

Préface de Franck Varenne (page 3)

Remerciements (page 11)

INTRODUCTION (page 13)

Une crise inédite

CHAPITRE 1 (page 13)

**Explication des mécanismes de diffusion:
analyse d'un modèle (un peu trop ?) simple**

- 1] Modèle agents de diffusion
- 2] Modéliser la diffusion et l'impact de la Covid-19:
la version KISS
- 3] Méthodes pour contrer la diffusion mécanique

CHAPITRE 2 (page 33)

**Un modèle utilisé pour la décision publique:
«le modèle de l'Imperial College»**

- 1] Population synthétique
- 2] Un modèle SIR probabiliste
- 3] Les «données» par temps de Covid-19?
- 4] Les alternatives politiques et leur représentation dans un modèle
- 5] L'humilité et la diversité des points de vue: une solution?

INTERMÈDE (page 47)

**Apports des modèles agents en général
et pour la Covid-19 en particulier**

CHAPITRE 3 (page 55)

**L'influence du réseau d'interactions
dans la propagation du virus**

- 1] «Distanciation sociale»: agir sur les relations contaminantes

- 2] Le modèle
- 3] Les formes de réseaux
 - 3.1] Réseau complet
 - 3.2] Réseau aléatoire
 - 3.3] Réseau à forte densité locale
 - 3.4] Réseau de type *small world* («petit monde»)
- 4] Formes des réseaux et confinement
 - 4.1] Réduire les contacts
 - 4.2] Gagner du temps?!
 - 4.3] Et si la contagiosité augmente?
 - 4.4] Se «confiner ensemble», une bonne idée?
- 5] Extensions
 - 5.1] «Spatialisation» du réseau
 - 5.2] Modéliser la mobilité
- 6] Conclusion

CHAPITRE 4 (page 87)

Confinement ciblé ou confinement aveugle : qu'est-ce que l'efficacité dans la gestion d'une épidémie ?

- 1] Le modèle
- 2] Deux cas extrêmes
- 3] Tous raisonnables?
- 4] Savoir que l'on est malade
- 5] L'importance de la temporalité
- 6] Doit-on rester confiné quand on est guéri?
- 7] Comparer le confinement ciblé aux autres options?

CHAPITRE 5 (page 107)

Tester le «protocole IHU» en fonction des incertitudes : proposition d'un modèle par «parcours de maladie»

- 1] Étudier un protocole de soin dans un contexte épidémique
- 2] Parcours plutôt qu'état
- 3] Les alternatives politiques et les observables
- 4] Quelques résultats schématiques
- 5] Conclusion

Conclusion (page 129)

- 1] Quelques résultats sur lesquels rebondir
- 2] Une expertise basée sur une prédiction?

Glossaire (page 135)**Bibliographie** (page 141)

Préface de Franck Varenne

Université de Rouen Normandie

UFR LSH, Département de philosophie, Laboratoire ERIAC (EA 4705)

A lors qu'au printemps 2020, la Covid-19 sidère le monde entier, plusieurs communautés de chercheurs entrent en ébullition. À côté, bien entendu, de celles des virologues et des épidémiologistes, envoyées en première ligne, celle des modélisateurs a été particulièrement sollicitée. Les concepteurs de modèles sont aujourd'hui encore fortement mis à contribution pour aider à lutter contre cette maladie et ses effets. On demande beaucoup de choses à leurs modèles : tout à la fois de prédire et d'expliquer – rapidement qui plus est – la diffusion de la maladie, mais aussi d'aider à la décision ou de préconiser des politiques publiques qui permettront de la juguler avec, pour bilan final, le moins de maux humains, sociaux et économiques possible. Mais les modèles peuvent-ils réellement assurer toutes ces fonctions, parfois si contradictoires : expliquer, prédire, préconiser, aider à la décision (politique, sociale) ? Dans quelle mesure y réussissent-ils ou y échouent-ils ? Que peuvent-ils au fond ? Et ce qu'ils peuvent, le peuvent-ils dans l'urgence ?

Au plus fort de la crise, les spécialistes s'interrogeaient précisément : quelles hypothèses, quelles approches, quels formalismes fallait-il privilégier étant donné les conditions particulières – pour tout dire uniques en termes d'urgence et de déficit d'informations – de l'exercice demandé ? Pouvait-on réel-

lement produire des modèles prédictifs sérieux sur la base des connaissances disponibles? Dès lors, le fait même d'accepter de construire et de proposer des modèles dans ces piètres conditions n'allait-il pas constituer en soi une escroquerie et comme une grave atteinte à l'éthique ordinaire des pratiques scientifiques? Les débats ont fait rage dans plusieurs communautés de modélisateurs, tandis que des propositions nombreuses étaient tout de même rapidement publiées et que des instances politiques s'entouraient déjà de certains modélisateurs et de certains modèles pour légitimer des politiques publiques (fermetures des frontières, des lieux publics, confinements, etc.).

Pour une épistémologie appliquée de la modélisation, nous avons donc là un cas d'école, avec ses initiatives, ses prises de position méthodologique, ses controverses, mais aussi ses mélanges entre quête de savoir et désir d'utilité, si ce n'est de pouvoir ou de gloire: cette expérience épistémologique se déroulait sous nos yeux, mais aussi grandeur nature, au sens où nous étions tous aussi en quelque sorte dans le modèle, au titre d'agents modélisés, citoyens confinés que nous étions. Comme observateur de longue date de la communauté des modélisateurs en sciences sociales¹, il se trouve que j'ai pu lire, croiser et apprécier en temps réel certains de ses débats et certaines de ses publications. L'intérêt et la valeur de ces contributions, très nombreuses mais souvent informelles sur le moment, m'ont rapidement semblé considérables. Et j'ai donc formé le vœu, dès avril 2020, que certains des protagonistes qui le pouvaient et le souhaitaient composent un livre de réflexion méthodologique à chaud, mais qui apporterait aussi le recul dont le grand public cultivé a besoin. Juliette Rouchier et Victorien Barbet ont répondu présents et ils ont pris le temps de produire le livre que vous avez entre les mains: un ouvrage

[1] *Ndé*: et d'autres domaines, comme l'atteste le livre collectif codirigé par Franck Varenne, *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation* (2 tomes, 3 volumes, 1750 pages), Éditions Matériologiques, 2013 et 2014.

dont on verra qu'il est très accessible, progressif, articulé, cohérent et, *last but not least*, doté d'un glossaire fort utile.

Je n'ai donc pas été déçu du résultat. Voilà un livre comme on pouvait l'espérer. Centré sur la Covid-19 et sur sa diffusion, il s'installe au cœur de questions brûlantes, encore urgentes pour tout un chacun, mais il garde aussi la tête froide, prend du recul, informe, enseigne et questionne, qui plus est de façon pédagogique. Davantage : au-delà du bilan critique, il propose des perspectives inédites, voire quelques suggestions solides. Il nous donne à réfléchir sur des chemins moins balisés. À le lire, on comprendra, par l'exemple, pourquoi un modèle ne peut assurer simultanément toutes les fonctions de connaissance qu'on en peut attendre (décrire, prédire, expliquer, etc.). On comprendra pourquoi il faut souvent des modèles simples mais aussi, dans certains cas, des modèles nécessairement plus compliqués. On comprendra également pourquoi il faut cultiver une pluralité de modèles, toujours dans la collégialité, souvent dans l'interdisciplinarité : non seulement pour que ces modèles prennent en compte plusieurs aspects, mais aussi pour que leurs diverses fonctions puissent entrer en dialogue, et enfin pour qu'ils s'épaulent, convergent ou se rectifient, en particulier là où l'on attend d'eux qu'ils mettent au jour des propriétés structurelles robustes, les seules offrant en retour une prise à l'action et à la décision légitimes. On comprendra enfin que la disponibilité de données à la fois pertinentes et stabilisées est un point d'achoppement majeur, dans les circonstances, tant il est discutable de paramétrer un modèle de diffusion de la Covid-19 avec les paramètres de la grippe simplement parce qu'ils sont mieux connus.

De fait, au-delà de l'objet Covid-19, cet ouvrage a un horizon plus large : pour aborder toutes ces questions, il introduit à des considérations tout à fait générales touchant à la pratique de la modélisation et de la simulation à agents, en particulier pour tout type de phénomènes de diffusion : nouvelles techniques, innovations sociales de tous ordres, comportements,

croyances, opinions, informations, mais aussi virus donc. Fort de ses analyses d'exemples, de ses nombreuses figures explicatives et de ses considérations méthodologiques associées, il munit également ses lecteurs d'une grille de lecture critique contre les fréquents abus de la mise en vedette des modèles, par les médias certes mais aussi parfois par les scientifiques eux-mêmes. Un livre nécessaire et salutaire donc.

Ce n'est pas l'objet d'une préface de rendre compte de toutes les idées ni de toutes les perspectives auxquelles l'ouvrage aboutit. Et elles sont ici nombreuses. Pour finir donc en quelques mots, j'évoquerai seulement quelques idées qui m'ont paru importantes. Tout d'abord, ce livre est certes pédagogique mais il enseigne d'entrée la vigilance précisément à ce sujet : il part d'une analyse critique d'une publication de modèle simplifié qui se voulait elle-même pédagogique. C'est une façon de montrer qu'un modèle publié, surtout s'il est simple et s'il semble aller de soi, peut beaucoup pour manipuler ou, tout au moins, pour contenir nos idées dans des lieux communs qui plaisent ou conviennent à tous ou quelques-uns. C'est qu'un modèle, surtout en sciences sociales, n'est pas seulement doté d'une fonction de connaissance : il vient toujours aussi avec des usages rhétoriques qui viennent redoubler ou parfois occulter sa fonction de connaissance première². Certains modèles sont ainsi conçus, dès le départ, non seulement pour apprendre mais aussi pour rendre acceptables au public les conclusions auxquelles ils nous conduisent³. De fait, un modèle de prédiction d'épidémie qui sera

[2] Contrairement à ce qu'on lit parfois dans certaines analyses rapides des pratiques de modélisation, il y a lieu de distinguer fonction et usage des modèles et de maintenir la distinction. Fonction de connaissance et usage rhétorique d'un modèle sont certes articulés mais ne se réduisent pas l'un à l'autre, comme j'ai tâché de le montrer ailleurs, notamment dans Frank Varenne, *Théories et modèles en sciences humaines. Le cas de la géographie*, Paris, Éditions Matériologiques, 2017.

[3] Et cette conjonction n'est pas toujours un mal : les auteurs citent opportunément le cas de la modélisation d'accompagnement (celle mise en œuvre par exemple par le collectif Commod) qui, pour des raisons d'acceptabilité mais aussi d'éthique, prend soin de maintenir dans la boucle les porteurs d'enjeux

utilisé ensuite pour mobiliser une population et la convaincre de l'urgence à suivre les directives auxquelles ses résultats incitent, ne devra pas seulement être un modèle prédictif ou cherchant à l'être. Il faudra qu'à la pertinence il ajoute la ressemblance pour que l'identification et l'acceptabilité s'ensuivent. Or pertinence et ressemblance, comme le montrent bien ici Juliette Rouchier et Victorien Barbet, sur un cas d'espèce poussé au paroxysme par les circonstances que l'on connaît, ne font pas aisément bon ménage. Trop de détails accroissent certes la ressemblance mais rendent souvent un modèle peu robuste : ses résultats peuvent se montrer très sensibles à des variations de valeurs de paramètres, variations qui, préalablement à la simulation effective, pouvaient pourtant nous sembler de peu de poids.

Car, en réalité, il est bien difficile de trouver des propriétés structurelles – autre idée importante – qui autoriseront ensuite à expliquer voire à prédire, y compris seulement dans les grandes lignes : il faut pour cela multiplier les modèles et, pour un même modèle, multiplier les simulations en faisant opérer chaque fois le caractère aléatoire de certains paramètres. En outre, chaque modèle devrait être accompagné de ses hypothèses, ce qui est rarement le cas, y compris dans les publications techniques, comme le notent les auteurs, en partie parce que les hypothèses sont en réalité très nombreuses et touchent à de nombreux cofacteurs possibles. Vient alors, en complément de cette idée d'une nécessaire explicitation des hypothèses, l'expression bien choisie de « spectre de pertinence du modèle » : chaque modèle a son spectre de pertinence concernant une fonction précise de connaissance (ou deux, rarement plus). Il faut sans cesse rappeler ces limitations et en prendre conscience.

Un autre apport majeur de cet ouvrage réside dans sa capacité à mettre en lumière puis à faire s'entrecroiser, spécifi-

modélisés comme de maintenir explicables et compréhensibles pour eux les modèles, en particulier lorsque la modélisation vise à régler des problèmes d'interactions socio-environnementales pour lesquels les agents auront à se mobiliser pour mettre en œuvre la solution alternative suggérée par le modèle.

quement dans des modèles à agents informatiques, des facteurs très hétérogènes dont on pressent qu'ils interviennent et interagissent probablement dans le phénomène considéré : vie sociale des agents (fréquence des rencontres, déplacements), géographie (carte de distribution et des distances), taille du groupe des personnes rencontrées (réseaux), topologie de ces réseaux (connectés ou pas, etc.), temporalités (des rencontres, de l'incubation, de la contagiosité, de la quarantaine), sévérité du confinement (aveugle, ciblé). On imagine bien que ces facteurs se modulent et se contrôlent le plus souvent les uns les autres, parfois à des intensités comparables. Les simulations confirment souvent ce fait, bien que pas toujours : d'où se révèle clairement, aux yeux du lecteur qui pouvait encore en douter, la grande difficulté effective qu'il y a à choisir correctement ses hypothèses, c'est-à-dire à choisir les facteurs que l'on va négliger par hypothèse, de façon à tendre vers la robustesse d'un comportement structurel. C'est un des atouts pédagogiques considérables de ce livre que de parvenir à nous faire toucher du doigt le caractère non intuitif et non évident de ce qui devrait ou pourrait être négligé dans tout cet ensemble de cofacteurs supposés. On y voit toutefois que des stratégies de résolution existent : les expériences de simulation permettent justement d'y voir un peu plus clair et orientent – mais *a posteriori* – vers des hypothèses réfutant ou corroborant certaines premières analyses, par un jeu d'allers-retours entre simulation de modèle et conception de modèle. Par ailleurs, ne l'oublions pas : les implémentations de modèles elles-mêmes doivent être vérifiées, dès le départ. C'est le rôle de ces simulations spécifiques que les auteurs nomment « tautologiques » : on y vérifie que le modèle, dans une première version simple conduit à des résultats computationnels que le cerveau humain non aidé peut retrouver également. Mais on y vérifie par la même occasion que le comportement de base du modèle auquel on s'attendait (et pour lequel on l'avait choisi) se confirme bien comme on le souhaitait. On s'assure par-là (vérification d'im-

plémentation du modèle, confirmation du principe de base du modèle) d'une certaine confiance en le principe à la fois général et opérationnel du modèle initial. Seulement alors pourra-t-on s'autoriser à le complexifier, par paliers et prudemment.

Mais les auteurs proposent davantage encore que des explorations et des recommandations méthodologiques particulièrement valables en contexte d'urgence ; ce qui à soi seul aura déjà justifié l'existence de ce livre. Ils font des suggestions inédites et proposent de nouveaux modèles. Ils implémentent pour la première fois, dans le dernier chapitre, une notion que Juliette Rouchier a proposé d'introduire afin de rendre compte commodément des devenir différenciés des agents touchés par la Covid-19 : la notion de « parcours de maladie ». Cette notion est aisément prise en compte par la modélisation à agents mais elle a aussi et surtout le bon goût de pouvoir être nourrie par des données existantes et accessibles concernant les personnes atteintes par le virus. En internalisant en quelque sorte la certaine logique temporelle du devenir de la maladie de chaque agent atteint dans ce qui représente cet agent dans le modèle, le calcul peut se concentrer sur des phénomènes d'interaction et de ciblage que l'on peut donc en retour complexifier. Ainsi, on peut tester des politiques de soin non binaires (adaptées en la circonstance car il n'y a pas encore de médicament efficace), relativement complexes et dont les conséquences globales sont encore plus rétives à toute anticipation par notre cerveau humain non aidé. C'est le cas des médications qui semblent uniquement permettre de diminuer le portage viral. Cette médication est proposée à condition que les personnes soient testées. Cette nouvelle notion permet de mettre en scène plusieurs séquences à scénarios différenciés : test, confinement ciblé et traitement, modification en conséquence des séquences temporelles du devenir du malade dans son parcours de maladie, etc.

Bref, avec l'exposé de ses richesses, de ses potentialités, de ses limitations mais aussi de ses stratégies de résolution, les

auteurs nous montrent magistralement, par l'exemple là encore, toute la puissance de la modélisation par agents et toute l'étendue des questions qu'elle permet de poser de façon précise et outillée. Il faut aussi le noter : du fait de sa souplesse formelle qui la rend plus faiblement prescriptive d'un point de vue ontologique que d'autres types de formalisation mathématique, la modélisation à agents nous révèle d'abord l'étendue de notre liberté de choix en termes d'ontologie du problème, de facteurs pertinents et de mécanismes majeurs à prendre en compte. Par-là, elle suscite de salutaires et puissantes perplexités, comme des doutes raisonnés et justifiés, ainsi que, parfois, l'indécision théorique qui les accompagne. Selon les auteurs de cet ouvrage, si on en comprend bien les principes et les limites, une telle modélisation enseigne avant tout la critique, la mise au jour d'hypothèses implicites, comme la mise en évidence de la rareté ou de la difficile accessibilité des propriétés structurales tant recherchées. Elle enseigne donc une humilité informée, plutôt qu'elle ne nous fournit des modèles prédictifs clés en main : mieux, elle est une vigie à la fois perspicace et opératoire à partir de laquelle on peut légitimement questionner dans ses hypothèses implicites comme dans ses angles morts tout modèle (à agents ou autre) qui se proclamera prédictif, en particulier pour un phénomène complexe, multifactoriel, évolutif, sensible même à ses propres modèles en temps réel. Mais j'ajouterais que les auteurs montrent aussi qu'elle ne se limite pas à cet apprentissage de la critique et de l'humilité : le dernier chapitre met en œuvre de façon éclatante sa capacité propre à suggérer également des idées exploratoires puissantes et dont le caractère fécond pourrait rapidement se confirmer.

Septembre 2020