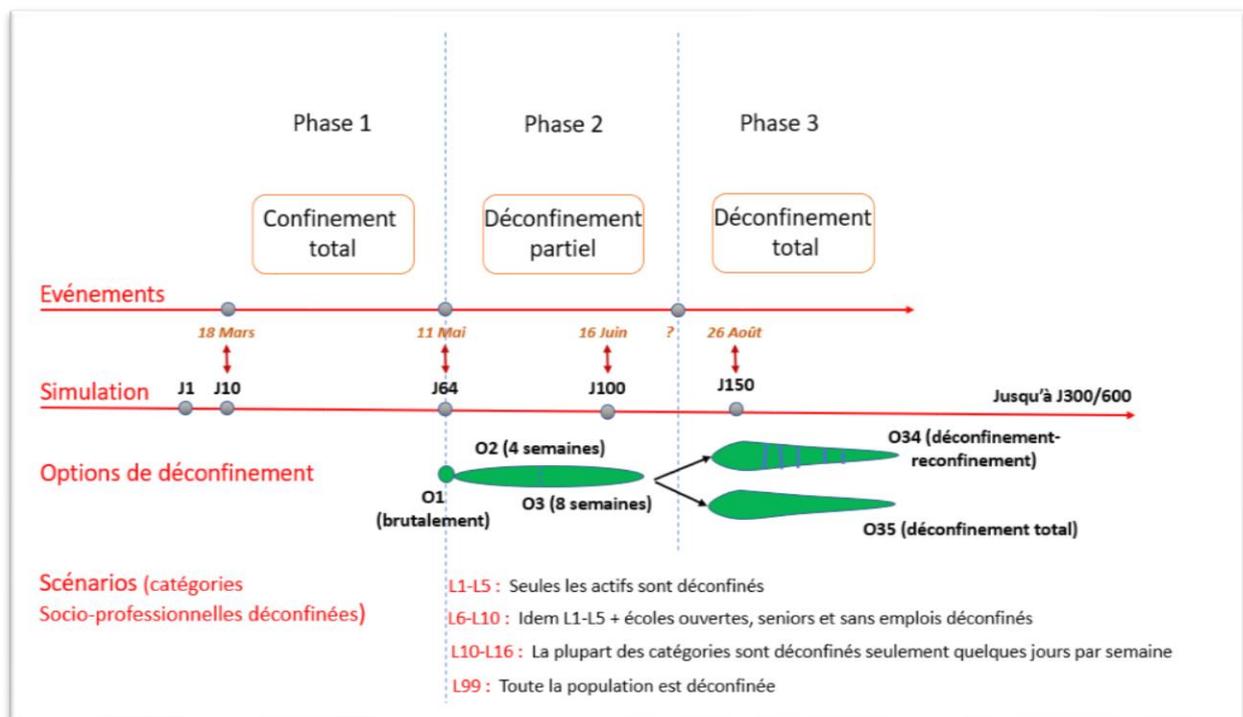


Figure 2: Frise chronologique des événements observés ainsi que des options et scénarios simulés dans les 3 phases épidémiques de la COVID-19

b. Modèle d'optimisation économique

Nous avons considéré six scénarios économiques (tableau 2) différents (notés de E0 à E5) pour les 4 populations actives mais confinées de l'étude (Active_fixed, Active_lower, Active_intermediate, and Active_higher). Pendant les confinements, le pourcentage de productivité comparé à la productivité de la période pré-confinement varie selon les catégories socio-professionnelles. Cette diminution de productivité est une moyenne pour toute la période de confinement (phase 1) et toutes les sous-populations. Elle ne doit cependant pas être comparée à la productivité de travailleurs exerçant leurs métiers à distance avant le confinement.

	Active_lower	Active_fixed	Active_Intermediate	Active_higher
Scénario économique ActEco_{Popi,Ek}				
E0	25%	0%	66%	66%
E1	ActRelease_{Popi,Lj}			
E2	ActRelease_{Popi,Lj}		ActRelease_{Popi,Lj} + 25%	ActRelease_{Popi,Lj}
E3	ActRelease_{Popi,Lj}			ActRelease_{Popi,Lj} + 25%
E4	ActRelease_{Popi,Lj} + 15%			
E5	ActRelease_{Popi,Lj} -5%			
Production individuelle globale PIB_{Popi} (en € par jour)				
	326	326	423	571

Tableau 2 : Scénarios économiques et production global pour les 4 populations actives

Pendant la phase de déconfinement contrôlé (phase 2), le pourcentage de productivité comparé à la période pré-confinement était considéré comme étant dépendant du pourcentage d'activité

$$\text{ProdPopi,Ek} = \begin{cases} \bullet 100 * \text{ActEco}_{\text{Popi,Ek}} * \text{PIB}_{\text{Popi,Pl}}, \text{ si } k = 0 \\ \bullet [\text{ActEco}_{\text{Popi,E0}} + (100 - \text{ActEco}_{\text{Popi,E0}}) \\ \text{ActEco}_{\text{Popi,Ek}; \text{ Max } 100}] * \text{PIB}_{\text{Popi}}, \text{ si } k > 0 \end{cases} \quad [2]$$

permet, selon les différents scénarios de déconfinement pour une population donnée comme indiqué par l'équation [2] :

$Prod_{Pop_i, Ek}$ représente la productivité engendrée par la population active i pour le scénario économique Ek et le scénario de déconfinement Ll

$Act_{ECO_{Pop_i, Ek}}$ représente le pourcentage de persistance de l'activité économique pour un scénario économique donné Ek

PIB_{Pop_i} représente le PIB journalier pour la population Pop_i

Les objectifs de l'équation [2] sont de retranscrire le fait que le confinement partiel peut aider à maintenir une activité économique plus importante en comparaison avec un confinement strict et le fait que l'on peut atteindre de très bonnes performances en mettant en place un confinement partiel pour quelques catégories socio-professionnelles.

L'optimisation sous contraintes a été réalisée par rapport au coût total minimum des paramètres $Cost_{Ek}$, Lj et hospitalisation sur la durée totale de la période, soit 300 ou 600 jours. Les risques économiques n'ont pas été pris en compte. Pour combiner les principales dimensions clés au sein de la prise de décision la solution optimale qui minimise l'impact économique global pour un Tr donné a été tracé en tenant compte de 3 contraintes principales. Ainsi, trois niveaux de contraintes ont été pris en compte sur la base du taux de mortalité médian et sur le quartile, observés entre tous les scénarios pour une option et un Tr donné. Les différents critères de mortalité, haut, moyen et faible, utilisés pour l'optimisation correspondent à un modèle sans contraintes sur la mortalité respectivement au sein de la meilleure moitié de la situation (plus faible moitié du taux de mortalité) et au sein du meilleur quartile (plus faible quartile du taux de mortalité). Le même type de règle a été appliquée pour les critères de bien-être. Les critères représentant le bien-être, haut, moyen et faible, utilisés pour l'optimisation correspondent respectivement à la meilleure moitié ou 75% de personnes-jours non confinées ou pas de contraintes sur le nombre de personnes-jours non confinés. Le critère relatif à la saturation des hôpitaux fut défini par la durée de la saturation à ne pas excéder ou au nombre de lits manquants par jour sur l'ensemble de la période, avec le critère élevé qui équivaut à une situation sans contraintes. Le calcul du coût total pour chaque scénario et pour chaque option nous a permis

de calculer le coût d'opportunité lors du choix de chacune des combinaisons scénario-option comparé au scénario et à l'option présentant le coût total minimal pour la période complète avec un Tr donné.

III. Paramétrage du modèle

a. Modèle SIR

Le nombre de contacts interindividuels a été défini à l'intérieur et entre les 8 sous-populations, ce qui signifie, de fait, que les contacts interindividuels ont été considérés pour les 3 populations épidémiologiques (jeunes, adultes, et personnes âgées). L'hospitalisation et les admissions en unités de soins intensifs pour les cas graves ont été recueillies via les données de l'hôpital de Toulouse (29) et ont été ajustés pour chaque population analysée. L'occupation des lits d'hôpitaux ainsi que ceux des unités de soins intensifs ont été utilisés pour évaluer la capacité à accueillir les patients nécessitant ce niveau de soin. La calibration du modèle compartimenté (Tableau 3) a été réalisée similairement à celle de Di Domenico et al. (25).

Variable	Description	Value	Source
Θ^{-1}	Période d'incubation	5,2 jours	1
μ_p^{-1}	Durée de la phase prodromique	1,5 jours	2
ϵ^{-1}	Période latente	$\Theta^{-1} - \mu_p^{-1}$	-
p_a	Probabilité d'être asymptomatique	0,2 – 0,5	3
p_{ps}	Si symptomatique, probabilité de devenir paucysymptomatique	1 pour les enfants 0,2 pour les adultes, seniors	4
p_{ms}	Si paucysymptomatique, probabilité de développer des symptômes modérés	0 pour les enfants 0,7 pour les adultes 0,6 pour les seniors	4
p_{ss}	Si symptomatique, probabilité de développer des symptômes graves	0,1 pour les enfants 0,1 pour les adultes 0,1 pour les seniors	4-6
s	Intervalle de série	7.5 jours	7
μ^{-1}	Période infectieuse pour $I_a, I_{ps}, I_{ms}, I_{ss}$	$S - \Theta^{-1}$	-
r_β	Infectiosité relative de I_p, I_a, I_{ps}	0,51	8
p_{ICU}	Si symptômes graves, probabilité d'aller en unité de soins intensifs	0 pour les enfants 0,36 pour les adultes 0,2 pour les seniors	9
$\lambda_{H,R}$	Si hospitalisé, probabilité quotidienne de passer dans le compartiment R	0 pour les enfants 0,072 pour les adultes 0,022 pour les seniors	9
$\lambda_{H,D}$	Si hospitalisé, probabilité quotidienne de passer dans le compartiment D	0 pour les enfants 0,0042 pour les adultes 0,014 pour les seniors	9
$\lambda_{ICU,R}$	Si en unité de soin intensif, probabilité quotidienne de passer dans le compartiment R	0 pour les enfants 0,05 pour les enfants 0,036 pour les seniors	9
$\lambda_{ICU,D}$	Si en unité de soin intensif, probabilité quotidienne de passer dans le compartiment D	0 pour les enfants 0,0074 pour les adultes 0,029 pour les seniors	9

Tableau 3 : Paramètres, valeurs, et sources pour définir le modèle bio-économique

Au début du confinement, les autres zones françaises étaient proches du niveau de saturation des hôpitaux, et les médias ont amélioré la prise de conscience collective des risques sanitaires. Nous avons alors considéré que la population a changé radicalement son comportement aussi bien pour le nombre de contacts pendant le confinement que pour le taux de transmission (Tr). En conséquence, le nombre de contacts à l'intérieur et entre les sous-populations (tableau 4) a été basé sur les publications précédentes (25,30) et ajusté par le nombre de personnes hospitalisées et celles en unité de soins intensifs pendant le confinement de la zone considérée. L'incidence simulée des cas cliniques a été comparée avec l'incidence locale observée pour ajuster adéquatement le nombre de contacts (tableau 4). Il était vraisemblable que la valeur du taux de transmission (Tr) soit amenée à se modifier durant la période étudiée dû aux changements de règles, de comportements, de moyens protections disponibles, dont les masques. Le taux de transmission (Tr) a été gardé constant pour une simulation donnée, et les valeurs : 0,06 ; 0,10 ; 0,125 ; 0,20 et 0,25 ont été retenues.

	Jeune	Etudiant	Sans emploi	Senior	Personnel médical	Travailleur essentiel	Active_lower	Active_fixed	Active_Intermed.	Active_higher
Jeunes	12,00	1.44	3,12	1,20	1,08	1,08	3,60	3,12	2,40	1,20
Etudiants	4,32	3.36	2,64	1,68	0,45	0,69	2,04	2,64	2,64	2,52
Sans emploi	4,32	3.36	2,64	1,68	0,66	0,45	2,04	2,64	2,64	2,64
Senior	0,30	0.60	3,12	8,40	0,42	0,42	2,40	2,40	1,68	0,12
Personnel médical	4,32	3.36	2,64	1,68	0,66	0,45	2,04	2,64	2,64	2,64
Travailleur essentiel	4,32	3.36	2,64	1,68	0,45	0,69	2,04	2,64	2,64	2,52
Active_lower	3,60	2.40	3,60	2,40	0,51	0,51	2,88	2,52	2,52	2,40
Active_fixed	3,12	2.4	4,44	2,40	0,66	0,66	2,52	4,56	1,20	0,48
Active_Intermediate	2,40	2.4	0,84	1,68	0,66	0,66	2,52	1,20	6,00	4,08
Active_higher	1,20	4.44	0,12	0,12	0,66	0,63	2,40	0,48	4,08	8,40

Tableau 4 : Matrice de contact (valeur de $Contact_{Pop_i * Pop_j, Init}$) pour les différentes populations

L'hypothèse faite par Di Domenico et al. (25) de la mise en place d'une distanciation sociale a été utilisée. Une diminution de 75% du nombre de contacts est envisagée si des symptômes graves sont observés sur un individu. 5 % des adultes sont restés à leur domicile en cas de fermetures des écoles, avec l'exception des sous-populations : travailleurs essentiels et personnel médical. Le télétravail a été adopté par 6% de la population active avant le confinement. L'isolement de cas positifs pour les personnes rentrant chez eux n'a pas été considéré comme possible lors de la phase 1, en accord avec les principales observations durant cette phase. Le nombre de lits disponibles pour l'hospitalisation et pour les unités de soins intensifs étaient aux nombres respectifs de 1000 et de 300 (29). Un plus grand nombre de

patients hospitalisés ou en unité de soins intensifs sur un jour donné défini la situation de saturation, ce qui est associé à un risque de mortalité 3 fois plus élevé pour les personnes au-dessus de ce pallier. Le coût de l'utilisation d'un lit a été respectivement fixé à 500 € et 1 500 € en hospitalisation et en unité de soins intensifs (31).

b Paramètres économiques

Les paramètres des 6 scénarios économiques sont décrits dans le Tableau 2. Le panel d'activités durant le confinement a été considéré comme variant de 0% (fixed) à 66% de sa productivité par rapport à la période qui précédait le confinement. Ce qui veut dire, par exemple, que la productivité d'un télétravailleur équivaut à 66 % de sa productivité pré-confinement. Une analyse de sensibilité est permise par les scénarios E2 à E4, qui attribuent un pourcentage de productivité supplémentaire fixé pour chaque scénario, ainsi que dans le scénario E5 la productivité est limitée mais où le taux de déconfinement est élevé.

Le PIB quotidien a été obtenu à partir du PIB annuel moyen par travailleur [77 212 € en 2018 pour la région d'Occitanie (32)] et a été ajusté pour chaque sous-population dû aux variations entre les estimations officielles des revenus type socio-professionnels (27). Les revenus type ont été officiellement évalués respectivement à 18 870 € ; 24 520 € et 33 090 € pour les catégories socio-professionnelles suivantes : Active_low, Active_fixed, Active_intermediate, et Active_high. Le PIB moyen annuel par travailleur de chaque catégorie socio-professionnelle a été ensuite divisé par les 200 jours travaillés annuellement (Tableau 2).

Nous avons calibré notre modèle avec des données démographiques et socioéconomiques décrivant la zone de Toulouse (une métropole française avec un relativement haut niveau d'activité économique, de nombreuses universités et des structures d'enseignement supérieur. Nos résultats pourraient ne pas être extrapolables aux autres villes puisque les paramètres peuvent varier entre les différentes villes. Néanmoins, beaucoup des villes ayant une taille similaire en Europe ont tendance à avoir des installations universitaires et hospitalières comparables. Dans une certaine mesure, nos résultats apportent des informations précieuses pour les scientifiques et les politiciens au-delà de la zone toulousaine. A minima, nous avons établi dans cette application empirique le fondement et les éléments requis pour établir une approche adaptative et sur mesure dans la gestion de la COVID-19.

Résultats

Les résultats sont présentés sur une période de 300 et de 600 jours de simulation pour représenter l'impact sur le court et le moyen terme. Le confinement commence au 10^{ème} jour de simulation (18 Mars 2020) et le déconfinement commence au 64^{ème} jour (11 Mai 2020). Ainsi, le 100^{ème} jour correspond à mi-Juin 2020 et le 150^{ème} jour correspond à fin Août 2020 (Figure 2).

I. Validation et sensibilité du modèle bioéconomique.

La validation de la partie épidémiologique du modèle a été basée sur la comparaison entre les nombres de lits*jours utilisés simulés et ceux observés dans la réalité, avec un fort taux de corrélation observé (Figure 3A). Les résultats ont été très sensibles au taux de transmission Tr , comme le montre l'option O1 dans les Figures 3B-D : le nombre de lits-jours occupés était très faible avec un taux de transmission de 0,06, ceux-ci augmentent considérablement quand le taux de transmission Tr est augmenté à 0,125 ou à 0,25. Puisque la modification du taux de transmission Tr représente le comportement individuel moyen vis-à-vis de la transmission du virus dans notre modèle, les résultats sont présentés pour les 3 valeurs de Tr . Les résultats soulignent également la capacité des scénarios à représenter diverses situations en termes de dynamique épidémiologique lors des différentes phases (Figures 3B-D). Par exemple, la saturation des hôpitaux peut être évitée dans certaines combinaisons de taux de transmission Tr et de scénarios, alors que d'autres combinaisons conduisent à des saturations hospitalières longues et intenses.

Pour un taux de transmission donné (Figures 3C,E avec $Tr = 0,125$), étaler le déconfinement sur 8 semaines, comme cela s'est produit en France pour la plupart des secteurs d'activités, a permis de décaler le pic d'intensité (le pic d'intensité a été d'autant plus décalé qu'il était initialement faible) mais a échoué à réduire l'intensité du pic. Le choix d'un confinement total conduit à une seconde vague. Pour un confinement simulé à 8 semaines et un taux de transmission $Tr = 0,125$ (Figure 3F, O34), la seconde vague débute au 250^{ème} jour. Cela montre clairement la nécessité de considérer des solutions sur le long-terme.

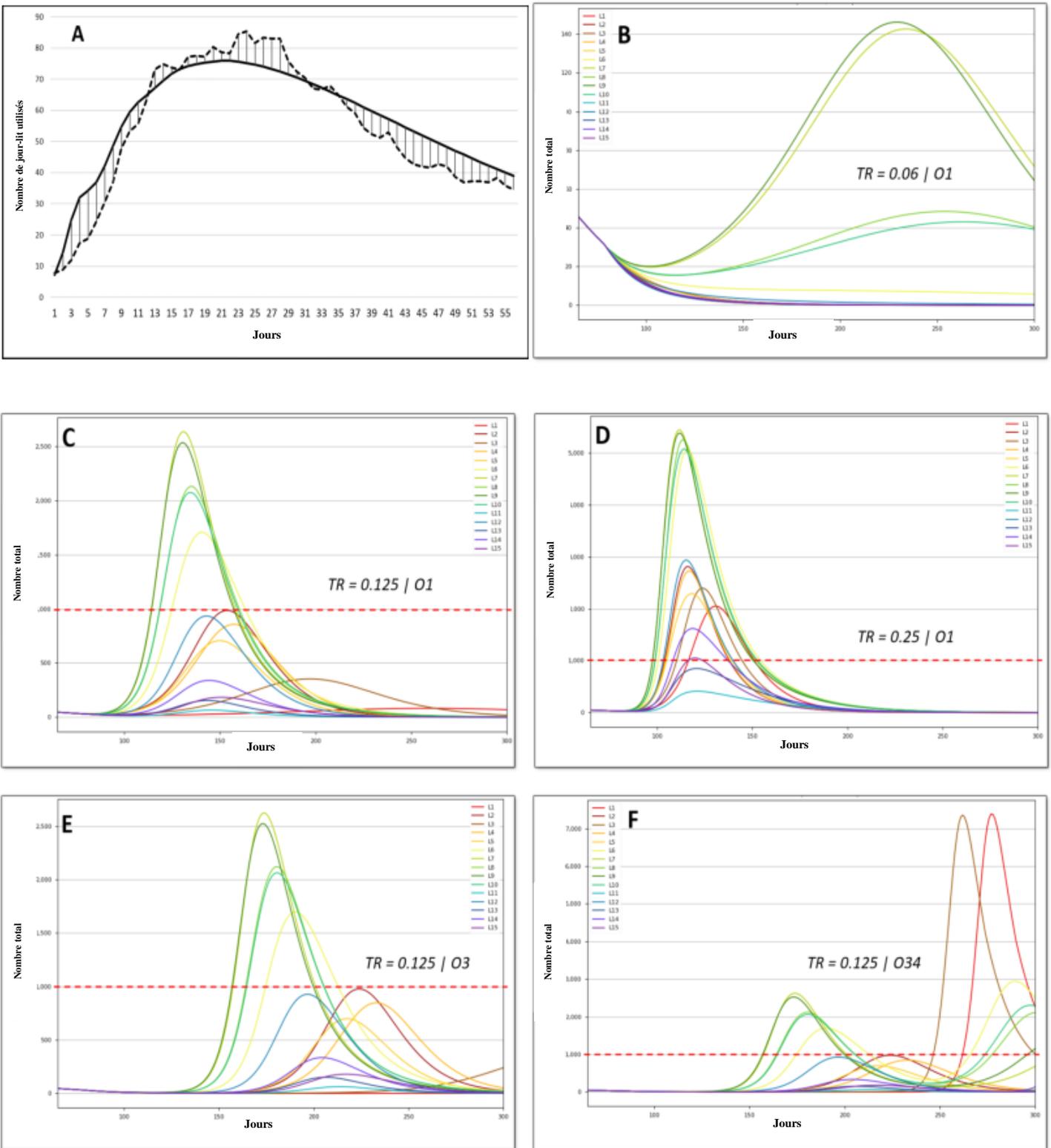


Figure 3: Validation épidémiologique du modèle. (A) Comparaison entre le nombre de jour-lits prédit (ligne continue) et le nombre de jours lits observés (ligne pointillée). (B-F) Nombre quotidien de lits utilisés dans les hôpitaux (Les lits des unités de soins intensifs étant exclus). La ligne pointillée rouge représente la capacité de l'hôpital. Tr représente le taux de transmission. Option 1 (O1) : déconfinement abrupte dans le début de la phase 2. Option 3 (O3) : déconfinement progressif, étalé sur 8 semaines ; Option 34 (O34) : déconfinement progressif total lors de la phase 3.

Les options O34 et O35 ont donc été simulées sur 600 jours (Figure 4).

D'une part, plus le taux de transmission Tr est important (Tr croissant de haut en bas pour une colonne donnée), plus le pic est intense et précoce aussi bien pour la stratégie de déconfinement puis reconfinement (O34, gauche) que pour la stratégie de déconfinement total (O35, droite). La saturation des hôpitaux a été évité seulement dans la stratégie de déconfinement puis reconfinement (O34) lorsque le taux de transmission restait très faible ($Tr = 0,06$). Ces résultats démontrent que les comportements individuels (représentés par la valeur Tr) est plus important que les stratégies politiques (représentées par le choix du scénario) sur l'impact global long-terme. D'autre part, pour un taux de transmission donné (représentant un comportement individuel moyen donné), le choix des scénarios permet la gestion du niveau de saturation des hôpitaux, de sa durée et de son intensité.

II. Optimisation multidimensionnelle sur le long terme

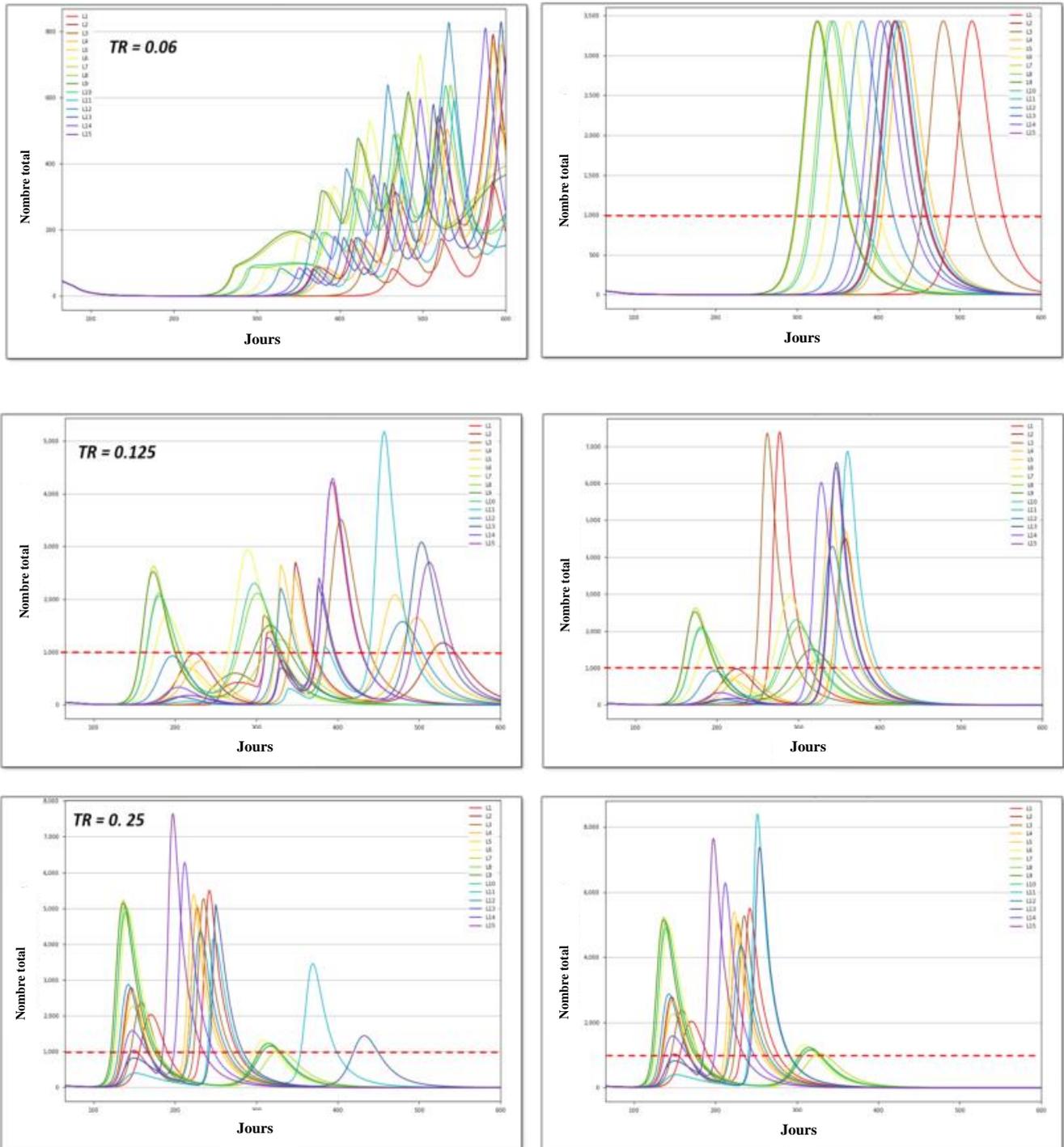


Figure 4 : Nombre quotidien de lits utilisés dans les hôpitaux (Les lits des unités de soins intensifs étant exclus) pour les différents scénarios (L1 à L15). Tr : taux de transmission. La ligne pointillée rouge représente la capacité de l'hôpital. A gauche : Option O34 (stratégie de déconfinement puis reconfinement). A droite : Option O35 stratégie de déconfinement total.

Les solutions optimales selon les différents niveaux de contraintes sont reportées sur les Figures 5,6. La solution qui minimise l'impact économique global est située sur le premier plan des Figures 5,6 et des Annexes 1, 2 (niveau de bien-être élevé, mortalité faible et faible saturation). Les résultats indiquent le nom du scénario et de l'option ainsi que le coût total direct correspondant en comparant avec la situation de référence (situation où la valeur du coût d'opportunité = 0). Le coût total des stratégies de confinement pour l'option O34 sur une période donnée de 300 jours était de 2,15 milliards d'euros pour la stratégie L99, le coût variait entre 3 milliards d'euros et 6 milliards d'euros pour les scénarios L1-L15.

L'optimisation sur le court terme (Figure 5) montre qu'améliorer un critère conduit nécessairement à la dégradation d'un autre critère. La combinaison des stratégies L4 ou L14 avec l'option O3 représente la meilleure stratégie dans la plupart des situations pour un faible taux de transmission donné, avec un coût d'opportunité variant entre 1,29 milliards d'euros et 1,88 milliards d'euros sur la période de 300 jours donnée. Pour un taux de transmission plus élevé, les options O1, O3 et O34 et les scénarios L3, L4, L5, L12, L13, L14 semblent être les mieux optimisés si les contraintes sont basées sur au moins 2 critères. Le coût direct des scénarios optimaux pour améliorer le bien-être individuel ou pour diminuer la mortalité et le niveau de saturation des hôpitaux varie entre 1,2 milliards d'euros et 2,7 milliards d'euros (le scénario L99 étant exclu).

Pour ce qui est de l'impact sur le long-terme (Figure 6), les résultats sont fortement différents. L'option O34 se révèle être la meilleure solution exceptée dans quelques rares situations. Les stratégies de déconfinement-reconfinement respectent les 3 contraintes pour des taux de transmission valant $Tr = 0,06$ et $Tr = 0,125$. Pour un taux de transmission $Tr = 0,25$ les critères de bien-être et de niveau de saturation des hôpitaux ne peuvent être respectés. Les meilleurs scénarios pour l'optimisation sur le long-terme sont L4 avec un taux de transmission $Tr = 0,06$ (ce qui était déjà le cas pour l'optimisation sur le court-terme), L4 et L13 avec un taux de transmission $Tr = 0,25$ et L2, L4, L7, L9, L12 avec un taux de transmission $Tr = 0,125$. Le coût d'opportunité est de 1,28 milliard d'euros avec un taux de transmission $Tr = 0,06$, il varie entre 0,68 milliards d'euros et 1,44 milliards d'euros avec un taux de transmission $Tr = 0,125$, et il varie entre 0,51 milliard d'euros et 2,42 milliards d'euros avec un taux de transmission $Tr = 0,25$. Des résultats très similaires sont observés lorsque la contrainte du niveau de saturation des hôpitaux ne dépend que de la durée de la saturation mais plus de son intensité (Annexe 1).

La deuxième ou troisième stratégie la plus optimale (Annexe 2) se trouve être l'option O34 combinée avec les scénarios L2, L3, L4, L5, L7, L8, L9 et L12. Le coût d'opportunité comparé entre toutes les meilleures solutions pour chaque ensemble de contraintes diffère peu voire très peu, montrant peu de différences liées au choix du scénario parmi le panel proposé.

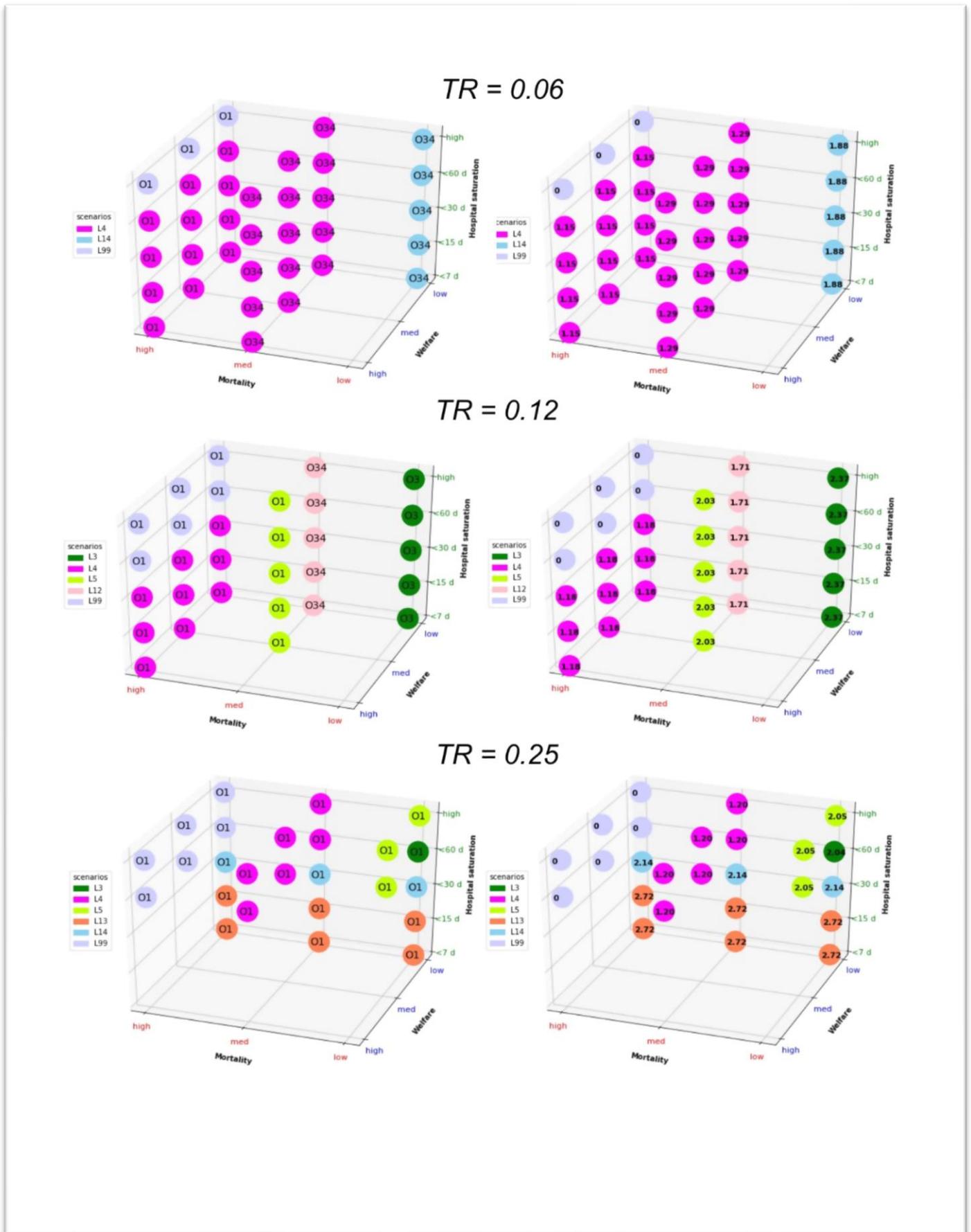


Figure 5: Représentation graphique de la solution optimale en fonction de la force de la contrainte appliquée sur une période de 300 jours. Les résultats dans la colonne de droite sont exprimés en coût directs (en milliards d'euros). Tr = taux de transmission. La contrainte Mortality représente la mortalité. La contrainte Welfare représente le bien-être. Les valeurs que peuvent prendre ces contraintes sont : low, med, high ce qui signifie respectivement : faible, modéré, élevé. La contrainte Hospital saturation représente la durée de saturation des hôpitaux, celle-ci peut prendre les valeurs suivantes : <7 d, <15 d, <30 d, <60 d, high ce qui signifie respectivement : <7 jours, <15 jours, <30 jours, <60 jours, élevé. La solution optimale qui minimise l'impact économique total sous le panel de contraintes donné se trouve au premier plan (faible mortalité, fort bien-être, et faible saturation).

Discussion

Ces travaux proposent une approche bioéconomique multicritère optimisée sur le long terme appliqué à la COVID-19 à l'échelle locale. Elle a été conçue pour appuyer les prises de décisions politiques de santé publique. De nombreux critères ont été considérés dans la partie économique du modèle, et la complexité épidémiologique a été simplifiée. L'approche proposée nous permet de considérer 8 catégories socio-professionnelles et 3 populations épidémiologiques en un regard.

Contrairement aux études actuellement proposées, cette thèse se concentre sur une population avec une circulation très limitée du virus avant confinement. La situation à Paris et dans l'Est de la France en Février 2020 et en Mars 2020, de même que la situation dans d'autres lieux d'Europe ainsi que dans le monde entier démontre clairement les conséquences du virus sur la santé publique, conduisant alors à l'intensification des gestes barrières quotidiens aussi bien dans le monde professionnel que dans la vie privée de chaque individu. La matrice de contact et la probabilité de contagion ont été ajustés en conséquence dans la modélisation présentée. Puisque le confinement bloque toute activité professionnelle et privée pour la majorité de la population, la version simplifiée du modèle SIR a été suffisamment précise pour prédire le nombre de cas observés dans les hôpitaux. La valeur du taux de transmission à sélectionner dans le modèle bioéconomique est un point central, et tous les résultats démontrent que l'identification de la meilleure solution est en lien très sensible avec ce paramètre. Le taux de transmission représente les comportements individuels vis-à-vis des gestes barrières et le respect des règles de biosécurité et distanciation sociale. Sa vraie valeur est en conséquence très difficile à évaluer et peut varier selon les différentes catégories socio-professionnelles (dû à une éducation différente, ainsi qu'une asymétrie dans la connaissance de l'information). La valeur fixe du taux de transmission pour un ensemble donné de scénarios et d'options est une simplification importante de notre modèle puisque ce taux de transmission est amené à varier au cours du temps selon toute vraisemblance. Les moyens proposés à la population pour se protéger elle-même (gel désinfectant, masques, etc..) et les règles ou recommandation fournies par les autorités pourraient influencer la valeur du taux de transmission. Par exemple, en France, les masques ont été disponibles pour tous dès le début de la phase 2, et les recommandations pour le port du masque se sont modifiées au cours du temps (d'abord proposé sur la base du volontariat puis obligatoire dans toutes les pièces en intérieur et à l'extérieur dans certaines

villes très touristiques à partir du milieu de l'été). De plus, la sensibilité de la population était limitée lorsque que la prévalence était faible en France et en Europe mais a augmenté ensuite durant l'été 2020, quand la seconde vague a été observée dans d'autres pays Européens, et que des limitations dans les voyages ont été instaurées.

La levée progressive du confinement, comme simulée sur une durée de 8 semaines dans l'option O3, est très similaire à la situation réelle. Quand la phase 2 a débutée, l'application pratique de la levée du confinement s'est étalée sur 1 à 2 mois étant donné que de nombreux bureaux, écoles et de garderies n'étaient pas en capacité à accueillir des personnes. Les collèges et les lycées sont restés fermés jusqu'en Septembre 2020. La plupart des activités sociales (musée, restaurants, bars et cinémas) ont ouvert progressivement de Mai à Août 2020. Se déplacer n'a été autorisé au début que de 100 kilomètres autour du domicile, puis la libre circulation a à nouveau été autorisée. La capacité du modèle proposé à représenter fidèlement la stratégie de déconfinement peut être considérée comme élevée. Une limite de notre modèle est qu'il ne prend pas en compte les vacances d'été et la proportion bien plus importante de déplacement et de contacts qui peuvent prendre place durant cette période spécifique.

Cette thèse utilise une vision simplifiée des dynamiques économiques en résumant la création de valeur réalisée par chaque acteur économique à sa contribution quotidienne au PIB avant le confinement. Une approche dynamique globale des activités industrielles et économiques qui pourrait être permise par un modèle d'équilibre économique global (ou partiel) pourrait permettre une conception précise pour guider les prises de décisions. Cela pourrait aider à mieux appréhender les relations intrinsèques entre les différents secteurs ainsi que l'interdépendance des différents acteurs et des dynamiques de rétablissement post-épidémie. Il est difficile d'apprécier dans leur totalité les interactions entre les différents secteurs et toute l'information nécessaire pour paramétrer les modèles durant la phase de rétablissement dû à la rareté des informations actualisées. Ceci signifie que la majeure partie de la calibration serait basée sur des hypothèses. L'utilisation d'un PIB fixe pour chaque catégorie socio-professionnelle est une hypothèse audacieuse, et le PIB est une procuration très brut de l'état de l'économie. Néanmoins cela permet une combinaison du modèle SIR d'épidémie avec des considérations économiques et sociétales dans le cadre d'un processus de prise de décision unique, qui est la valeur ajoutée de cette thèse.

Les résultats principaux de cette thèse montrent que les politiciens devraient se concentrer plus sur les comportements individuels (représentés par la valeur Tr) plutôt que d'essayer d'optimiser des stratégies de confinement. La distanciation sociale est considérée comme le paramètre essentiel pour limiter la diffusion de maladie, mais elle est souvent associée à un fort impact économique (17). Le défi principal est alors de maintenir une distanciation sociale via des comportements individuels appropriés sans requérir à des mesures coercitives excessives de la part de l'état, ces dernières étant très souvent associées à des impacts économiques importants. Dans les pays avec un niveau socio-économique faible, des mesures de distanciation sociales strictes associées à des dons importants de la part des organismes de soutien ont montré une diminution de la prévalence et de la mortalité (33). Ces résultats indiquent qu'évaluer l'impact global de la COVID-19 et qu'optimiser le choix de la meilleure de la meilleure stratégie à adopter puissent devenir une priorité et que les recherches en économie compartimentale ou en économie expérimentale puissent être nécessaires pour remédier aux problèmes engendrés par la COVID-19. Une meilleure compréhension des fondements des comportements individuels et l'identification de solutions pour améliorer le respect de la biosécurité par tous devrait être la priorité sur le court-terme.

Les résultats montrent clairement qu'il n'y a pas de différence majeure entre les divers scénarios sur l'impact économique ou sur les 3 critères retenus. Les scénarios L4 et L3 semblent être les meilleurs, et les scénarios L2, L3, L5, L7, L12 et L14 peuvent être considérés comme étant équivalents sur de multiples critères. Néanmoins les scénarios L1, L6, L10, L11 ou L15 ne devraient pas être recommandés. Les scénarios qui limitent les interactions entre les catégories socio-professionnelles (L11 à L15) ont été créés dans l'espoir d'être le meilleur équilibre entre les différentes contraintes, mais ils ont échoué à satisfaire le critère de bien-être, avec un accès à l'extérieur général plus limité que dans les autres scénarios.

Dans tous les scénarios potentiels recommandés, le niveau de saturation des hôpitaux prenait comme paramètres aussi bien son intensité que sa durée. Bien que nous démontrions dans cet ouvrage que de nombreux critères puissent être considérés simultanément lors de la prise de décision politique et que le niveau de saturation des hôpitaux ainsi que le risque de mortalité associé ne peuvent pas justifier un confinement strict perpétuel, la santé publique reste le critère le plus important sur le court-terme et les différents scénarios proposés contribuent à son

optimisation. La saturation des hôpitaux n'est pas seulement un problème de santé publique mais également un risque politique central dans le rejet des politiques de confinement (2).

Ainsi, depuis l'élaboration de ce modèle de nombreux paramètres ont été fondamentalement modifiés. Le taux de transmission a notamment évolué avec l'émergence de nouveaux variants, en effet ces variants ont tendance à être entre 40 et 70% plus transmissible que les variants historiques (35). De plus la proportion de chaque variants au sein de la population d'un pays ou d'une ville va avoir tendance à évoluer dans le temps ce qui ne permet pas au modèle d'être encore applicable tel quel aujourd'hui.

Il faut également prendre en compte l'arrivée de la vaccination qui a permis de diminuer drastiquement le taux de transmission moyen au sein de la population et de faciliter la relance de l'économie. Cependant la campagne de vaccination a mis en lumière l'influence du comportement des citoyens vis-à-vis de la gestion de cette crise, en effet de nombreuses personnes refusent de se faire vacciner et cela influence la circulation du virus au sein de la population. Cette situation est donc une limite à notre modèle qui ne prend pas en compte ce cas de figure qui influence la transmission du virus au sein de la population.

Ensuite, il est important de noter que notre modèle repose sur la classe dirigeante et le choix des mesures que ces dirigeants se décident à mettre en place. Ainsi dès le 11 mai 2020 et à de nombreuses autres reprises, le président Emmanuel Macron a décidé de ne pas suivre l'avis du conseil scientifique pour la gestion des confinements et de la circulation des personnes. Le gouvernement a alors décidé d'être moins exigeant que ce que préconisaient les scientifiques. La réalisation de modèles bioéconomiques est donc un bon outil pour la prise de décision en tant de pandémie mais les hommes politiques pourront prendre des décisions qui ne sont pas celles préconisées par ces modèles.

Enfin, une des limites les plus importantes de ce modèle est que nous ne prenons pas en compte l'acceptabilité et le respect des mesures restrictives par la population. Ainsi il a été démontré que l'isolement favorisait l'apparition d'une certaine détresse psychologique au sein de la population (37), l'acceptabilité de ces mesures va donc diminuer au cours du temps et de l'évolution de la pandémie. De plus une étude de santé publique France a montré que le respect des gestes barrières avait tendance à diminuer plus la pandémie s'installe durablement au sein de la société. (Annexe 2)

CONCLUSION

En conclusion, ces résultats montrent une faible différence entre les résultats des différents scénarios et une forte sensibilité du modèle au taux de transmission, paramètre témoignant des comportements d'acteurs. Aussi, ces résultats démontrent que les pouvoirs publics devraient accorder une importance plus élevée aux comportements individuels plutôt que de focaliser uniquement sur les stratégies de confinement (définir qui est confiné et qui ne l'est pas). Les initiatives antivax montrent bien la complexité de la prise de décision politique, basée uniquement pour partie sur les essais scientifiques. Les résultats mettent en évidence la nécessité de l'étude économique compartimentale et expérimentale pour aborder les conséquences de la COVID-19 via une meilleure compréhension des fondements des comportements individuels et de l'identification de solutions pour améliorer le respect des règles de biosécurité. Ces résultats sont une preuve de concept de l'utilité des approches multicritères dans la décision politique et ne visent pas à se substituer aux instances officielles françaises de simulation et de conseil en matière de santé publique.

Bibliographie :

1. World Health Organization. Coronavirus Disease (COVID-19) Pandemic. (2019). Available online at: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> (accessed August 5, 2020).
2. Raboisson D, Lhermie G. Living with COVID-19: a systemic and multi-criteria approach to enact evidence-based health policy. *Front Public Health*. (2020) 8:294. doi: 10.3389/fpubh.2020.00294
3. Ferguson NM, Laydon D, Nedjati-Gilani G, Imai N, Ainslie K, Baguelin M, et al. Impact of Non-Pharmaceutical Interventions (NPIs) to Reduce COVID-19 Mortality and Healthcare Demand. London: Imperial College COVID-19 Response Team (2020).
4. Alvarez MM, Gonzalez-Gonzalez E, Trujillo-de Santiago G. Modeling COVID-19 epidemics in an Excel spreadsheet: democratizing the access to first-hand accurate predictions of epidemic outbreaks. *medRxiv [Preprint]*. (2020). doi: 10.1101/2020.03.23.20041590
5. IHME COVID-19 Health Service Utilization Forecasting Team, Murray CJL. Forecasting the impact of the first wave of the COVID-19 pandemic on hospital demand and deaths for the USA and European Economic Area countries. *medRxiv*. (2020). doi: 10.1101/2020.04.21.20074732
6. Kissler SM, Tedijanto C, Goldstein E, Grad YH, Lipsitch M. Projecting the transmission dynamics of SARS-CoV-2 through the postpandemic period. *Science*. (2020) 368:860–8. doi: 10.1126/science.abb5793
7. Velavan TP, Meyer CG. The COVID-19 epidemic. *Trop Med Int Health*.(2020) 25:278–80. doi: 10.1111/tmi.13383
8. Hardin G. The tragedy of the commons. The population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. *Science*. (1968) 162:1243–8. doi: 10.1126/science.162.3859.1243
9. Glazer J, McGuire TG. Multiple payers, commonality and free-riding in health care: medicare and private payers. *J Health Econ*. (2002) 21:1049–69. doi: 10.1016/S0167-6296(02)00078-4
10. Hennessy DA, Wolf CA. Asymmetric information, externalities and incentives in animal disease prevention and control. *J Agric Econ*. (2018) 69:226–42. doi: 10.1111/1477-9552.12113

11. Caracciolo G, Cingano F, Ercolani V, Ferrero G, Hassan F, Papetti A, et al. Covid-19 and Economic Analysis: A Review of the Debate. (2020). Available at: https://st.ilfattoquotidiano.it/wp-content/uploads/2020/08/07/Covid-19-and-Economic-Analysis-Bank-of-Italy-covid_literature_newsletter_it.pdf (accessed August 15, 2020).
12. Gollier C. Pandemic economics: optimal dynamic confinement under uncertainty and learning. *Geneva Risk Insur Rev.* (2020) 45:80–93. doi: 10.1057/s10713-020-00052-1
13. Gómez-Pineda JG. Growth forecasts and the Covid-19 recession they convey. *Covid Economics.* (2020) 40:196–213.
14. McKibbin W, Fernando R. Global Macroeconomic Scenarios of the COVID-19 Pandemic. (2020). CAMA Working Paper No. 62/2020. Available online at: <https://ssrn.com/abstract=3635103> (accessed July 17, 2020).
15. Mamaysky H. Financial Markets and News about the Coronavirus. SSRN's eLibrary (2020). doi: 10.2139/ssrn.3565597 Available at: <https://ssrn.com/abstract=3565597>
16. Borelli L, Sandolas Góes G. Macroeconomics of epidemics: interstate heterogeneity in Brazil. *Covid Econ.* (2020) 30:83–119.
17. Getachew YY. Optimal social distancing in SIR based macroeconomic models. In: MERIT Working Papers 2020-034, United Nations University - Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (MERIT). (2020).
18. Banks J, Xu X. The mental health effects of the first two months of lockdown and social distancing during the COVID-19 pandemic in the UK. IFS Working Paper W20/16. IFS (2020). doi: 10.1920/wp.ifs.2020.1620
19. Papageorge NW, Zahn MV, Belot M, van den Broek-Altenburg E, Choi S, Jamison JC, et al. Socio-demographic factors associated with self-protecting behavior during the COVID-19 pandemic. IZA Discussion Papers 13333, Bonn: Institute of Labor Economics (IZA). (2020).
20. Laliotis I, Minos D. Spreading the Disease: The Role of Culture (2020). doi: 10.31235/osf.io/z4ndc
21. Kikuchi S, Kitao S, Mikoshiha M. Who suffers from the COVID-19 shocks? Labor market heterogeneity and welfare consequences in Japan. CARF F-Series CARF-F-490. The Centre for Economic Policy Research (CEPR); Center for Advanced Research in Finance, Faculty of Economics, The University of Tokyo. (2020).
22. Gapen M, Millar J, Blerina U, Sriram P. Assessing the effectiveness of alternative

measures to slow the spread of COVID-19 in the United States.

Covid Econ. (2020) 40:46–75.

23. Thunström L, Ashworth M, Finnoff D, Newbold SC. Hesitancy Towards a COVID-19 Vaccine and Prospects for Herd Immunity. Center for Advanced Research in Finance, Faculty of Economics, The University of Tokyo (2020). p. 40. doi: 10.2139/ssrn.3593098

24. Khadilkar H, Ganu T, Seetharam DP. Optimising lockdown policies for epidemic control using reinforcement learning. Phys Q-Bio Stat [Preprint]. (2020).

doi: 10.1007/s41403-020-00129-3

25. Di Domenico L, Pullano G, Sabbatini CE, Boëlle PY, Colizza V. Impact of lockdown on COVID-19 epidemic in Île-de-France and possible exit strategies. BMC Med. (2020) 18:240.

doi: 10.1186/s12916-020-01698-4

26. Insee. Dossier complet – commune de toulouse (31555). (2020). Available online at: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-31555> (accessed August 5, 2020).

27. Insee. Comparateur de territoire – département de la haute-garonne (31) (2020). Available online at: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=DEP-31> (accessed August 5, 2020).

28. French Government. Informations Coronavirus. (2020). Available online at: <https://www.gouvernement.fr/info-coronavirus> (accessed September 11, 2020).

29. data.gouv.fr. Santé publique France. (2020). Available online at: <https://www.data.gouv.fr/fr/organizations/sante-publique-france/#> (accessed August 5, 2020).

30. Béraud G, Kazmerczak S, Beutels P, Levy-Bruhl D, Lenne X, Mielcarek N, et al. The French connection: the first large population-based contact survey in France relevant for the spread of infectious diseases. PLoS ONE. (2015)

10:e0133203. doi: 10.1371/journal.pone.0133203

31. Atih. Les couts des prises en charge à l'hôpital en médecine, chirurgie et obstétrique. (2020). Available online at:

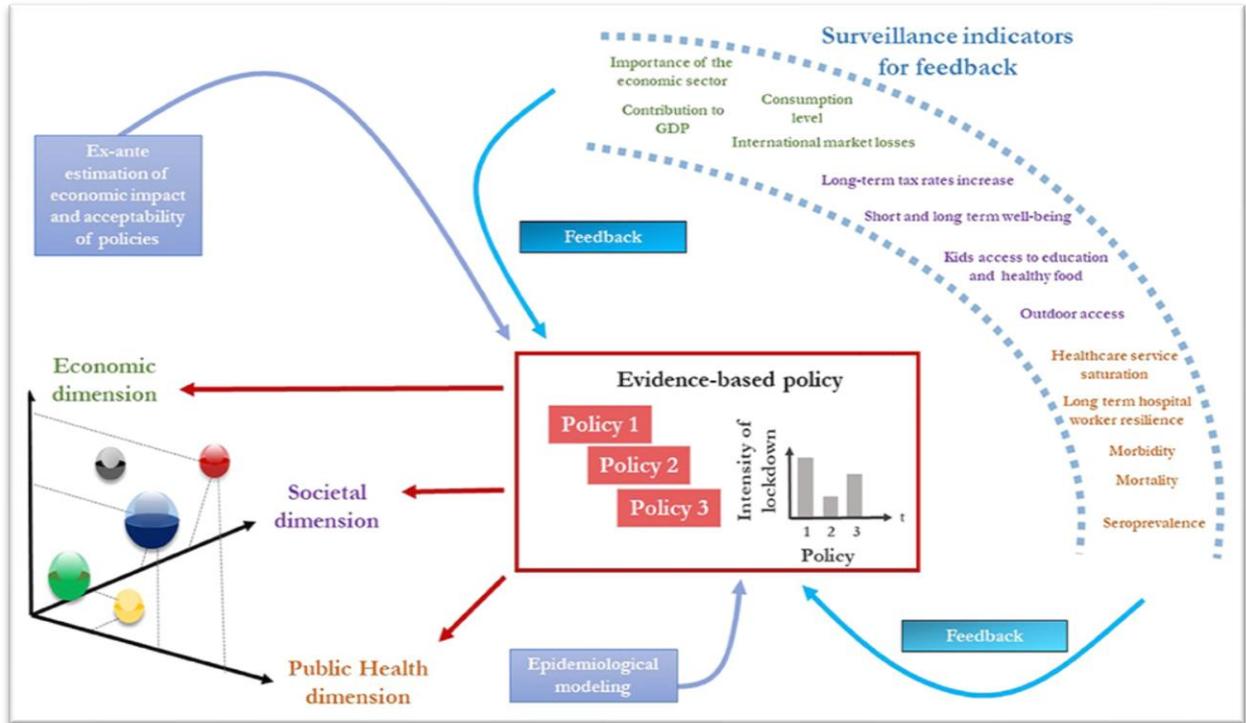
https://www.atih.sante.fr/sites/default/files/public/content/2563/rapport_couts_de_prise_en_charge_2012.pdf (accessed August 5, 2020).

32. Wikipédia|encyclopédie libre. Liste des départements français classés par produit intérieur brut par habitant. (2020). Available online at:

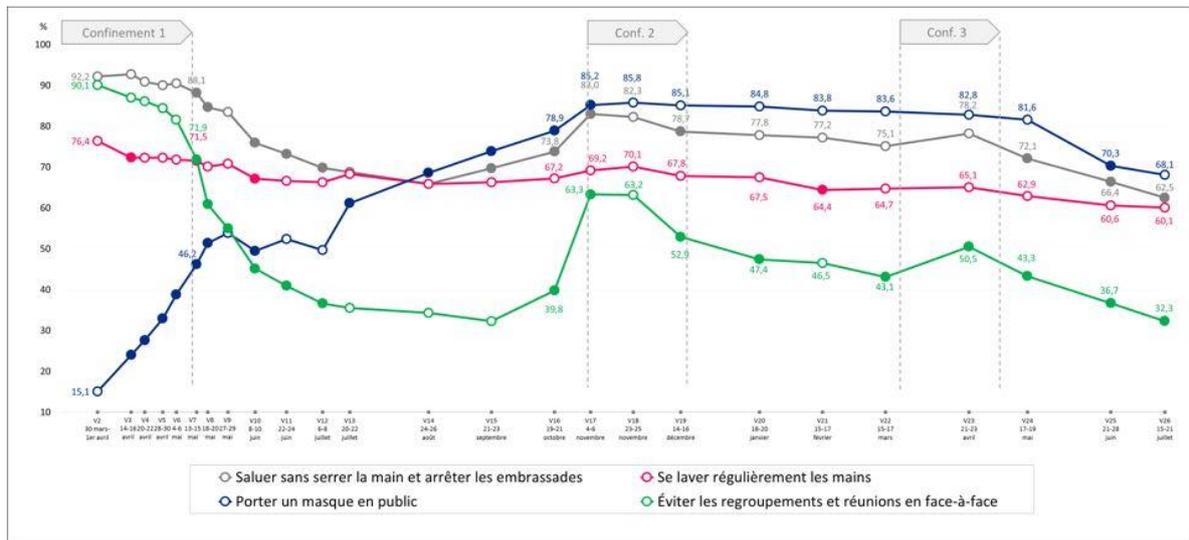
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_des_d%C3%A9partements_fran%C3%A7ais_class%C3%A9s_par_produit_int%C3%A9rieur_brut_par_habitant&oldid=173139855 (accessed August 5, 2020).

33. Nadeem AB. Socioeconomic conditions, government interventions and health outcomes during COVID19. *Covid Economics*. (2020) 37:141–6
34. Raboisson D, Lhermie G, Living With COVID-19: A Systemic and Multi-Criteria Approach to Enact Evidence-Based Health Policy. *Front. Public Health*, 16 June 2020 | doi: 0.3389/fpubh.2020.00294
35. Volz et al. Transmission of SARS-CoV-2 Lineage B.1.1.7 in England: Insights from linking epidemiological and genetic data. *medRxiv* 2020.12.30.20249034; doi: 10.1101/2020.12.30.20249034
36. CoviPrev : une enquête pour suivre l'évolution des comportements et de la santé mentale pendant l'épidémie de COVID-19 (August 19 2020) Available online at: <https://www.santepubliquefrance.fr/etudes-et-enquetes/coviprev-une-enquete-pour-suivre-l-evolution-des-comportements-et-de-la-sante-mentale-pendant-l-epidemie-de-covid-19?fbclid=IwAR3vHuZh70Fy7vqL2omCnuW7hQPcA-o5CBrAoWiHP9hLFcwTiFsBEo8ydrk#block-249165>
37. C. Tourette-Turgis, M. Chollier. Modifications des modes de vie et impact psychosocial du confinement lié à la COVID-19 - 05/02/21. Doi : 10.1016/j.mmm.2020.12.006
38. P. Charlier. Covid-19 et quelques problématiques éthiques en France. *Ethics Med Public Health*. 2020 July-September; 14: 100510. Published online 2020 avr. 4. French. doi: 10.1016/j.jemep.2020.100510

Annexes :



Annexe 1 : Cadre pour une politique d'intervention basée sur les données connues pour la COVID-19. Le rectangle central représente les différentes politiques pour la pandémie de COVID-19, supporté par un modèle épidémiologique et économique ex-ante. Les mesures prennent en compte les dimensions économiques, sociétales et de santé publique (à gauche) pour chaque sous-population (bulles), qui sont, les enfants, les adultes, les séniors et les différents groupes socio-professionnels. Les paramètres de rétrocontrôles sont basés sur des indicateurs de surveillance et vont aider à ajuster rapidement et précisément les mesures. Source : Raboisson D, Lhermie G, Living With COVID-19: A Systemic and Multi-Criteria Approach to Enact Evidence-Based Health Policy (34)



Annexe 2 : Fréquences de l'adoption systématique déclarée des mesures de prévention et évolutions (% pondérés). Enquête CoviPrev (vague 26 : 15 - 21 juillet 2021), France métropolitaine. Source : Santé Publique France (36)

Annexe 3 : Sites web de communiqués de presses faisant référence au modèle élaboré :

- <https://www.google.com/amp/s/www.ladepeche.fr/amp/2020/11/18/toulouse-une-etude-veterinaire-montre-que-le-confinement-cible-est-la-moins-mauvaise-des-solutions-9207513.php>
- <https://www.inrae.fr/actualites/approche-one-health-au-service-gestion-crise-sanitaire-covid-19-region-toulousaine>

AGREMENT SCIENTIFIQUE

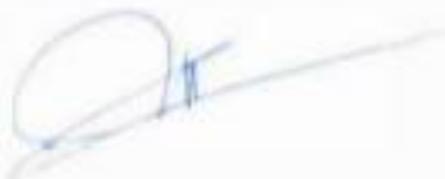
En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire

Je soussigné, Didier RABOISSON, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de **BORNET Rémy et MOUTIER LOUIS** intitulée « **Importance du comportement individuel dans l'établissement d'une stratégie de déconfinement face à la COVID-19 : mise en place d'une solution moyen-terme par une modélisation multidimensionnelle bioéconomique** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

Fait à Toulouse, le 07/09/2021
Enseignant-chercheur de l'Ecole Nationale
Vétérinaire de Toulouse
Professeur Didier RABOISSON



Vu :
Le Président du jury
Professeur Laurent MOLINIER



Vu :
Le Directeur de l'Ecole Nationale
Vétérinaire de Toulouse
M. Pierre SÉNÉ



Vu et autorisation de l'impression :
Le Président de l'Université Paul
Sabatier
Monsieur Jean-Marc BROTO
Par délégation, le Doyen de la faculté de
Médecine de Toulouse-Rangueil
Monsieur Elie SERRANO



M. BORNET Rémy et M. MOUTIER Louis
ont été admis sur concours respectivement en : 2015 et 2016
ont obtenu leur diplôme d'études fondamentales vétérinaires respectivement le : 31/08/2020 et 06/7/2020
ont validé leur année d'approfondissement respectivement le: 15/07/2021 et 10/06/2021
n'ont plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

AUTEURS : MOUTIER Louis et BORNET Rémy

TITRE : Importance du comportement individuel dans l'établissement d'une stratégie de déconfinement face à la COVID-19 : mise en place d'une solution moyen-terme par une modélisation multidimensionnelle bioéconomique

RESUME : Mi-2020, éradiquer la COVID-19 ne semble plus être une option, du moins sur le court-terme. Le défi pour les politiciens consiste alors à apporter une réponse appropriée dans le contrôle de l'épidémie et des pertes humaines associées, sans épuiser les services de santé, et en atténuant l'impact sur l'économie et sur le bien-être des individus. Pour retranscrire au mieux la complexité de l'équation entre les dimensions économiques, sociétales et de santé publique, nous avons développé un modèle d'optimisation bioéconomique multicritères. Nous avons construit un modèle d'évolution en temps discret structuré par classe d'âge en considérant trois types de populations principaux (les jeunes, les adultes et les personnes âgées) ainsi que 8 caractéristiques socio-professionnelles pour la population adulte. Quinze stratégies de déconfinement ont été simulées sur différentes situations adaptées au contexte de mi-2020 : déconfinement partiel brutal ou progressif (étalé sur 4 ou 8 semaines) suivi par un déconfinement total et définitif. Trois valeurs de taux de transmission (Tr) ont été considérées pour représenter le niveau de respect des gestes barrières. L'optimisation pour trouver la meilleure combinaison de scénarios et d'options réalisés sous la contrainte d'un coût total minimal suite à la perte de production due à la diminution d'activité et aux hospitalisations sur les court et moyen termes avec 3 critères retenus : la mortalité, le nombre de jours de confinement et la saturation des hôpitaux. Les résultats montrent clairement peu de différences entre les scénarios basés sur l'impact économique ou sur les 3 critères précédemment. Le modèle reste par contre très dépendant de la valeur de Tr . Les résultats de la modélisation montrent que la décision politique devrait davantage se concentrer sur les comportements individuels (représentés par la valeur Tr) plutôt que d'essayer d'optimiser la stratégie de confinement (définir qui est confiné et qui ne l'est pas). Pour une valeur Tr donnée, le choix des scénarios permet une certaine maîtrise du niveau de saturation des hôpitaux (intensité et durée), élément clé du système de santé public. Enfin, la modélisation souligne l'importance des politiques individuelles dans la gestion des problématiques engendrées par la COVID-19 via une meilleure compréhension des motivations comportementales individuelles et une recherche de moyens pour améliorer le respect des règles de biosécurité.

MOTS CLES : MODELE BIO ÉCONOMIQUE, SANTÉ PUBLIQUE, SIR, COVID-19, SIMULATION DE POLITIQUE SOCIALE

TITLE: Individual Behaviors and COVID-19 Lockdown Exit Strategy: A Mid-Term Multidimensional Bio-economic Modeling Approach

RESUME : Mid-2020, eradicating COVID-19 does not seem to be an option, at least in the short term. The challenge for policy makers consists of implementing a suitable approach to contain the outbreak and limit extra deaths without exhausting healthcare forces while mitigating the impact on the country's economy and on individuals' well-being. To better describe the trade-off between the economic, societal and public health dimensions, we developed an integrated bioeconomic optimization approach. We built a discrete age-structured model considering three main populations (youth, adults and seniors) and 8 socio-professional characteristics for the adults. Fifteen lockdown exit strategies were simulated for several options: abrupt or progressive (4 or 8 weeks) lockdown lift followed by total definitive transitory final unlocking. Three values of transmission rate (Tr) were considered to represent individuals' barrier gesture compliance. Optimization under constraint to find the best combination of scenarios and options was performed on the minimal total cost for production losses due to contracted activities and hospitalization in the short and mid-term, with 3 criteria: mortality, person-days locked and hospital saturation. The results clearly show little difference between the scenarios based on the economic impact or the 3 criteria. This means that policy makers should focus on individuals' behaviors (represented by the Tr value) more than on trying to optimize the lockdown strategy (defining who is unlocked and who is locked). For a given Tr , the choices of scenarios permit the management of the hospital saturation level with regard to both its intensity and its duration, which remains a key point for public health. The results highlight the need for behavioral or experimental economics to address COVID-19 issues through a better understanding of individual behavior motivations and the identification of ways to improve biosecurity compliance.

KEYWORDS : BIOECONOMIC MODEL, PUBLIC HEALTH, SIR, COVID-19, POLICY SIMULATION