



# Évaluation de l'impact de divers niveaux de détection des cas et de recherche des contacts sur la transmission de la COVID-19 au Canada pendant la levée des fermetures imposées à l'aide d'un modèle à compartiments dynamique

Antoinette Ludwig<sup>1\*</sup>, Philippe Berthiaume<sup>1</sup>, Heather Orpana<sup>2,3</sup>, Claude Nadeau<sup>4</sup>, Maikol Diasparra<sup>4</sup>, Joel Barnes<sup>4</sup>, Deirdre Hennessy<sup>4,5</sup>, Ainsley Otten<sup>4,6</sup>, Nicholas Ogden<sup>1</sup>

## Résumé

**Contexte :** La pandémie de coronavirus de 2019 (COVID-19) a commencé avec un agrégat de cas de pneumonie détectés à Wuhan, en Chine, en décembre 2019. La transmission endémique a été reconnue au Canada au début de février 2020. Il était donc urgent que les intervenants en santé publique aient accès à des outils robustes et fiables pour soutenir la prise de décisions en matière de gestion des épidémies. Le présent document vise à présenter l'un de ces outils – un modèle compartimental dynamique stratifié en fonction de l'âge élaboré par l'Agence de la santé publique du Canada en collaboration avec Statistique Canada – et à modéliser l'impact des interventions non pharmaceutiques sur le taux d'attaque des infections à la COVID-19 au Canada.

**Méthodes :** Ce modèle simule l'impact de niveaux variés d'interventions non pharmaceutiques, incluant la détection et l'isolement des cas, la recherche des contacts et la quarantaine ainsi que les changements de niveau de distanciation physique au Canada, alors que les fermetures imposées ont commencé à être levées en mai 2020.

**Résultats :** Ce modèle nous permet de souligner l'importance d'un niveau relativement élevé de détection et d'isolement des cas, ainsi que de la recherche et de la mise en quarantaine des personnes en contact avec ces cas, afin d'éviter une résurgence de l'épidémie au Canada à mesure que les fermetures imposées sont levées. Il faudra probablement aussi qu'un certain niveau de distanciation physique soit maintenu par le public.

**Conclusion :** Cette étude souligne l'importance d'appliquer une approche prudente lors de la levée des fermetures imposées dans cette deuxième phase de l'épidémie. Cette approche comprend des efforts de la santé publique pour recenser les cas et rechercher les contacts, ainsi que pour encourager les Canadiens à passer un test de dépistage s'ils risquent d'être infectés et à maintenir une distance physique dans les zones publiques.

**Citation proposée :** Ludwig A, Berthiaume P, Orpana H, Nadeau C, Diasparra M, Barnes J, Hennessy D, Otten A, Ogden N. Évaluation de l'impact de divers niveaux de détection des cas et de recherche des contacts sur la transmission de la COVID-19 au Canada pendant la levée des fermetures imposées à l'aide d'un modèle à compartiments dynamique. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2020;46(11/12):461–74.

<https://doi.org/10.14745/ccdr.v46i1112a08f>

**Mots-clés :** COVID-19, détection des cas, recherche des contacts, modèle à compartiments dynamique, Canada

## Introduction

La pandémie de coronavirus de 2019 (COVID-19) constitue une menace pour la santé mondiale à une échelle sans précédent

depuis un siècle. Les premiers cas d'un agrégat de cas de pneumonie à Wuhan, en Chine, ont été signalés à l'Organisation

Cette oeuvre est mise à la disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0



## Affiliations

<sup>1</sup> Division de la science des risques pour la santé publique, Agence de la santé publique du Canada, St-Hyacinthe, QC

<sup>2</sup> Centre de surveillance et de recherche appliquée, Agence de la santé publique du Canada, Ottawa, ON

<sup>3</sup> École d'épidémiologie, de santé publique, Université d'Ottawa, Ottawa, ON

<sup>4</sup> Division de l'analyse de la santé, Statistique Canada, Ottawa, ON

<sup>5</sup> Département de santé communautaire de la faculté de médecine, Université de Calgary, Calgary, AB

<sup>6</sup> Division de la science des risques pour la santé publique, Agence de la santé publique du Canada, Guelph, ON

## \*Correspondance :

[antoinette.ludwig@canada.ca](mailto:antoinette.ludwig@canada.ca)



mondiale de la santé (OMS) le 31 décembre 2019. La cause de l'écllosion a été attribuée le 7 janvier 2020 à un nouveau coronavirus (maintenant appelé coronavirus du syndrome respiratoire aigu sévère 2; SARS-CoV-2) (1). Des cas ont rapidement été détectés à l'extérieur de la Chine, le premier cas de COVID-19 ayant été identifié au Canada le 25 janvier 2020 chez un résident qui était revenu de Wuhan, en Chine (2,3). En date du 16 septembre 2020, il y avait 28,6 millions de cas confirmés de COVID-19, et plus de 900 000 décès dans le monde (4); au Canada, il y a eu 139 747 cas confirmés et 9 193 décès (3).

Un certain nombre de chercheurs ont élaboré des modèles dynamiques de transmission de la COVID-19 afin d'explorer les effets des interventions de santé publique pour les administrations canadiennes, y compris l'Ontario (5–7) et la Colombie-Britannique (des constatations semblables ont été observées dans les *communications personnelles*, Anderson et al. *Estimating the impact of COVID-19 control measures using a Bayesian model of physical distancing*. medRxiv 2020), alors que de nombreuses provinces et territoires ont publié les résultats de la modélisation de la COVID-19 (8–12). Compte tenu de la variation observée dans le niveau de risque de conséquences graves de la COVID-19 en fonction de l'âge (13,14), et de la nécessité de tenir compte des différences dans les taux de contact et de transmission entre les groupes d'âge (15,16), la structure selon l'âge est une considération importante pour les modèles dynamiques de COVID-19. Au début de juillet 2020, seules une minorité des modèles appliqués au Canada ou ses provinces présentés dans la littérature révisée par les pairs ou préimprimée sont stratifiés selon l'âge (des constatations semblables peuvent être trouvées dans les *communications personnelles*, Tuite et al. *Reduced COVID-19-Related Critical Illness and Death, and High Risk of Epidemic Resurgence, After Physical Distancing in Ontario, Canada*. medRxiv 2020).

Au Canada, les stratégies d'intervention en santé publique mises en place comprennent, entre autres, la distanciation physique (sociale), la détection et l'isolement des cas, la recherche des contacts et la quarantaine des contacts (16,17). Ces stratégies ont été mises en œuvre dans le but de ralentir la propagation de l'épidémie, de réduire la hauteur du pic de demande de soins de santé, de réduire la possibilité d'infection pour les personnes les plus à risque de graves conséquences de la maladie et de réduire le nombre total de décès (18). Afin de mettre en œuvre et d'optimiser des interventions efficaces, les décideurs au Canada ont besoin d'information sur l'incidence relative de ces mesures. Ils doivent également évaluer les scénarios de levée des fermetures imposées (e.g. les ordres de rester à domicile, les fermetures de lieux de travail, d'établissements d'enseignement et d'universités, qui peuvent avoir de graves répercussions économiques et non liées à la COVID-19), tout en évitant la résurgence de l'épidémie (souvent appelée « deuxième vague ») dans une population canadienne qui demeure en grande partie naïve à cette infection.

Les objectifs de la présente étude sont 1) de présenter un modèle compartimental dynamique stratifié en fonction de l'âge élaboré par l'Agence de la santé publique du Canada en collaboration avec Statistique Canada et 2) de modéliser l'impact des interventions non pharmaceutiques, y compris la détection et l'isolement des cas, la recherche des contacts et la mise en quarantaine, de même que les changements dans le niveau de distanciation physique associés à la levée des fermetures imposées sur le taux d'attaque des infections à la COVID-19 au Canada.

## Simulations de l'épidémie

### Présentation du modèle

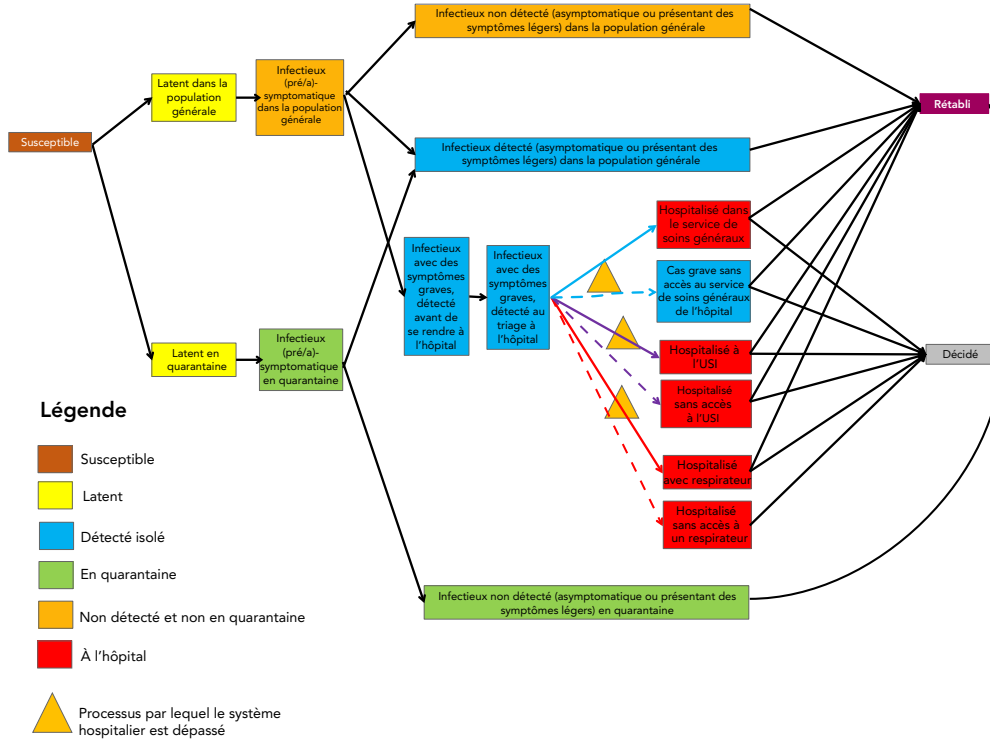
Un modèle compartimental déterministe dynamique a été élaboré et appliqué à la population canadienne stratifiée en six groupes d'âge, en utilisant les états infectieux possibles suivants pour les individus : susceptible, exposé, infectieux, rétabli. Les états du modèle sont présentés à la **figure 1**. La transmission entre les personnes peut se produire au sein d'un groupe d'âge ou entre les groupes d'âge à des taux influencés par le nombre de contacts quotidien, selon la matrice prévue pour le Canada par Prem et al. (19). On a supposé que les personnes en quarantaine interagissaient avec au plus une personne par jour pendant la quarantaine. Comme le modèle visait à explorer l'épidémie sur une courte période (730 jours), le modèle a été fondé sur une population confinée sans naissance ni décès non liés à la COVID-19, ainsi qu'une population composée de personnes susceptibles au début de l'épidémie. On a supposé que les personnes rétablies n'étaient pas vulnérables à une réinfection pendant la période visée par le modèle (730 jours). Le modèle supposait également que l'infectiosité des personnes contagieuses présymptomatiques qui deviennent symptomatiques était la même que celle des personnes symptomatiques, ainsi que celle des personnes qui sont restées asymptomatiques tout au long de l'infection. En supposant que tous les cas détectés étaient isolés, la détection des cas était assimilée à l'isolement de ses derniers (voir le **tableau 1**). Voir l'**annexe A** pour une description des flux de la population dans le modèle. Bien que le modèle comprenne des compartiments pour les hospitalisations, les admissions aux unités de soins intensifs (USI), les personnes à l'USI sous ventilateurs et les décès, le présent document présente les résultats du modèle pour le nombre de cas seulement. Les équations utilisées dans le modèle se trouvent à l'**annexe B**.

### Définition des paramètres et initialisation du modèle

Les simulations ont été effectuées pour l'ensemble de la population canadienne (N = 37 894 799 habitants), stratifiée en six groupes d'âge, comme le montrent le **tableau S1** et le **tableau S2** de l'annexe A (19,20) en assumant que la première transmission communautaire du SRAS-CoV-2 au Canada a eu lieu le 8 février 2020.



Figure 1 : Diagramme des états et des flux du modèle



Abréviation : USI, Unité de soins intensifs

L'état susceptible est présenté dans la case brune, les cases jaunes présentent les infections latentes, les cases bleues sont les cas détectés et isolés, les cases vertes sont les contacts en quarantaine, les cases orange présentent les cas non détectés qui ne sont pas mis en quarantaine ou isolés, les cases rouges sont les cas hospitalisés, la case mauve présente les cas rétablis et la case grise présente les décès. Les triangles orange indiquent les processus par lesquels les systèmes hospitaliers peuvent être surchargés si le besoin en services hospitaliers dépasse les ressources disponibles

Tableau 1 : Variation du taux d'attaque (au jour 730) pour différents niveaux de détection et d'isolement des cas, de recherche des contacts et de mise en quarantaine, et de distanciation physique, après le jour 88, soit le 4 mai 2020

Détection et isolement des cas	Recherche des contacts et mise en quarantaine					
	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
<b>Taux de contact réduit de 50 % après le jour 88</b>						
0,30	53,57	51,68	49,66	47,49	45,15	42,62
0,40	44,21	41,06	37,61	33,84	29,71	25,24
0,50	31,92	27,10	21,86	16,35	11,09	7,06 <sup>a</sup>
0,60	16,46	10,82	6,61 <sup>a</sup>	4,34 <sup>a</sup>	3,25 <sup>a</sup>	2,66 <sup>a</sup>
0,70	4,69 <sup>a</sup>	3,35 <sup>a</sup>	2,68 <sup>a</sup>	2,29 <sup>a</sup>	2,05 <sup>a</sup>	1,88 <sup>a</sup>
0,80	2,33 <sup>a</sup>	2,06 <sup>a</sup>	1,88 <sup>a</sup>	1,75 <sup>a</sup>	1,65 <sup>a</sup>	1,58 <sup>a</sup>
<b>Taux de contact réduit de 33 % après le jour 88</b>						
0,30	68,68	67,41	66,04	64,56	62,95	61,20
0,40	62,54	60,37	57,95	55,26	52,24	48,84
0,50	54,22	50,68	46,65	42,02	36,70	30,61
0,60	42,70	37,17	30,77	23,49	15,67	8,86 <sup>a</sup>
0,70	26,68	18,89	11,18	6,02 <sup>a</sup>	3,82 <sup>a</sup>	2,88 <sup>a</sup>
0,80	8,34 <sup>a</sup>	4,69 <sup>a</sup>	3,23 <sup>a</sup>	2,56 <sup>a</sup>	2,19 <sup>a</sup>	1,96 <sup>a</sup>

Tableau 1 : Variation du taux d'attaque (au jour 730) pour différents niveaux de détection et d'isolement des cas, de recherche des contacts et de mise en quarantaine, et de distanciation physique, après le jour 88, soit le 4 mai 2020 (suite)

Détection et isolement des cas	Recherche des contacts et mise en quarantaine					
	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
<b>Taux de contact réduit de 16,7 % après le jour 88</b>						
0,30	76,56	75,65	74,66	73,58	72,41	71,13
0,40	72,20	70,63	68,87	66,89	64,66	62,13
0,50	66,27	63,67	60,67	57,19	53,10	48,29
0,60	57,92	53,73	48,74	42,77	35,59	27,03
0,70	45,80	39,18	31,21	21,85	12,20	6,03 <sup>a</sup>
0,80	27,95	18,53	9,65 <sup>a</sup>	4,96 <sup>a</sup>	3,28 <sup>a</sup>	2,57 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Scénarios où la lutte contre l'épidémie a maintenu le taux d'attaque en dessous de 10 % (en vert)

Les valeurs des paramètres ont été établies en fonction des données observées pour le Canada (lorsqu'elles étaient disponibles) et des valeurs tirées de la littérature (voir le tableau S2 de l'annexe A), obtenues à l'aide d'une analyse de la littérature relative à la COVID-19 (publiée et prépubliée) effectuée quotidiennement par l'Agence de la santé publique

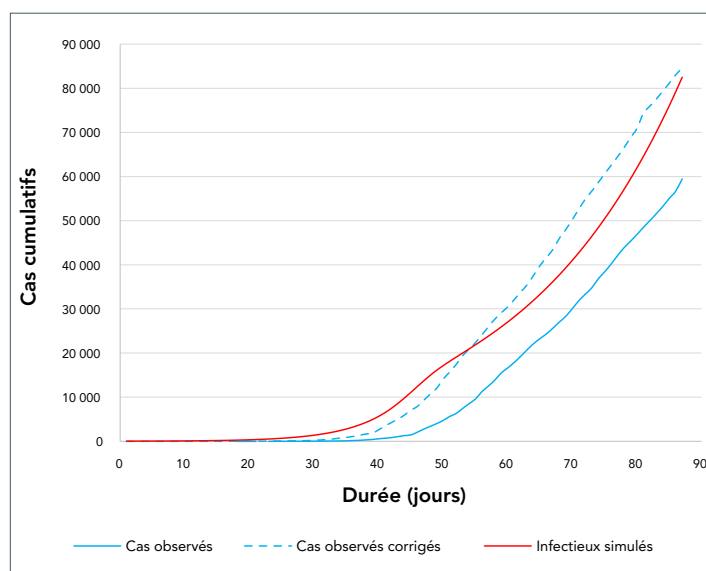


du Canada. Des recherches pour récupérer la documentation pertinente relative à la COVID-19 ont été effectuées dans Pubmed, Scopus, BioRxiv, MedRxiv, ArXiv, SSRN, Research Square et recoupées avec les documents de l'OMS sur la COVID-19 et des centres d'information sur la COVID-19 gérés par Lancet, BMJ, Elsevier et Wiley. La documentation comportant des résultats prioritaires pertinents a été déterminée à partir de l'analyse quotidienne et les valeurs des paramètres ont été inscrites dans un formulaire d'extraction de données. Les paramètres du modèle ont été réévalués chaque semaine en fonction des nouvelles recherches. Les sources de documentation ont été sélectionnées en fonction de la pertinence et de la qualité des publications. Les estimés ont été choisis de manière à refléter la valeur la plus probable en fonction des estimés minimaux et maximaux tirés d'études identifiées dans le cadre du processus d'analyse documentaire, en utilisant la géographie, la date de l'étude, la taille de l'échantillon et la population cible comme critères dans le choix de la documentation retenue. La priorité a été accordée aux estimés pour le Canada ou de pays semblables, aux estimés présentés dans des études plus récentes, ou dont les échantillons sont de plus grande taille et plus représentatifs.

On a obtenu une calibration simple de la probabilité de transmission réussie (bêta) du SRAS-CoV-2 d'une personne contagieuse à une personne non infectée lorsqu'elles entrent en contact (**figure 2**). Cela a été réalisé au moyen d'une démarche itérative dans le cadre de laquelle une courbe cible fondée sur les cas signalés du 8 février au 4 mai 2020 (21) a été comparée aux résultats de simulation pour la même période. La courbe cible a été obtenue en augmentant de 25 % le nombre observé (en supposant, les cas signalés sous-estiment de 25 % le nombre réel : *communication personnelle, Dougherty et al., le 15 septembre 2020*), et en déplaçant une semaine plus tôt la courbe dans son ensemble (en supposant que chaque cas a été signalé une semaine après l'apparition des symptômes). Le nombre de cas signalés dans la courbe cible et le nombre de cas simulés ont été comparés visuellement pour s'assurer que les valeurs des paramètres des simulations étaient raisonnables avant d'évaluer l'incidence des interventions non pharmaceutiques.

Les valeurs initiales pour chaque état du modèle ont été établies en fonction du nombre de cas signalés au Canada au 8 février 2020, soit sept cas. L'épidémie a été déclenchée avec 10 personnes infectieuses en période de latence, 20 personnes présymptomatiques et deux personnes présentant des symptômes bénins dans la population générale. Les valeurs ont été choisies pour être supérieures au nombre de cas observés afin de refléter à la fois la probabilité de sous-détection des cas, et le décalage entre le moment de l'exposition et celui de la détection et de la déclaration des cas. Toutes les autres variables d'état du modèle ont été initialement établies à zéro.

**Figure 2 : Comparaison des cas observés au Canada du 8 février (jour 1) au 4 mai 2020 (jour 88)**



Cas corrigés (en supposant une semaine de retard entre la détection et l'infection et un niveau de sous-déclaration de 25 %) correspondant à la courbe cible, et cas infectieux cumulatifs simulés dans le cadre du modèle stratifié selon l'âge

Le modèle a été mis en œuvre sous R à l'aide de RStudio, ainsi que des packages suivants : adaptivetau; deSolve; dplyr; DT; forcats; ggplot2; htmlwidgets; lhs; magrittr; openxlsx; plotly; readxl; scales; tidyr; et triangle. Le code peut être obtenu sur demande auprès des auteurs.

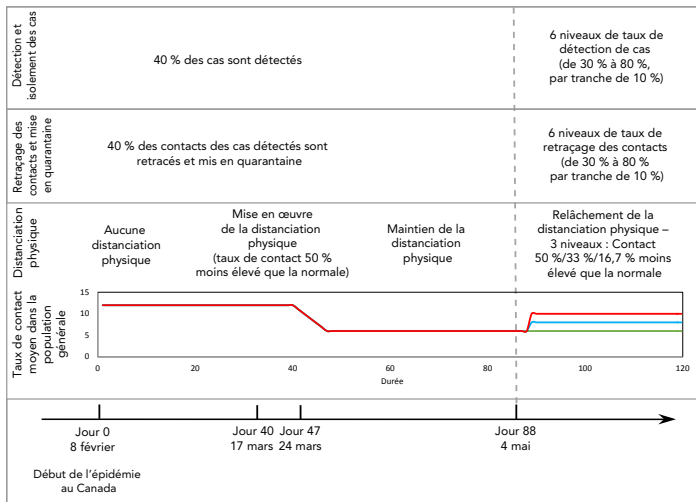
Aucune approbation en matière d'éthique n'a été requise puisque toutes les données étaient fondées sur des rapports de surveillance de l'Agence de la santé publique du Canada accessibles au public et des sources de documentation publiées.

## Simulations d'interventions non pharmaceutiques

Au total, 108 épidémies possibles ont été simulées pour évaluer l'impact de différents niveaux de détection et d'isolement des cas et de recherche des contacts et leur mise en quarantaine selon trois scénarios pour différents niveaux de taux de contact en raison de changements du niveau de distanciation physique à la suite de l'assouplissement des mesures de fermetures imposées en date du 4 mai 2020 (jour 88). Le protocole de l'étude est présenté à la **figure 3**. Du jour 0 au jour 88, les trois scénarios sont identiques et comportent des niveaux constants de détection et d'isolement des cas (taux conservateur de 40 % des cas détectés) et de recherche des contacts et mise en quarantaine (40 % trouvés et mis en quarantaine). Pendant cette période, la distanciation physique (donc les taux de contacts) a évolué de la façon suivante : 1) une période initiale de 40 jours pendant laquelle le niveau des contacts quotidiens correspondait à ce qui est normalement observé dans la population générale;



Figure 3 : Conception de l'étude de simulation montrant la période initiale de l'épidémie (avant le jour 88)



Pendant la mise en œuvre des mesures de distanciation physique, et tout au long de leur maintien, en présence d'un niveau uniforme de détection et d'isolement des cas et de recherche des contacts et de mise en quarantaine; et deuxième période d'épidémie (après le jour 88) avec différents niveaux de distanciation physique (rouge à 16,7 % de réduction du niveau des contacts habituels, bleu à 33 % et vert à 50 %), de détection des cas et de recherche des contacts

2) une période de sept jours au cours de laquelle le taux de contact quotidien a été progressivement réduit de 50 % afin de représenter la mise en œuvre de la distanciation physique associée au début de la mise en œuvre des fermetures imposées au Canada; et 3) une période de 40 jours (du jour 47 au jour 87) au cours de laquelle l'éloignement physique dû aux fermetures imposées a maintenu les taux de contact à 50 % sous les niveaux pré-COVID-19.

À partir du jour 88 (date de levée des fermetures imposées), il y avait trois scénarios pour la distanciation physique :

1) l'éloignement physique était maintenu, de sorte que les taux de contact demeuraient 50 % inférieurs aux niveaux antérieurs à la COVID-19 (i.e. que les fermetures imposées ne sont pas levées); alors que, dans les scénarios 2) et 3), la fermeture imposée était levée afin de permettre au taux de contact d'augmenter, respectivement, à 33 % ou à 16,7 % en dessous des niveaux pré-COVID-19 jusqu'à la fin de la simulation. Six niveaux de détection et d'isolement de cas (de 30 % à 80 % par intervalle de 10 %) et six niveaux de recherche des contacts et de mise en quarantaine (de 30 % à 80 % par intervalle de 10 %) ont été simulés pour chacun des trois scénarios de distanciation physique, pour un total de 108 simulations d'épidémies.

### Mesures des résultats

Le taux d'attaque était le résultat principal des expériences de simulation. Il s'agissait du nombre cumulatif de personnes infectées dans l'ensemble de la population initiale, pendant les 730 jours de l'épidémie ou à la fin de la période de simulation si l'épidémie n'était pas terminée. Des simulations de plus de deux ans ont été considérées comme irréalistes étant donné l'hypothèse que les personnes rétablies ne retournent pas à l'état

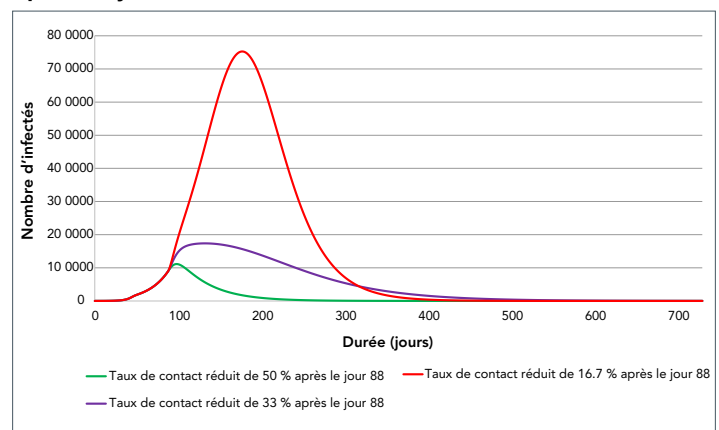
susceptible dans le cadre de la simulation. À l'heure actuelle, il n'y a pas suffisamment de données scientifiques probantes pour confirmer l'immunité après l'infection dans tous les cas de personnes rétablies, ou la durée de l'immunité que toute personne peut obtenir d'une infection à la COVID-19 (22–24). Les taux d'attaques inférieurs à 10 % ont été considérés comme correspondant à un état de « contrôle de l'épidémie » de COVID-19 au Canada. Sous ce seuil, le système de soins de santé était moins susceptible d'être submergé.

Une analyse de sensibilité du taux d'attaque à une augmentation ou une diminution du coefficient de transmission (bêta) de 10 % (à l'aide de la formule  $Sensibilité = ((V_i - V_0)/V_0) / ((T_i - T_0)/T_0)$ ) (25) a été effectuée, où  $V_0$  est le taux d'attaque sans modification des données d'entrée  $[T_0]$  et  $V_i$  est le taux d'attaque avec une augmentation ou une diminution des données d'entrée  $[T_i]$ .

### Résultats

Les taux d'attaque des 108 simulations sont présentés au tableau 1 et illustrés à la figure 4; le tableau et la figure montrent la manière dont la réduction du taux d'attaque a évolué en fonction des différents niveaux d'interventions non pharmaceutiques. Les résultats ont montré que l'assouplissement de la distanciation physique au jour 88 (40 jours après sa mise en œuvre) a eu un impact important sur le taux d'attaque dans toutes les épidémies simulées, le taux d'attaque variant entre 1,6 % et 76,6 %. L'ampleur de cet effet d'assouplissement de la distanciation physique était variable en fonction des valeurs des autres mesures de contrôle déjà en place; i.e. le taux de détection et d'isolement des cas et le taux de recherche des contacts et de mise en quarantaine. Un taux d'attaque inférieur à 10 %, qui était considéré ici comme une situation de contrôle de l'épidémie, était beaucoup plus fréquent lorsque le taux de contact était maintenu à 50 % sous la normale après le jour 88, comparativement à des niveaux plus faibles de distanciation physique.

Figure 4 : Simulation de l'épidémie pour trois scénarios après le jour 88, 4 mai 2020



Détection des cas/isolement à 70 %, recherche des contacts/quarantaine à 50 % et réduction du taux de contact à 50 %, 33 % ou 16,7 % sous les niveaux pré-épidémie. Les valeurs pour les jours précédant 88 sont décrites à la figure 3. L'axe des ordonnées représente toutes les personnes dans des états contagieux – présymptomatiques, symptomatiques (hospitalisées ou non) et asymptomatiques



De plus, un niveau de détection et d'isolement de 70 % ou plus a permis de maintenir sous contrôle les épidémies simulées à tous les niveaux de dépistage des contacts supérieurs à 30 % lorsque la distance physique est maintenue à 50 % sous les niveaux normaux. Toutefois, le niveau de détection des cas et du suivi des contacts requis pour contrôler l'épidémie augmentait de façon marquée si l'éloignement physique n'était pas maintenu pour réduire les taux de contact.

Les résultats suggéraient également que l'effet relatif de la détection ou de l'isolement des cas sur la diminution du taux d'attaque semble plus élevé que celui de la recherche des contacts. Même avec une recherche des contacts à des niveaux aussi élevés que 80 %, 50 % des cas ont dû être détectés pour contrôler l'épidémie lorsque l'éloignement physique a maintenu des taux de contact 50 % inférieurs aux niveaux pré-COVID-19. Un niveau encore plus élevé de détection de cas était requis lorsque la distanciation physique était levée de manière à permettre aux taux de contact d'augmenter à 16,7 % ou 33 % sous les niveaux pré-COVID-19.

L'analyse de sensibilité du bêta a montré que la variation moyenne en pourcentage du taux d'attaque était inférieure à 10 % dans la plupart des scénarios, augmentant avec l'augmentation du bêta (8,1 %; SD=9,2 %; données non présentées) et décroît avec une baisse du taux du bêta (4,1 %; SD=2,9 %). En augmentant la valeur de bêta, le nombre de combinaisons de détection de cas et de dépistage des contacts correspondant à un taux d'attaque de moins de 10 % diminuait de moitié (de 32 à 16), alors qu'en diminuant bêta, on observait une augmentation (de 32 à 43) du nombre de combinaisons qui donnaient lieu à un taux d'attaque inférieur à 10 % (voir l'annexe C).

## Discussion

### Résumé des principales constatations

Ce projet souligne, par ordre d'importance, qu'il sera nécessaire d'assurer un niveau relativement élevé de détection et d'isolement des cas et d'effectuer la recherche des contacts et de mettre en quarantaine les contacts potentiellement infectieux tout en maintenant une certaine distanciation physique personnelle pour éviter une résurgence de l'épidémie au Canada.

### Comparaison avec d'autres études

Ces résultats sont conformes aux travaux présentés dans Ogden *et al.* (26) et basés sur un modèle compartimental déterministe qui n'a pas été stratifié selon l'âge. De plus, des études semblables qui ont évalué l'incidence des interventions non pharmaceutiques pour l'ensemble du Canada, ou pour une province canadienne en particulier, ont abouti à des conclusions similaires (5,27,28) (des constatations similaires ont été observées dans les *communications personnelles suivantes* : Tuite *et al.* *Reduced COVID-19-Related Critical Illness and*

*Death, and High Risk of Epidemic Resurgence, After Physical Distancing in Ontario, Canada. medRxiv 2020 et Eastman et al. Mathematical modeling of COVID-19 containment strategies with considerations for limited medical resources. medRxiv. 2020).* Bien qu'une comparaison directe entre les résultats de différentes études soit difficile en raison des différences dans les détails de la conception de l'étude de modélisation (région visée par l'étude, date de début de l'épidémie, inclusion ou non de stochasticité et statistique de mesure de la flambée épidémique), toutes ces études ont conclu que le contrôle de l'épidémie exige une combinaison de trois éléments : 1) le maintien d'un certain niveau de distanciation physique (pendant au moins 10 mois selon Tuite *et al.*) (5); 2) une détection accrue des cas; et 3) la recherche des contacts et leur mise en quarantaine, afin de réduire au minimum le taux d'attaque.

### Forces et faiblesses

L'une des principales forces de cette étude est de fournir une évaluation claire de l'impact possible de la levée des fermetures imposées (représentée dans cette étude par la relâche des mesures de distanciation physique), qui a commencé dans de nombreuses régions au Canada vers la mi-mai 2020. Les résultats des expériences de simulation présentées dans le présent document ont démontré que, pendant la levée des fermetures imposées, les décideurs et les praticiens de la santé publique devront maintenir une vigilance continue pour éviter la résurgence de l'épidémie de COVID-19 (une « deuxième vague »), grâce au maintien d'un niveau élevé de détection des cas et de recherche des contacts et d'un certain niveau de distanciation physique. Une autre force de ce travail réside dans le fait que les états choisis pour le modèle sont exhaustifs et tiennent compte des principaux états infectieux possibles, y compris les états latents et présymptomatiques. De plus, le modèle intègre la structure par âge de la population canadienne, qui est un élément important de l'hétérogénéité du risque de transmission (29). Enfin, le fait de modéliser le niveau de détection des cas au lieu du ratio des cas asymptomatiques a permis de contourner la difficulté d'obtention d'estimés précis sur le nombre de cas asymptomatiques, ce qui est encore un défi pour la modélisation de la COVID-19.

L'une des faiblesses de cette étude, qui s'applique à la plupart des travaux de modélisation mathématique, est la difficulté pour les intervenants en santé publique de traduire les niveaux d'interventions non pharmaceutiques modélisés en leurs interventions correspondantes. Dans cette étude, nous avons utilisé les meilleures estimations disponibles au moment des analyses pour les valeurs des paramètres; toutefois, ces valeurs évoluent avec l'amélioration de la connaissance de la COVID-19. L'analyse de sensibilité préliminaire qui a été effectuée montre que les résultats sont relativement robustes et peu influencés par rapport aux changements observés dans le bêta (le coefficient de transmission); par conséquent, les valeurs de taux d'attaque obtenues ici peuvent être considérées comme illustrant le principe selon lequel une détection accrue des cas et une augmentation de la recherche des contacts, ainsi que le maintien



d'une certaine distanciation physique, seront nécessaires pour contrôler l'épidémie à mesure que les fermetures imposées seront levées.

De plus, le modèle ne tient pas compte du délais entre l'apparition des symptômes et la détection des cas ou entre la détection des cas et le retraçage des contacts et leur mise en quarantaine. Il est reconnu que ces délais existent et ont été signalés ailleurs dans le monde (30). Aux États-Unis et au Royaume-Uni, il a été démontré que ces délais sont sujets à des variations importantes selon la population étudiée, l'intensité des symptômes et la vulnérabilité de la personne, bien qu'aucune estimation publiée de ces retards ne soit encore disponible pour le Canada (*Communication personnelle, Lawless et al. Estimation of Symptomatic Case Counts and the COVID-19 Infection Curve Through Reporting Delay Adjustment: An Observational Study of Ontario Surveillance*).

Enfin, les matrices de contact utilisées sont le résultat de projections pour le Canada fondées sur des données provenant d'autres pays d'Europe et corrigées pour tenir compte des facteurs sociodémographiques et de santé (19). L'accès à des données réelles sur les taux de contact pour le Canada renforcerait certainement la robustesse et la représentativité des versions futures de ce modèle.

## Conséquences et prochaines étapes

Cette étude souligne l'importance de faire preuve de prudence quant à la levée des fermetures imposées. Il semble que le maintien d'un certain niveau de distanciation physique (e.g. par des limitations de la taille des rassemblements, le maintien d'une distanciation de deux mètres ou le maintien d'une bulle sociale) ou d'autres mesures non pharmaceutiques (comme le port de masques non médicaux) combinées à des niveaux élevés de détection des cas et de retraçage des contacts soient des composantes clés pour permettre le contrôle de l'épidémie. Dans ce contexte, il semble important de soutenir les stratégies visant à encourager les personnes à passer un test de dépistage lorsqu'elles ont pu être exposées à des cas soupçonnés ou confirmés de COVID-19, à respecter les consignes d'isolement ainsi que les stratégies qui soutiennent les mesures de protection personnelle, comme l'obligation d'utiliser des masques non médicaux dans les lieux publics intérieurs (31), afin de compenser le risque d'infection lié à l'augmentation de la proximité physique des citoyens associée à la réouverture.

## Conclusion

Cet article présente un modèle compartimental dynamique stratifié selon l'âge pour la transmission de la COVID-19 au Canada. Ces résultats fournissent des estimations de l'impact des interventions non pharmaceutiques, y compris la détection et l'isolement des cas, la recherche des contacts et leur mise en quarantaine, de même que les changements du niveau de distanciation physique, sur le taux d'attaque de la COVID-19, pendant une période commençant après la mi-mai 2020, lorsque la levée des fermetures imposées a commencé à l'échelle

nationale. Le modèle et les scénarios analysés démontrent que la détection et l'isolement des cas, ainsi que la recherche des contacts et leur mise en quarantaine, de même que des taux de contact réduits par une forme quelconque de distanciation physique, seront essentiels pour le contrôle futur de l'épidémie de COVID-19.

## Déclaration des auteurs

A. L., P. B. et N. O. — Conceptualisation  
A. L., P. B., A. O., H. O. — Conservation des données (valeurs des paramètres)  
A. L., P. B., C. N., D. H., J. B., M. D. — Analyse  
A. L., P. B., H. O. — Rédaction, première ébauche  
A. L., P. B., N. O., A. O., H. O., C. N., D. E., J. B., M. D. — Rédaction, examen et révision  
N. O. — Supervision  
A. L., P. B. — Ont contribué de façon égale à ce travail

## Intérêts concurrents

Aucun.

## Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier les membres de l'équipe de synthèse des connaissances de la Division de la science des risques pour la santé publique de l'Agence de la santé publique du Canada. Leurs analyses documentaires quotidiennes et leur synthèse des publications relatives au SRAS-CoV-2 ont contribué à la préparation rapide des travaux présentés ici.

## Financement

Ce travail a été soutenu par l'Agence de la santé publique du Canada.

## Références

1. World Health Organization. Novel coronavirus (2019-nCov) Weekly Epidemiological Update and Weekly Operational Update. September 14, 2020 Weekly Epidemiological Update. Geneva (Switzerland): WHO; 2020. [https://www.who.int/docs/default-source/coronavirus/situation-reports/20200914-weekly-epi-update-5.pdf?sfvrsn=cf929d04\\_2&download=true](https://www.who.int/docs/default-source/coronavirus/situation-reports/20200914-weekly-epi-update-5.pdf?sfvrsn=cf929d04_2&download=true)
2. Silverstein WK, Stroud L, Cleghorn GE, Leis JA. First imported case of 2019 novel coronavirus in Canada, presenting as mild pneumonia. *Lancet* 2020;395(10225):734. DOI PubMed



3. Agence de la santé publique du Canada. Maladie à coronavirus (COVID-19) : Mise à jour sur l'écllosion. Ottawa (ON) : ASPC; 2020 (accédé 2020-09-16). <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/2019-nouveau-coronavirus.html>
4. World Health Organization. Coronavirus disease (COVID-19): situation report,111. Geneva (Switzerland): WHO; 2020. [https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200510covid-19-sitrep-111.pdf?sfvrsn=1896976f\\_6](https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200510covid-19-sitrep-111.pdf?sfvrsn=1896976f_6)
5. Tuite AR, Fisman DN, Greer AL. Mathematical modelling of COVID-19 transmission and mitigation strategies in the population of Ontario, Canada. *CMAJ* 2020;192(19):E497–505. DOI PubMed
6. Shoukat A, Wells CR, Langley JM, Singer BH, Galvani AP, Moghadas SM. Projecting demand for critical care beds during COVID-19 outbreaks in Canada. *CMAJ* 2020;192(19):E489–96. DOI PubMed
7. Barrett K, Khan YA, Mac S, Ximenes R, Naimark DM, Sander B. Estimation of COVID-19-induced depletion of hospital resources in Ontario, Canada. *CMAJ* 2020;192(24):E640–6. DOI PubMed
8. Government of Alberta. COVID-19 info for Albertans. Edmonton (AB): Government of Alberta; 2020. <https://www.alberta.ca/coronavirus-info-for-albertans.aspx>
9. Saskatchewan Health Authority. SHA's Health System Readiness for COVID-19. Status Update. Regina (SK): Government of Saskatchewan; 2020. <https://www.saskhealthauthority.ca/news/stories/Pages/2020/April/SHA%E2%80%99s-Health-System-Readiness.aspx>
10. BC Centres for Disease Control. COVID-19: Where we are. Considerations for next steps. Vancouver (BC): Government of British Columbia; 2020. [https://news.gov.bc.ca/files/COVID19\\_Update\\_Modelling-DIGITAL.pdf](https://news.gov.bc.ca/files/COVID19_Update_Modelling-DIGITAL.pdf)
11. Government of Quebec. COVID-19 Potential Scenarios, April 13, 2020. Quebec (QC) : Government of Quebec; 2020. [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/sante/documents/Problemes\\_de\\_sante/covid-19/COVID\\_potential\\_scenarios.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/sante/documents/Problemes_de_sante/covid-19/COVID_potential_scenarios.pdf)
12. Gouvernement de l'Ontario. L'Ontario fait preuve d'une transparence totale en publiant une modélisation de l'évolution de la COVID-19; 2020. <https://news.ontario.ca/fr/release/56566/ontario-fait-preuve-dune-transparence-totale-en-publiant-une-modelisation-de-levolution-de-la-covid>
13. Guan WJ, Ni ZY, Hu Y, Liang WH, Ou CQ, He JX, Liu L, Shan H, Lei CL, Hui DS, Du B, Li LJ, Zeng G, Yuen KY, Chen RC, Tang CL, Wang T, Chen PY, Xiang J, Li SY, Wang JL, Liang ZJ, Peng YX, Wei L, Liu Y, Hu YH, Peng P, Wang JM, Liu JY, Chen Z, Li G, Zheng ZJ, Qiu SQ, Luo J, Ye CJ, Zhu SY, Zhong NS; China Medical Treatment Expert Group for Covid-19. Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China. *N Engl J Med* 2020;382(18):1708–20. DOI PubMed
14. Zhao ZY, Zhu YZ, Xu JW, Hu SX, Hu QQ, Lei Z, Rui J, Liu XC, Wang Y, Yang M, Luo L, Yu SS, Li J, Liu RY, Xie F, Su YY, Chiang YC, Zhao BH, Cui JA, Yin L, Su YH, Zhao QL, Gao LD, Chen TM. A five-compartment model of age-specific transmissibility of SARS-CoV-2. *Infect Dis Poverty* 2020;9(1):117. DOI PubMed
15. Davies NG, Klepac P, Liu Y, Prem K, Jit M, Eggo RM; CMMID COVID-19 working group. Age-dependent effects in the transmission and control of COVID-19 epidemics. *Nat Med* 2020;26(8):1205–11. DOI PubMed
16. Public Health Agency of Canada. COVID-19 in Canada: Using data and modelling to inform public health action. Ottawa: 2020. <https://www.canada.ca/content/dam/phac-aspc/documents/services/diseases/2019-novel-coronavirus-infection/using-data-modelling-inform-eng.pdf>
17. Agence de la santé publique du Canada. Plan d'intervention fédéral-provincial-territorial en matière de santé publique pour la gestion continue de la COVID-19. Ottawa; 25 août 2020. <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/2019-nouveau-coronavirus/document-orientation/plan-intervention-federal-provincial-territorial-matiere-sante-publique-gestion-continue-covid-19.html>
18. World Health Organization. Critical preparedness, readiness and response actions for COVID-19. Geneva (Switzerland): WHO; 2020. <https://www.who.int/publications/i/item/critical-preparedness-readiness-and-response-actions-for-covid-19>
19. Prem K, Cook AR, Jit M. Projecting social contact matrices in 152 countries using contact surveys and demographic data. *PLOS Comput Biol* 2017;13(9):e1005697. DOI PubMed
20. Statistiques Canada. Estimations démographiques trimestrielles Octobre à décembre 2019. Ottawa (ON) : Statistiques Canada (accédé 2020-05-13). <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/91-002-x/91-002-x2019004-fra.htm>
21. Agence de la santé publique du Canada. Maladie à coronavirus de 2019 (COVID-19) : Mise à jour quotidienne sur l'épidémiologie, 2020. Ottawa (ON) : ASPC; 2020. <https://sante-infobase.canada.ca/covid-19/resume-epidemiologique-cas-covid-19.html>
22. 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(6493):860–8. DOI PubMed
23. Papachristodoulou E, Kakoullis L, Parperis K, Panos G. Long-term and herd immunity against SARS-CoV-2: implications from current and past knowledge. *Pathog Dis* 2020;78(3):25. DOI PubMed
24. World Health Organization. "Immunity passports" in the context of COVID-19 (accédé 2020-07-10). <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/immunity-passport-s-in-the-context-of-covid-19>
25. Keeling MJ, Gilligan CA. Bubonic plague: a metapopulation model of a zoonosis. *Proc R Soc London Ser B Biol Sci.* 2000;267(1458):2219–30. DOI





26. Ogden NH, Fazil A, Arino J, Berthiaume P, Fisman DN, Greer AL, Ludwig A, Ng V, Tuite AR, Turgeon P, Waddell LA, Wu J. Modelling scenarios of the epidemic of COVID-19 in Canada. *Can Commun Dis Rep* 2020;46(8):198–204. [DOI PubMed](#)
27. Tang B, Scarabel F, Bragazzi NL, McCarthy Z, Glazer M, Xiao Y, Heffernan JM, Asgary A, Ogden NH, Wu J. De-Escalation by Reversing the Escalation with a Stronger Synergistic Package of Contact Tracing, Quarantine, Isolation and Personal Protection: Feasibility of Preventing a COVID-19 Rebound in Ontario, Canada, as a Case Study. *Biology (Basel)* 2020;9(5):100. [DOI PubMed](#)
28. Wu J, Tang B, Bragazzi NL, Nah K, McCarthy Z. Quantifying the role of social distancing, personal protection and case detection in mitigating COVID-19 outbreak in Ontario, Canada. *J Math Ind* 2020;10(1):15. [DOI PubMed](#)
29. Mishra S, Kwong JC, Chan AK, Baral SD. Understanding heterogeneity to inform the public health response to COVID-19 in Canada. *CMAJ* 2020;192(25):E684–5. [DOI PubMed](#)
30. Banatvala J. COVID-19 testing delays and pathology services in the UK. *Lancet* 2020;395(10240):1831. [DOI PubMed](#)
31. Perencevich EN, Diekema DJ, Edmond MB. Moving Personal Protective Equipment Into the Community: Face Shields and Containment of COVID-19. *JAMA* 2020;323(22):2252–3. [DOI PubMed](#)
32. Statistics Canada. Estimations de la population au 1er juillet, par âge et sexe. Tableau : 17-10-0005-01 Ottawa (ON): Statistiques Canada; 2020 (accédé 2020-05-13). [https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1710000501&request\\_locale=fr](https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1710000501&request_locale=fr)
33. Stilianakis NI, Drossinos Y. Dynamics of infectious disease transmission by inhalable respiratory droplets. *J R Soc Interface* 2010 Sep;7(50):1355–66. [DOI PubMed](#)
34. Li L, Yang Z, Dang Z, Meng C, Huang J, Meng H, Wang D, Chen G, Zhang J, Peng H, Shao Y. Propagation analysis and prediction of the COVID-19. *Infect Dis Model* 2020;5:282–92. [DOI PubMed](#)
35. He X, Lau EHY, Wu P, Deng X, Wang J, Hao X, Lau YC, Wong JY, Guan Y, Tan X, Mo X, Chen Y, Liao B, Chen W, Liao B, Weillie C, Hu F, Zhang Q, Zhong M, Wu Y, Zhao L, Zhang F, Cowling BJ, Li F, Leung GM. Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19. *Nat Med* 2020;26(5):672–5. [DOI PubMed](#)
36. Wölfel R, Corman VM, Guggemos W, Seilmaier M, Zange S, Müller MA, Niemeyer D, Jones TC, Vollmar P, Rothe C, Hoelscher M, Bleicker T, Brunink S, Schneider J, Ehmann R, Zwirgmaier K, Drosten C, Wendtner C. Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2196-x>
37. Khalili M, Karamouzian M, Nasiri N, Javadi S, Mirzazadeh A, Sharifi H. Epidemiological characteristics of COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Epidemiol Infect* 2020;148:e130–130. [DOI PubMed](#)
38. Mitra AR, Fergusson NA, Lloyd-Smith E, Wormsbecker A, Foster D, Karpov A, Crowe S, Haljan G, Chittock DR, Kanji HD, Sekhon MS, Griesdale DE. Baseline characteristics and outcomes of patients with COVID-19 admitted to intensive care units in Vancouver, Canada: a case series. *CMAJ* 2020;192(26):E694–701. [DOI PubMed](#)
39. Rees EM, Nightingale ES, Jafari Y, Waterlow NR, Clifford S, B Pearson CA, Group CW, Jombart T, Procter SR, Knight GM. COVID-19 length of hospital stay: a systematic review and data synthesis. *BMC Med* 2020;18(1):270. [DOI PubMed](#)
40. Argenziano MG, Bruce SL, Slater CL, Tiao JR, Baldwin MR, Barr RG, Chang BP, Chau KH, Choi JJ, Gavin N, Goyal P, Mills AM, Patel AA, Romney MS, Safford MM, Schluger NW, Sengupta S, Sobieszczyk ME, Zucker JE, Asadourian PA, Bell FM, Boyd R, Cohen MF, Colquhoun MI, Colville LA, de Jonge JH, Dershowitz LB, Dey SA, Eiseman KA, Girvin ZP, Goni DT, Harb AA, Herzik N, Householder S, Karaaslan LE, Lee H, Lieberman E, Ling A, Lu R, Shou AY, Sisti AC, Snow ZE, Sperring CP, Xiong Y, Zhou HW, Natarajan K, Hripcsak G, Chen R. Characterization and clinical course of 1000 patients with coronavirus disease 2019 in New York: retrospective case series. *BMJ* 2020;369:m1996. [DOI PubMed](#)



## Annexe A : Diagramme de flux du modèle, définitions des compartiments, définitions des paramètres et valeurs

De façon générale, les personnes naïves (état susceptible) entrent dans l'état d'infection latent soit en quarantaine (état Lq), soit pendant qu'ils font partie de la population générale (L). Après la période de latence, les personnes deviennent contagieuses sans développer de symptôme — pour les personnes qui développeront des symptômes, cela correspond à un état présymptomatique (état lq\_pres ou l\_pres selon que l'individu est mis en quarantaine ou non). Pour les personnes qui resteront asymptomatiques, l'état que nous appelons présymptomatique correspond tout simplement à la première phase de leur période infectieuse, jusqu'à ce qu'elles soient détectées, ou non. Après cet état, les personnes sont alors soit détectées (une fraction des personnes ayant des symptômes légers, les personnes asymptomatiques et toutes celles présentant des symptômes graves), soit non (la plupart des personnes asymptomatiques et une fraction de celles présentant des symptômes légers). Les personnes détectées présentant des symptômes légers ou asymptomatiques sont isolées à la maison, tandis que les personnes détectées présentant des symptômes plus graves entrent dans la section hospitalisation du modèle. Les individus non détectés, qui présentent des symptômes légers ou qui sont complètement asymptomatiques, ne sont pas isolés et sont considérés comme contribuant à l'épidémie tout au long de leur période infectieuse, moment auquel ils se rétablissent de l'infection. Une fois à l'hôpital, en fonction de la gravité, les personnes passent dans l'un des trois compartiments possibles : une unité générale non urgente, une unité de soins intensifs si c'est un cas grave, ou une unité des soins intensifs équipée de respirateurs pour les patients les plus critiques. Le modèle tient compte de l'impossibilité d'accéder aux soins adéquats pour les cas graves dans les cas où la capacité hospitalière est dépassée. Chaque cas grave peut mourir ou se rétablir. Les définitions des états se trouvent au **tableau S1**.

**Tableau S1 : Définitions et valeurs du modèle à compartiments**

État	Définitions	Valeurs initiales
S	Susceptible	Stratifié selon l'âge, estimés de la population par Stat Can au 1 <sup>er</sup> juillet 2019 (32) 3 982 527 personnes âgées de 0 à 10 ans 4 146 397 personnes âgées de 10 à 20 ans 10 286 131 personnes âgées de 20 à 40 ans 10 069 708 personnes âgées de 40 à 60 ans 6 315 255 personnes âgées de 60 à 75 ans 2 789 244 personnes âgées de 75 ans et plus

**Tableau S1 : Définitions et valeurs du modèle à compartiments (suite)**

État	Définitions	Valeurs initiales
L	Latent dans la population générale (pas en quarantaine)	10
Lq	Latent en quarantaine	0
l_pres	Présymptomatique infectieux dans la population générale (et première période infectieuse pour asymptomatique)	20
lq_pres	Présymptomatique infectieux en quarantaine (et première période infectieuse pour asymptomatique)	0
lqnd	Infectieux en quarantaine non détecté (asymptomatique ou symptômes légers)	0
lnd	Infectieux non détecté (asymptomatique ou symptômes légers) dans la population générale	2
ldam	Infectieux détecté asymptomatique ou présentant des symptômes légers dans la population générale	0
ldss	Infectieux détecté entre l'apparition des symptômes, qui sont sévères, et l'arrivée à l'hôpital	0
lss_hosp	Infectieux avec des symptômes graves au tri à l'hôpital	0
H_g_OK	Infectieux avec des symptômes graves qui reste à l'hôpital dans le service de soins généraux	0
H_ICU_OK	Infectieux avec des symptômes graves qui reste à l'hôpital à l'unité des soins intensifs	0
H_vent_OK	Infectieux avec des symptômes graves qui reste à l'hôpital avec ventilation	0
H_g_denied	Infectieux avec des symptômes graves qui ne peut pas accéder aux soins hospitaliers en raison d'une capacité locale insuffisante ou dépassée	0
H_ICU_denied	Infectieux avec des symptômes graves qui ne peut pas accéder à l'unité des soins intensifs en raison d'une capacité locale insuffisante ou dépassée	0
H_vent_denied	Infectieux avec des symptômes graves qui ne peut pas accéder à la ventilation en raison d'une capacité locale insuffisante ou dépassée	0
R	Rétabli	0
D	Décédé	0



Tableau S2 : Paramètres du modèle, définition, valeurs et données probantes

Nom du paramètre	Définition	Valeur	Données probantes																																																	
bêta	Probabilité de transmission en cas de contact avec une personne infectieuse	De 0 à 10 ans, valeur moyenne de 0,041 De 10 à 20 ans, valeur moyenne de 0,041 De 20 à 40 ans, valeur moyenne de 0,041 De 40 à 60 ans, valeur moyenne de 0,041 De 60 à 75 ans, valeur moyenne de 0,041 75 ans ou plus, valeur moyenne de 0,041	D'après Stilianakis <i>et al.</i> (33) et ajusté à l'aide de données du début de l'épidémie (figure 2 dans l'article)																																																	
lambda	Proportion de personnes exposées à des personnes infectées détectées qui ont fait l'objet d'une recherche des contacts et qui ont été mises en quarantaine (recherche des contacts et mise en quarantaine)	Valeur de 40 % jusqu'au jour 87 Du jour 88 jusqu'à la fin de l'épidémie, la valeur variait en fonction des scénarios de contrôle	s.o.																																																	
$c_{gg}$	Nombre de contacts quotidiens entre deux personnes de la population générale	Matrice 6*6 Valeur moyenne de 12,6 du jour 0 au jour 40 (voir <b>tableau S2.1</b> ci-dessous) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Groupe d'âge</th> <th>0-10</th> <th>10-20</th> <th>20-40</th> <th>40-60</th> <th>60-75</th> <th>75+</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-10</td> <td>4,60</td> <td>0,89</td> <td>2,59</td> <td>1,38</td> <td>0,34</td> <td>0,04</td> </tr> <tr> <td>10-20</td> <td>1,03</td> <td>0,61</td> <td>2,80</td> <td>2,45</td> <td>0,21</td> <td>0,03</td> </tr> <tr> <td>20-40</td> <td>1,15</td> <td>1,67</td> <td>8,18</td> <td>4,05</td> <td>0,35</td> <td>0,04</td> </tr> <tr> <td>40-60</td> <td>1,00</td> <td>2,17</td> <td>4,89</td> <td>5,83</td> <td>0,60</td> <td>0,07</td> </tr> <tr> <td>60-75</td> <td>0,63</td> <td>0,65</td> <td>1,89</td> <td>2,06</td> <td>1,98</td> <td>0,14</td> </tr> <tr> <td>75+</td> <td>0,45</td> <td>0,66</td> <td>0,84</td> <td>1,42</td> <td>0,77</td> <td>0,46</td> </tr> </tbody> </table> Diminution linéaire de 50 % par rapport aux jours 41 et 47 Valeur de 50 % inférieure à la normale du jour 48 au jour 87 Du jour 88 jusqu'à la fin de l'épidémie, la valeur variait en fonction des scénarios de contrôle	Groupe d'âge	0-10	10-20	20-40	40-60	60-75	75+	0-10	4,60	0,89	2,59	1,38	0,34	0,04	10-20	1,03	0,61	2,80	2,45	0,21	0,03	20-40	1,15	1,67	8,18	4,05	0,35	0,04	40-60	1,00	2,17	4,89	5,83	0,60	0,07	60-75	0,63	0,65	1,89	2,06	1,98	0,14	75+	0,45	0,66	0,84	1,42	0,77	0,46	D'après Prem <i>et al.</i> (19)
Groupe d'âge	0-10	10-20	20-40	40-60	60-75	75+																																														
0-10	4,60	0,89	2,59	1,38	0,34	0,04																																														
10-20	1,03	0,61	2,80	2,45	0,21	0,03																																														
20-40	1,15	1,67	8,18	4,05	0,35	0,04																																														
40-60	1,00	2,17	4,89	5,83	0,60	0,07																																														
60-75	0,63	0,65	1,89	2,06	1,98	0,14																																														
75+	0,45	0,66	0,84	1,42	0,77	0,46																																														
$c_{gq}$	Nombre de contacts quotidiens entre une personne de la population générale et une personne de la population en quarantaine	Matrice 6*6 identique pendant toute la durée de la simulation (voir <b>tableau S2.2</b> ci-dessous) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Groupe d'âge</th> <th>0-10</th> <th>10-20</th> <th>20-40</th> <th>40-60</th> <th>60-75</th> <th>75+</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-10</td> <td>0,47</td> <td>0,09</td> <td>0,26</td> <td>0,14</td> <td>0,03</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>10-20</td> <td>0,06</td> <td>0,61</td> <td>0,17</td> <td>0,15</td> <td>0,01</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>20-40</td> <td>0,07</td> <td>0,11</td> <td>0,53</td> <td>0,26</td> <td>0,02</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>40-60</td> <td>0,07</td> <td>0,15</td> <td>0,34</td> <td>0,40</td> <td>0,04</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>60-75</td> <td>0,09</td> <td>0,09</td> <td>0,26</td> <td>0,28</td> <td>0,27</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td>75+</td> <td>0,10</td> <td>0,14</td> <td>0,18</td> <td>0,31</td> <td>0,17</td> <td>0,10</td> </tr> </tbody> </table>	Groupe d'âge	0-10	10-20	20-40	40-60	60-75	75+	0-10	0,47	0,09	0,26	0,14	0,03	0,00	10-20	0,06	0,61	0,17	0,15	0,01	0,00	20-40	0,07	0,11	0,53	0,26	0,02	0,00	40-60	0,07	0,15	0,34	0,40	0,04	0,00	60-75	0,09	0,09	0,26	0,28	0,27	0,02	75+	0,10	0,14	0,18	0,31	0,17	0,10	Nous avons supposé qu'une personne en quarantaine est en contact avec un maximum d'une personne par jour pendant sa période de quarantaine. Cette valeur d'une personne a ensuite été normalisée en fonction de la taille de la population totale dans chaque groupe
Groupe d'âge	0-10	10-20	20-40	40-60	60-75	75+																																														
0-10	0,47	0,09	0,26	0,14	0,03	0,00																																														
10-20	0,06	0,61	0,17	0,15	0,01	0,00																																														
20-40	0,07	0,11	0,53	0,26	0,02	0,00																																														
40-60	0,07	0,15	0,34	0,40	0,04	0,00																																														
60-75	0,09	0,09	0,26	0,28	0,27	0,02																																														
75+	0,10	0,14	0,18	0,31	0,17	0,10																																														
20sigma	Période latente (jours)	4,12 jours	D'après Li <i>et al.</i> , 2020 (34)																																																	
delta	Proportion de cas infectieux présymptomatiques qui seront reconnus (ou détectés)	Valeur de 40 % jusqu'au jour 87 Du jour 88 et jusqu'à la fin de l'épidémie, la valeur variait en fonction des scénarios de contrôle	s.o.																																																	
alpha	Proportion de cas qui développent des symptômes graves	De 0 à 10 ans, valeur moyenne de 0,02 De 10 à 20 ans, valeur moyenne de 0,02 De 20 à 40 ans, valeur moyenne de 0,04 De 40 à 60 ans, valeur moyenne de 0,10 De 60 à 75 ans, valeur moyenne de 0,30 75 ans ou plus, valeur moyenne de 0,41	D'après l'Agence de la santé publique du Canada (21)																																																	
$t_{pres}$	Période comprise entre le début de la période infectieuse et l'apparition des symptômes chez les personnes qui présentent des symptômes OU première période infectieuse pour les personnes asymptomatiques	2 jours	D'après He <i>et al.</i> , 2020 (35)																																																	



Tableau S2 : Paramètres du modèle, définition, valeurs et données probantes (suite)

Nom du paramètre	Définition	Valeur	Données probantes
$t_{sm}$	Période entre l'apparition des symptômes et le rétablissement pour les cas présentant des symptômes légers OU deuxième période infectieuse pour les cas asymptomatiques	6 jours	D'après Wölfel et al., 2020 (36) et He et al., 2020 (35)
$t_{sph}$	Période entre l'apparition des symptômes pour les cas présentant des symptômes graves et leur prise en charge par le système de santé	3 jours	D'après Khalili et al., 2020 (37)
$p_{ICU}$	Proportion de cas hospitalisés qui ont besoin de soins intensifs à l'hôpital ou qui y ont recours	De 0 à 10 ans, valeur moyenne de 0,20 De 10 à 20 ans, valeur moyenne de 0,35 De 20 à 40 ans, valeur moyenne de 0,36 De 40 à 60 ans, valeur moyenne de 0,46 De 60 à 75 ans, valeur moyenne de 0,46 75 ans ou plus, valeur moyenne de 0,19	D'après l'Agence de la santé publique du Canada (21)
$p_{vent}$	Proportion de cas hospitalisés qui ont besoin de ventilation ou qui y ont recours (Vent)	0	Cette information sera mise à jour dans les modèles à venir une fois que les données propres à l'âge seront disponibles
$t_{sorting}$	Période de temps pour le tri des cas graves à l'hôpital (avant l'admission au service de soins généraux, à l'unité des soins intensifs ou Vent)	1 jour	Nous supposons qu'il faut en moyenne un jour entre le moment où un cas grave arrive à l'hôpital et le moment de son tri au service approprié
$m_g$	Taux de mortalité pour les cas graves à l'hôpital qui n'ont pas besoin de l'unité des soins intensifs ou de Vent (général)	De 0 à 10 ans, valeur moyenne de 0 De 10 à 20 ans, valeur moyenne de 0 De 20 à 40 ans, valeur moyenne de 0 De 40 à 60 ans, valeur moyenne de 0,02 De 60 à 75 ans, valeur moyenne de 0,14 75 ans ou plus, valeur moyenne de 0,34	D'après l'Agence de la santé publique du Canada (34)
$m_{ICU}$	Taux de mortalité pour les cas graves décédés à l'hôpital (unité des soins intensifs)	De 0 à 10 ans, valeur moyenne de 0 De 10 à 20 ans, valeur moyenne de 0 De 20 à 40 ans, valeur moyenne de 0,06 De 40 à 60 ans, valeur moyenne de 0,15 De 60 à 75 ans, valeur moyenne de 0,32 75 ans ou plus, valeur moyenne de 0,57	D'après l'Agence de la santé publique du Canada (34)
$m_{Vent}$	Taux de mortalité pour les cas graves décédés à l'hôpital (Vent)	s.o.	Non calibré parce que ce paramètre n'a aucune incidence sur les résultats (e.g. taux d'attaque) présentés dans cet article
$t_{hr}$	Période comprise entre le premier jour à l'hôpital après le tri et le rétablissement ou le décès	12 jours	En fonction de l'hospitalisation et de la durée du séjour des cas de COVID-19 (38–40)
$m_g$	Taux de mortalité pour les cas graves décédés à la maison parce qu'ils ne peuvent pas avoir accès aux soins hospitaliers	s.o.	Non calibré parce que ce paramètre n'a aucune incidence sur les résultats (e.g. taux d'attaque) présentés dans cet article
$m_{ICU}$	Taux de mortalité pour les cas graves décédés à l'hôpital parce qu'ils ne peuvent pas avoir accès à l'unité des soins intensifs	s.o.	Non calibré parce que ce paramètre n'a aucune incidence sur les résultats (e.g. taux d'attaque) présentés dans cet article



## Annexe B : Équations

$$dS / dt = - S * beta * 1/N * [(1-lambda * delta) * (c_{gg} * (l_{pres} + l_{nd}) + c_{gq} * (l_{q_{pres}} + l_{q_{nd}})) + lambda * delta * (c_{gg} * (l_{pres} + l_{nd}) + c_{gq} * (l_{q_{pres}} + l_{q_{nd}}))]$$

$$dLq / dt = S * beta * 1/N * lambda * delta * (c_{gg} * (l_{pres} + l_{nd}) + c_{gq} * (l_{q_{pres}} + l_{q_{nd}})) - Lq / sigma$$

$$dL / dt = S * beta * 1/N * (1-lambda * delta) * (c_{gg} * (l_{pres} + l_{nd}) + c_{gq} * (l_{q_{pres}} + l_{q_{nd}})) - L / sigma$$

$$dl_{pres} / dt = L / sigma - l_{pres} / t_{pres}$$

$$dl_{q_{pres}} / dt = Lq / sigma - l_{q_{pres}} / t_{pres}$$

$$dl_{q_{nd}} / dt = l_{q_{pres}} * (1-delta) / t_{pres} - l_{q_{nd}} / t_{sm}$$

$$dl_{nd} / dt = l_{pres} * (1-delta) / t_{pres} - l_{nd} / t_{sm}$$

$$dl_{dam} / dt = (l_{q_{pres}} + l_{pres}) * delta * (1-alpha) / t_{pres} - l_{dam} / t_{sm}$$

$$dl_{dss} / dt = (l_{q_{pres}} + l_{pres}) * (delta * alpha) / t_{pres} - l_{dss} / t_{sph}$$

$$dl_{ss_{hosp}} / dt = l_{dss} / t_{sph} - l_{ss_{hosp}} / t_{sorting}$$

$$dH_{g\_OK} / dt = l_{ss_{hosp}} * (1-p_{ICU}-p_{vent}) / t_{sorting} - H_{g\_OK} / t_{hr}$$

$$dH_{ICU\_OK} / dt = l_{ss_{hosp}} * p_{ICU} / t_{sorting} - H_{ICU\_OK} / t_{hr}$$

$$dH_{vent\_OK} / dt = l_{ss_{hosp}} * p_{vent} / t_{sorting} - H_{vent\_OK} / t_{hr}$$

$$dH_{g\_denied} / dt = 0 * l_{ss_{hosp}} * (1-p_{ICU}-p_{vent}) / t_{sorting} - H_{g\_denied} / t_{hr} \text{ où } 0 \text{ provient de la capacité infinie supposée.}$$

$$dH_{ICU\_denied} / dt = 0 * l_{ss_{hosp}} * (p_{ICU}) / t_{sorting} - H_{ICU\_denied} / t_{hr} \text{ où } 0 \text{ provient de la capacité infinie supposée}$$

$$dH_{vent\_denied} / dt = 0 * l_{ss_{hosp}} * (p_{vent}) / t_{sorting} - H_{vent\_denied} / t_{hr} \text{ où } 0 \text{ provient de la capacité infinie supposée}$$

$$dR / dt = l_{dam} / t_{sm} + l_{nd} / t_{sm} + l_{q_{nd}} / t_{sm} + H_{g\_OK} * (1-m_g) / t_{hr} + H_{g\_denied} * (1-m_g) / t_{hr} + H_{ICU\_OK} * (1-m_{ICU}) / t_{hr} + H_{ICU\_denied} * (1-m_{ICU}) / t_{hr} + H_{vent\_OK} * (1-m_{vent}) / t_{hr}$$

$$dD / dt = H_{g\_OK} * m_g / t_{hr} + H_{g\_denied} * m_g / t_{hr} + H_{ICU\_OK} * m_{ICU} / t_{hr} + H_{ICU\_denied} * m_{ICU} / t_{hr} + H_{vent\_OK} * m_{vent} / t_{hr} + H_{vent\_denied} / t_{hr}$$



## Annexe C : Analyse de sensibilité du bêta

Détection et isolement des cas	Recherche des contacts et mise en quarantaine					
	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
<b>Taux d'attaques pour un bêta 10 % plus élevé que prévu (bêta = 0,045)</b>						
<b>Le taux de contact est toujours réduit de 50 % après le jour 88</b>						
0,30	59,09352	57,4983	55,78916	53,9561	51,98852	49,87534
0,40	51,116	48,47224	45,58901	42,44803	39,03661	35,35465
0,50	40,72402	36,72655	32,39552	27,80149	23,12042	18,6755
0,60	27,68375	22,66857	17,92792	13,9703	11,07788	9,127013 <sup>a</sup>
0,70	14,67835	11,41256	9,222685 <sup>a</sup>	7,797606 <sup>a</sup>	6,846839 <sup>a</sup>	6,184861 <sup>a</sup>
0,80	7,997407 <sup>a</sup>	6,941327 <sup>a</sup>	6,220808 <sup>a</sup>	5,706796 <sup>a</sup>	5,325164 <sup>a</sup>	5,032136 <sup>a</sup>
<b>Taux de contact réduit de 33 % après le jour 88</b>						
0,30	72,12056	71,03947	69,87305	68,6118	67,24506	65,76064
0,40	66,84949	65,00664	62,96262	60,688	58,14878	55,30608
0,50	59,74349	56,76575	53,38173	49,5269	45,13509	40,15337
0,60	49,97753	45,37923	40,1135	34,16619	27,6911	21,21683
0,70	36,56815	30,14937	23,41448	17,23498	12,63568	9,755943 <sup>a</sup>
0,80	20,20915	14,69697	10,93404	8,667255 <sup>a</sup>	7,296874 <sup>a</sup>	6,418942 <sup>a</sup>
<b>Taux de contact réduit de 16,7 % après le jour 88</b>						
0,30	78,97424	78,18379	77,33041	76,40654	75,40348	74,31118
0,40	75,19535	73,84808	72,34734	70,66763	68,77832	66,64237
0,50	70,09167	67,88819	65,35466	62,42254	59,0075	55,00747
0,60	62,96743	59,44347	55,27892	50,33294	44,45665	37,55202
0,70	52,71792	47,23034	40,70934	33,12933	24,9225	17,4795
0,80	37,83963	30,13374	22,10612	15,33652	11,01025	8,593437 <sup>a</sup>
<b>Taux d'attaques pour un bêta de 10 % inférieur aux prévisions (bêta = 0,037)</b>						
<b>Le taux de contact est toujours réduit de 50 % après le jour 88</b>						
0,30	46,32687	44,1102	41,73141	39,17554	36,42638	33,46669
0,40	35,37861	31,69369	27,6635	23,2589	18,45491	13,23975
0,50	21,11151	15,51616	9,487262 <sup>a</sup>	4,352624 <sup>a</sup>	2,026998 <sup>a</sup>	1,268084 <sup>a</sup>
0,60	4,446911 <sup>a</sup>	1,925112 <sup>a</sup>	1,178985 <sup>a</sup>	0,892557 <sup>a</sup>	0,747114 <sup>a</sup>	0,659919 <sup>a</sup>
0,70	0,917685 <sup>a</sup>	0,750175 <sup>a</sup>	0,655133 <sup>a</sup>	0,594146 <sup>a</sup>	0,551763 <sup>a</sup>	0,520622 <sup>a</sup>
0,80	0,594963 <sup>a</sup>	0,550296 <sup>a</sup>	0,517993 <sup>a</sup>	0,493555 <sup>a</sup>	0,474428 <sup>a</sup>	0,459053 <sup>a</sup>
<b>Taux de contact réduit de 33 % après le jour 88</b>						
0,30	64,06551	62,56878	60,95033	59,19649	57,29164	55,21801
0,40	56,83411	54,26817	51,41448	48,22939	44,66162	40,65115
0,50	47,04398	42,87674	38,12076	32,67411	26,42855	19,2982
0,60	33,54144	27,06095	19,59878	11,19984	4,000164 <sup>a</sup>	1,648817 <sup>a</sup>
0,70	14,97949	6,498159 <sup>a</sup>	2,127114 <sup>a</sup>	1,165722 <sup>a</sup>	0,858549 <sup>a</sup>	0,713186 <sup>a</sup>
0,80	1,48164 <sup>a</sup>	0,962062 <sup>a</sup>	0,758895 <sup>a</sup>	0,652422 <sup>a</sup>	0,587167 <sup>a</sup>	0,543146 <sup>a</sup>
<b>Taux de contact réduit de 16,7 % après le jour 88</b>						
0,30	73,32151	72,24328	71,07465	69,80463	68,42056	66,90782
0,40	68,1969	66,33559	64,25373	61,91416	59,27188	56,27203
0,50	61,2006	58,12787	54,57939	50,45286	45,61944	39,91796
0,60	51,36095	46,40851	40,51931	33,46741	25,00128	14,98944
0,70	37,11735	29,3243	19,98326	9,323668 <sup>a</sup>	2,537434 <sup>a</sup>	1,234962 <sup>a</sup>
0,80	16,33694	6,198483 <sup>a</sup>	1,832707 <sup>a</sup>	1,050737 <sup>a</sup>	0,794449 <sup>a</sup>	0,670077 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Scénarios où l'on parvient à contrôler l'épidémie (taux d'attaque inférieur à 0,10) (en vert)