

LA MODÉLISATION ÉCONOMIQUE À L'APPUI DU CHOIX PUBLIC DANS L'URGENCE DE LA PANDÉMIE DE COVID-19¹

Une revue de littérature

Cécile Bastidon

Université de Toulon-LEAD, CAC-IXXI (Institut Rhônealpin des Systèmes Complexes)

Antoine Parent

Université Paris 8-LED, OFCE-Sciences Po, CAC-IXXI (Institut Rhônealpin des Systèmes Complexes)

La pandémie de Covid-19 suscite l'essor d'approches disciplinaires multiples. Toutefois, la formalisation des mécanismes de transmission épidémiologiques et économiques fait apparaître des biais pouvant affecter les choix optimaux de politiques publiques. D'abord, le volet macroéconomique ne prend pas systématiquement en compte les différents canaux d'amplification, par exemple l'amplification des chocs de demande et la persistance des chocs de prix d'actifs. Ensuite, les données statistiques macroéconomiques comme épidémiologiques élaborées en période de pandémie soulèvent des difficultés méthodologiques. Par exemple, les paramètres du modèle de propagation virale ne sont pas connus dans les premiers mois, en particulier le taux de létalité. Enfin, les modèles épidémiologiques eux-mêmes peuvent être biaisés, notamment dans le cas de virus dont la diffusion n'est pas caractérisée par un processus de Markov standard, et dans le cas où les différents niveaux d'hétérogénéité des réseaux de contacts (humains, de transports...) ne sont pas pris en compte. Ces biais se trouvent renforcés, pour la plupart des économies avancées, par l'inexpérience des agents économiques et particulièrement de l'autorité publique face aux pandémies majeures.

Mots clés : Covid-19, Pandémies, Modèles épidémiologiques, graphes de contacts, réseaux hétérogènes.

1. Les auteurs remercient Patrice Abry, Michael Bordo, Alex Cukierman, Éric Guichard, Juliette Rouchier et Vincent Touzé pour les discussions sur différents points relatifs au sujet, de même que les rapporteurs anonymes. Ils remercient également les participants à la conférence European Public Choice Society 2021 (Université de Lille, 21-22 avril 2021), et au Séminaire IXXI « [La Covid-19 : regards et questions interdisciplinaires](#) » (IXXI Institut Rhônealpin des Systèmes Complexes, ENS Lyon, 7 mai 2021) pour leurs remarques et suggestions.

La crise de la Covid-19 a bouleversé le fonctionnement de nos systèmes économiques. Les économistes ont dû s'adapter dans des temps record pour comprendre les changements qui s'opéraient. D'une part, les macroéconomistes empiriques ont dû revoir leurs outils de mesure de l'économie en temps réel (Eurostat, INSEE, WTO, etc.) et de prévision (IMF, OECD, OFCE, WorldBank, etc.). La « prédictibilité » de l'économie ne s'appuyant plus sur une certaine « régularité » empirique, l'analyse de la conjoncture repose désormais sur la « conjecture » autant que sur l'économétrie des séries temporelles. D'autre part, le choc de la Covid-19 implique de tels changements que de nombreux macroéconomistes théoriques ont également revisité dans des temps extrêmement courts l'analyse fondamentale, en incorporant la dimension épidémiologique. La pandémie de SIDA et, dans une moindre mesure, l'épidémie de SRAS, ont déjà donné lieu dans l'histoire récente à des littératures posant la question épidémiologique sous l'angle économique. Dans le cas du SIDA, dont la dynamique pandémique a constitué une menace particulièrement grave pour les économies en développement à partir des années 1990, la littérature relative au coût économique est très large (par exemple, Bloom et Mahal, 1997 ; Barnett *et al.*, 2001 ; Touzé et Ventelou, 2002). Cependant, la pandémie de Covid-19 présente la particularité de susciter non seulement une multiplication des travaux mais encore un questionnement sur les finalités même de la discipline (Ragot, 2020). Notre article propose de faire un premier bilan de cette littérature académique renouvelée et des hypothèses méthodologiques qui sous-tendent ces développements, dans le cadre élargi des littératures épidémiologique et anthropologique relatives aux pandémies. Il ne s'agit nullement ici d'établir une revue de littérature des résultats² obtenus dans ces travaux mais d'insister sur les renouvellements méthodologiques qui en sont à l'origine.

En particulier, les études empiriques de la pandémie de Covid-19 mettent en avant des interrogations spécifiques que nous n'abordons pas à titre principal car elles sortent du cadre de notre problématique

2. Pour les résultats relatifs aux conséquences de la pandémie de Covid-19 et aux effets des mesures de politiques sanitaires et économiques prises par les gouvernements, voir, par exemple, Brodeur *et al.* (2020) pour une revue de la littérature économique académique ; ou Ibn-Mohammed *et al.* (2020) pour une revue large des sources d'information incluant, en outre, la presse généraliste, les rapports d'expertises, les documents publiés par les gouvernements et les différentes parties prenantes, et les rapports d'évaluation des politiques économiques et sanitaires de crise.

méthodologique. D'abord, la pandémie comporte des effets sectoriels différenciés. Certains secteurs sont plus exposés que d'autres, en particulier pendant les périodes de confinement. Cette exposition évolue elle-même dans le temps avec la transformation de l'outil de production résultant du recours croissant au télétravail et au numérique. Par ailleurs, le commerce international est lourdement affecté. Les effets des mesures de fermeture des frontières sur la circulation des biens, des services et des personnes et finalement le fonctionnement des chaînes de valeur internationales agissent comme un révélateur de la co-dépendance des économies. Quid des conséquences de moyen terme sur la dynamique de globalisation économique ? En outre, les conséquences de la pandémie sur le *policy-mix* et les finances publiques sont massives et remettent au goût du jour les questions de soutenabilité de la dette publique indissociables des crises majeures.

Indiscutablement, la période est propice à l'effervescence de travaux nouveaux, accompagnée et suscitée par la mise en ligne de plateformes spécifiques, reflet de la mobilisation très forte des organisations internationales et des organismes statistiques. Les organismes de recherche majeurs proposent des processus de publication accélérés jusqu'au temps réel, venant s'ajouter aux dispositifs habituels de mise en ligne des documents de travail (par exemple, CEPR). Cette effervescence renforce la nécessité d'une investigation centrée sur le renouvellement méthodologique induit par la pandémie de Covid-19 : si les modèles théoriques renouvelés permettent de mieux expliquer la propagation économique de la pandémie de Covid-19 en endogénéisant la dimension épidémiologique, dans quelle mesure permettent-ils d'éclairer avec justesse la décision publique et donc l'orientation des politiques économiques ? Tel est l'objet de cet article qui dresse une typologie des méthodologies utilisées pour l'aide à la décision publique, discute les hypothèses émises et montre en quoi les réponses apportées à la sphère décisionnelle sont tributaires des choix méthodologiques retenus.

L'un des objectifs spécifiques des macroéconomistes dans le contexte de la pandémie de Covid-19 est de formaliser l'arbitrage épidémiologique vs. macroéconomique (par exemple, Adda, 2016 ; Hall *et al.*, 2020), c'est-à-dire de déterminer quelles sont les mesures contraignantes qu'il est acceptable de prendre tenu de leur impact à la fois favorable sur la dynamique de la pandémie et défavorable sur celle de la croissance. À l'exception de l'économie de la santé (par exemple, McKibbin *et al.*, 2006 ; Adda, 2016 ; McKibbin et Triggs, 2018), la modélisation macroéconomique ne prenait précédemment

pas en compte les phénomènes de propagation virale, du domaine de l'épidémiologie. Pour ces raisons, cette revue de littérature couvre deux champs principaux : le champ de l'épidémiologie et celui de la macroéconomie. Nous intégrons également des travaux des domaines de la démographie (Omran, 1971) et de l'anthropologie (Barrett *et al.*, 1998) permettant d'inscrire dans le cadre large de la théorie des transitions épidémiologiques la pandémie de Covid-19 et l'arbitrage épidémiologique vs. macroéconomique qui s'y rapporte. La première et la deuxième partie sont consacrées aux approches épidémiologiques : la première traite des modèles de référence et la deuxième de la prise en compte par les modèles épidémiologiques de graphes de contacts, et en général de réseaux, de structure hétérogènes. La troisième et la quatrième partie sont consacrées aux approches macroéconomiques. La troisième partie décrit les modèles mixtes, ou, par analogie avec les modèles d'économie environnementale Nordhaus (2019), les modèles économiques intégrés, comportant à la fois des blocs épidémiologiques et macroéconomiques. La quatrième partie, enfin, décrit la littérature purement macroéconomique spécifique à la pandémie de Covid-19.

Au terme de notre analyse des méthodes auxquelles ont aujourd'hui recours les macroéconomistes dans le contexte de la pandémie de Covid-19, de même que des méthodes transversales en épidémiologie qui en constituent l'un des supports, nous attirons l'attention des autorités publiques sur le fait que la diversité des approches disciplinaires révèle de nombreux biais possibles, en particulier, dans les choix optimaux de mesures contraignantes. Nous en identifions au moins trois types : les biais liés à la formalisation de la diffusion d'un choc macroéconomique d'ampleur inédite, les biais liés à l'inadéquation de blocs épidémiologiques excessivement stylisés à rendre compte de la propagation virale au sein de réseaux complexes et les biais statistiques généralisés liés à la mesure des indicateurs économiques, et épidémiologiques en période de pandémie.

1. Modèles épidémiologiques de référence

1.1. Les modèles SIR/SEIR : le socle

Les premiers macroéconomistes qui abordent les problèmes soulevés par la gestion de la pandémie de Covid-19 le font, paradoxalement, sans formaliser ses conséquences macroéconomiques. Le

modèle d'Atkeson (2020b)³, l'un des premiers travaux réalisés par un macroéconomiste pour des macroéconomistes, est en réalité exclusivement un modèle de propagation virale, ayant pour objet de formaliser l'effet de différentes mesures de contrôle sur la dynamique de la pandémie par différents scénarii de réduction du R_0 (nombre de transmissions moyen attribuable à une personne infectée). Le modèle de propagation virale exposé est une variante du modèle SIR de référence (Kermack et McKendrick, 1927). Le modèle de Kermack et McKendrick (1927) est un processus de Markov à trois états. Les individus sont soit susceptibles d'être exposés au virus (« susceptible », S), soit infectés (« infected », I), soit guéris ou morts (« recovered », R) (pour une comparaison de la structure du modèle SIR avec deux exemples de modèles multi-états récents, voir Figure 1). Les probabilités de transition d'un état à un autre sont propres à chaque agent pathogène. Ce modèle explique la dynamique des épidémies et permet également de calculer des seuils épidémiques au voisinage desquels une population donnée devient sujette au risque de pandémie, expliquant ainsi le caractère apparemment sporadique de leur survenue.

Atkeson (2020b) expose plus précisément un modèle SEIR comportant quatre états : les trois états précédents auxquels s'ajoute l'état exposé (« exposed », E), qui désigne une personne susceptible d'avoir été en contact avec le virus, et devenant ensuite soit infectée si elle développe la maladie, soit à nouveau susceptible si elle ne la développe pas. Atkeson (2020a) est une déclinaison du même modèle dans le cas où l'absence de tests de grande ampleur conduit à sous-estimer les nombre des infections, et donc à surestimer la létalité (ratio des décès par rapport aux infections). Les deux modèles comportent un seuil critique de saturation du système de santé au-delà duquel on observe une surmortalité (de même que, par exemple, Eichenbaum *et al.*, 2020b et Eichenbaum *et al.*, 2020a). Dans les deux cas, les mesures contraignantes durables exercent un effet favorable sur la dynamique de l'épidémie. Toutefois, Atkeson (2020a) met en évidence qu'il n'est pas possible de déterminer de niveau optimal de contrainte sans connaître de manière suffisamment précise, en particulier, le nombre des infections et le taux de létalité. Une approche novatrice consiste à

3. Quel qu'en soit le champ, de nombreux travaux sur la Covid-19 portent sur les États-Unis. Un petit nombre évaluent les effets mondiaux de la pandémie ou ses effets nationaux dans d'autres pays. Par exemple Dauvin *et al.* (2020a) et Giordano *et al.* (2020) portent, respectivement, sur les cas français et italien.

corriger les données disponibles par des méthodes de théorie du signal pour améliorer les prévisions des modèles ou des blocs épidémiologiques. Ainsi, Abry *et al.* (2020) emploient un modèle d'optimisation convexe pour garantir la régularité par morceaux des données épidémiologiques dans leurs dimensions temporelle et spatiale. En règle générale, la qualité des données épidémiologiques affecte cependant la capacité des modèles à déterminer quelles sont les mesures contraignantes les mieux adaptées, qu'il s'agisse de confinement strict ou de mesures intermédiaires.

1.2. Modèles épidémiologiques à changements d'états non observés ou non markoviens

La littérature épidémiologique récente se démarque notamment des modèles de référence à la Kermack et McKendrick (1927) par la prise en compte d'un nombre d'états plus important, permettant par exemple d'approximer des processus non markoviens (Nowzari *et al.*, 2015) ou de prendre en compte la possibilité que l'état des individus ne soit pas directement observé et que les symptômes soient plus ou moins sévères, ce qui présente un intérêt particulier dans le cas d'un agent pathogène causant une forte proportion d'infections asymptomatiques (Giordano *et al.*, 2020). À cette fin, Giordano *et al.* (2020) construisent un modèle de Covid-19 de type SIR à huit états (SIDARTHE), dont deux correspondent à des infections non détectées (asymptomatique, et symptomatique). La structure de ce modèle est représentée dans la Figure 1. Ce cadre permet de formaliser les effets d'une politique de tests systématique, en faisant dépendre les probabilités de transition des infections non détectées aux infections détectées du pourcentage de la population faisant l'objet de tests.

Nowzari *et al.* (2015) introduisent une subdivision des états du modèle en sous-états, permettant d'approximer les processus de diffusion virale dans lesquels les probabilités de transition ne suivent pas des processus de Poisson à distribution exponentielle et qui ne peuvent donc être formalisés par des processus de Markov simples. Le modèle proposé correspond à une classe générale de modèles SI^*V^* , à nombre quelconque d'états I et V (« vigilant ») : les états I permettent de prendre en compte la contagion, les chances de guérison etc. à différents stades de l'infection ; les états V permettent de prendre en compte différents cas dans lesquels les individus ne sont pas S (« susceptible ») (comportements adaptés, personnes vaccinées, ou décédées, etc.). Comparativement aux modèles SI^*V^* , les simulations

effectuées montrent que les modèles de type SIR à processus de Markov peuvent conduire à des erreurs importantes dans la prévision des seuils et de la dynamique épidémique de certains agents pathogènes.

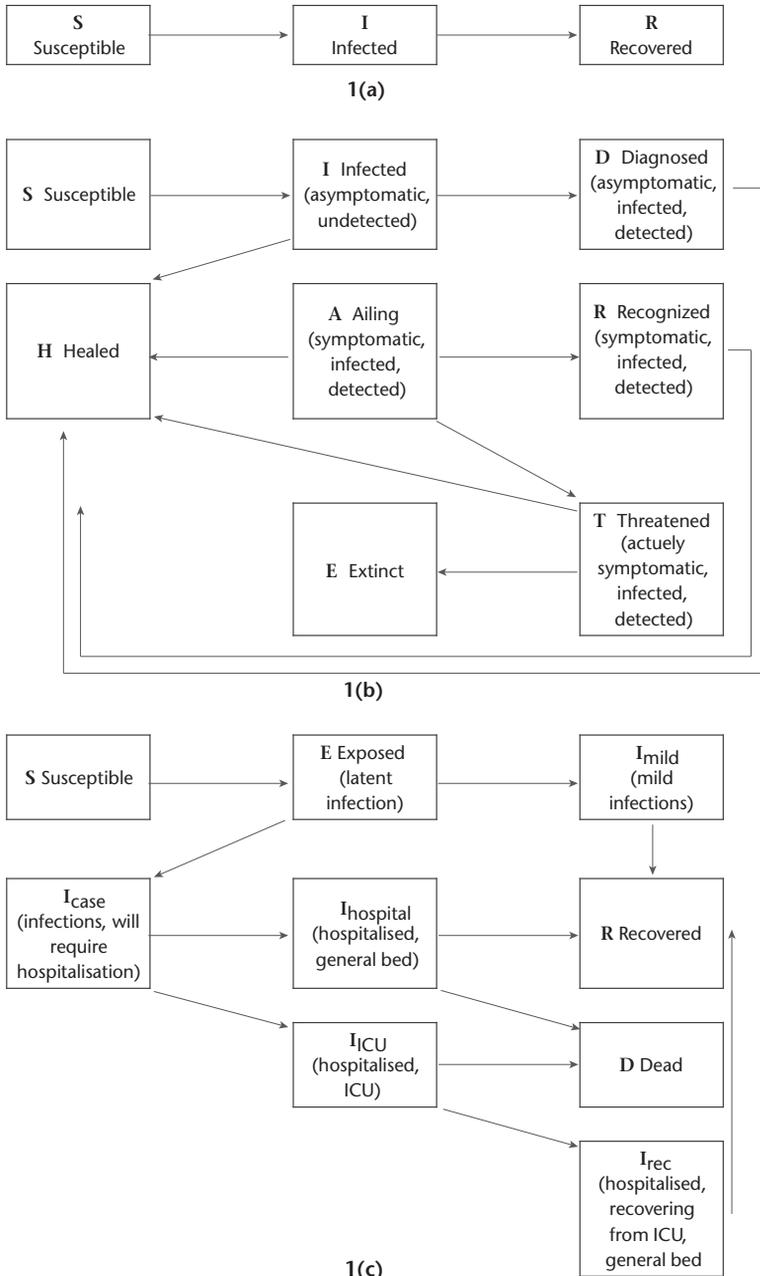
1.3. Un exemple de modèle épidémiologique global : le modèle ICL

Le modèle de l'Imperial College London (ICL) est un modèle SEIR à états infectieux multiples, reflétant la possibilité d'infections asymptomatiques, modérées ou sévères, soit un total de 9 états (voir Figure 1). Le modèle est structuré par âge et présente la particularité d'être l'approximation d'un modèle global, incluant 164 pays dans 4 catégories de revenus : faibles, intermédiaires inférieurs, intermédiaires supérieurs, élevés (ICL). Il s'agit par ailleurs d'un modèle stochastique, produisant des prévisions sous forme d'intervalles et non de scénarii uniques. Les données employées par le modèle sont de différentes natures : données de décès employées pour reconstituer les nombres de cas des semaines écoulées sur la base d'une estimation du taux de létalité, données de mobilité, et selon la disponibilité dans les pays couverts par le modèle, démographie, contacts par tranches d'âge, capacité hospitalière, etc.

L'objet du modèle ICL est de permettre aux pays d'identifier à quel stade de la dynamique épidémique ils se trouvent, et comment la demande de services médicaux évoluerait en cas de maintien, d'accentuation ou de relâchement des mesures contraignantes courantes. Les scénarii publiés portent sur quatre variables : les infections, les décès, les hospitalisations et les admissions en soins intensifs⁴, et le R_0 . Les limites du modèle ICL sont celles des modèles SIR/SEIR de manière générale : en particulier, l'estimation du taux de létalité peut être biaisée, et certains paramètres sont structurellement non pertinents (nombre de cas mesurés par les tests) ou non observables pour le modélisateur (nombre de personnes ayant fait l'objet d'une infection asymptomatique). Le modèle ICL présente un statut particulier du point de vue des décisions de politiques sanitaires dans la mesure où l'inflexion de ses prévisions serait à l'origine du revirement du gouvernement britannique et de l'instauration du premier confinement (Adam, 2020), non pas tant en raison de la révision des prévisions de décès mais en raison de la révision des prévisions de saturation des

4. Dans une perspective de comparaison internationale, il est important de noter que la définition internationale de ce qu'est une hospitalisation en soins intensifs est moins restrictive que la définition française de l'hospitalisation en réanimation (voir par exemple, OECD, 2020).

Figure 1. Structure des changements d'états de trois modèles épidémiologiques



(a) modèle SIR de Kermack et McKendrick (1927) ; (b) modèle à états multiples non observés de Giordano *et al.* (2020) ; (c) modèle ICL (ICL).

services de soins intensifs. Si cette hypothèse est vérifiée, elle suggère une piste de modélisation non encore explorée dans les modèles mixtes exposés dans la section 3 : l'arbitrage macro-épidémiologique ne vaudrait qu'en l'absence de saturation d'une contrainte de tension des systèmes de santé. Dans l'éventualité d'une saturation de la contrainte, les décisions de l'autorité publique seraient exclusivement conditionnées par le volet épidémiologique.

Outre les limites partagées avec les modèles SIR/SEIR en général, le modèle ICL, qui est un modèle global, présente la particularité d'intégrer le taux de létalité par le biais d'un double mécanisme selon que les pays sont plus ou moins avancés dans la dynamique épidémique. Pour les pays les plus avancés dans la dynamique épidémique, il permet de reconstituer le nombre de cas ayant donné lieu aux décès observés. Pour les pays les moins avancés dans la dynamique épidémique, le taux de létalité est calculé à partir des estimations réalisées dans les pays les plus avancés, ajustées des différences de structure par âge. Les biais dans l'estimation du taux de létalité dans les pays les plus avancés dans la dynamique épidémique sont donc susceptibles de causer des biais généralisés de prévision dans l'ensemble des pays couverts par le modèle. Adam (2020) note que l'appréciation de ces biais est compliquée par l'existence de décalages entre la mise en ligne des prévisions et celle des différentes versions du modèle ICL correspondantes (ICL).

2. Modèles épidémiologiques et structures de réseaux

2.1. Modèles de graphes de contacts hétérogènes

En épidémiologie, les développements actuels du modèle de propagation virale de référence de Kermack et McKendrick (1927) explorent deux dimensions principales, non exclusives. La première dimension consiste à développer et adapter aux caractéristiques particulières d'un virus le modèle de propagation virale lui-même (par exemple, *Giordano et al.*, 2020). La seconde dimension consiste à prendre en compte l'hétérogénéité des réseaux de contacts humains dans une approche de réseaux complexes (par exemple, *Colizza et al.*, 2007 ou *Prakash et al.*, 2010). Ces approches font l'objet de notre deuxième partie.

Les modèles macroéconomiques présentés dans la troisième et la quatrième section ont en commun d'avoir été développés spécifique-

ment à partir du début de l'année 2020 dans le contexte spécifique des premiers mois de la pandémie de Covid-19. Ces modèles diffèrent notablement du point de vue des blocs macroéconomiques. En revanche, le bloc épidémiologique des modèles mixtes est toujours le même. Il s'agit d'un modèle SIR ou SEIR à la Kermack et McKendrick (1927), dans lequel on fait explicitement (Eichenbaum *et al.*, 2020b) ou non l'hypothèse de contacts aléatoires entre les individus. De manière équivalente, le graphe des contacts est supposé homogène : tous les individus ont avec le reste du groupe des connexions de même structure. Cette hypothèse est en contradiction avec la littérature sur les réseaux de personnes, qui met en évidence une forte hétérogénéité des connexions, certains individus étant caractérisés par des contacts atypiquement nombreux (« degré » élevé), et d'autres par des contacts avec des communautés autrement déconnectées (« centralité d'intermédarité » élevée) (Newman, 2018).

2.2. Réseaux de transports et modèles de méta-populations

Une partie de la littérature en épidémiologie a pour objet de prendre en compte cette hétérogénéité. Une première étape consiste alors à formaliser la propagation virale dans le cas des modèles théoriques usuels de graphes de contacts hétérogènes. Une seconde étape consiste à généraliser les résultats au cas de graphes de contacts hétérogènes quelconques (Prakash *et al.*, 2010; Nowzari *et al.*, 2015). Prakash *et al.* (2010) montrent ainsi que pour une large gamme de modèles de propagation virale incluant tous les modèles standard, le seuil épidémique est une fonction simple des probabilités de transition entre les états du modèle de propagation virale et de la première valeur propre de la matrice de connectivité associée au graphe des contacts. Ce résultat théorique a des implications fortes du point de vue des mesures contraignantes optimales : dès lors que la topologie des contacts est connue, il est possible d'identifier les nœuds ou les parties du graphe à isoler ou à immuniser en priorité. Il s'agit des nœuds dont l'inactivation fait le plus rapidement diminuer la première valeur propre de la matrice de connectivité, c'est-à-dire de ceux dont la centralité d'intermédarité est la plus élevée.

Ces approches suggèrent donc des mesures contraignantes différenciées en fonction de la connectivité des nœuds du graphe. Colizza *et al.* (2007) parviennent au même résultat. Leur approche est à la fois théorique et empirique. Sur le plan théorique, les auteurs montrent

que la modélisation en épidémiologie évolue dans le sens de modèles décrivant de manière de plus en plus détaillée la structure démographique de la population et les interactions entre individus. En particulier, les modèles de « méta-populations » décrivent les interactions entre sous-groupes associés les uns aux autres par des mouvements d'individus, à divers niveaux de granularité (pays, régions, villes...). Sur le plan empirique, l'informatisation de la collecte et du traitement des données relatives à ces modèles permet désormais d'en caractériser les propriétés complexes, en particulier les différents niveaux d'hétérogénéité des réseaux de contacts humains et des réseaux de transport, et donc de modéliser la propagation virale dans différents scénarii de mesures contraignantes. Les auteurs mettent en évidence, à partir des données mondiales de transport aérien, que les graphes de contacts associés présentent effectivement des structures fortement hétérogènes.

2.3. Réseaux de transports et transitions épidémiologiques

Ces résultats s'appliquent à divers types de réseaux de transports. Ainsi, Adda (2016) montre que le fonctionnement des réseaux de transport ferroviaire influe à court terme (fermetures de lignes de courte durée pendant la durée des épidémies) et long terme (ouverture de lignes nouvelles) sur la diffusion virale. Plus généralement, ses résultats, obtenus par régressions économétriques sur une période de 25 ans, suggèrent une influence structurelle des conditions économiques et en particulier de l'expansion des réseaux commerciaux. Ils présentent, ainsi, un intérêt particulier au regard de l'hypothèse de « troisième transition épidémiologique ». Dans la théorie démographique des transitions épidémiologiques, qui explique les évolutions du taux de mortalité dans l'histoire humaine, les « transitions » délimitent les « ères » successives des pandémies récurrentes et des famines, l'extinction progressive des pandémies et enfin (post-Révolution industrielle) la prédominance des maladies dégénératives et d'origine humaine (Omran, 1971).

Barrett *et al.* (1998) y ajoutent une ère contemporaine (depuis le début de la décennie 1970) caractérisée par l'émergence ou la réémergence de maladies infectieuses contribuant significativement à la mortalité des adultes. Cette approche anthropologique met en évidence la nature récurrente de la relation entre émergence des maladies infectieuses et progrès technologique (en particulier, les

technologies permettant le défrichement) mais aussi changement climatique (évolution de la délimitation des écosystèmes liée aux changements climatiques) et dynamique des routes commerciales et des conquêtes territoriales (en particulier, depuis l'essor du commerce eurasiatique au cinquième siècle et l'établissement de routes commerciales intercontinentales). Ces résultats sont importants à plusieurs titres. D'abord, ils montrent que l'activité économique, et la formation de réseaux complexes hétérogènes qui l'accompagne, influe sur les dynamiques de propagation virale non seulement à court terme mais également à très long terme, directement et indirectement. Par ailleurs, ils suggèrent que la fréquence relativement basse des pandémies au cours du vingtième siècle peut ne pas être un indicateur pertinent de leur fréquence future. Dans ce contexte, les agents économiques et en particulier les autorités publiques seraient désormais en mesure de prendre en période de pandémie des décisions moins biaisées par leur inexpérience.

3. L'arbitrage épidémiologique vs. macroéconomique dans les modèles mixtes

3.1. Mécanismes d'interactions et modèles mixtes de pandémies

Les approches macroéconomiques mixtes associant bloc macroéconomique et bloc épidémiologique ont pour objet de modéliser les interactions entre dynamique épidémiologique, choix de l'autorité publique (politiques sanitaires, politiques économiques) et choix des ménages et des entreprises. Ces interactions généralisées sont représentées de manière schématique sur la Figure 2(a). De manière générale, la pandémie a un impact direct sur l'économie (en particulier, par le biais de la hausse du nombre de malades, des dépenses de santé, de la mortalité), mais également un impact indirect par le biais des mesures contraignantes de politiques sanitaires qui peut être plus fort que l'impact direct. C'est pour répondre aux chocs massifs de perte d'activité qui résultent de ces effets directs et indirects que sont mises en œuvre des politiques de relance d'ampleur exceptionnelle. Vus sous cet angle, les modèles mixtes de pandémies (Figure 2(b)) ne sont pas sans évoquer les modèles d'évaluation intégrés (Nordhaus, 2019) décrivant l'interaction entre croissance économique, accélérations des dynamiques de changement climatique, impacts écologiques et économiques et politiques environnementales (Figure 2(a)).

Les approches macroéconomiques mixtes sont généralement ciblées sur les effets de la pandémie et des mesures contraignantes sur la consommation et la croissance (parmi les premiers travaux sortis, Eichenbaum *et al.*, 2020a ; Hall *et al.*, 2020), mais certains travaux abordent la question des prix d'actifs Toda (2020), McKibbin et Fernando (2020). Dans une perspective historique, Boissay *et al.* (2020) et Bordo (2020) étudient les pandémies et chocs macroéconomiques majeurs depuis la grippe espagnole de 1918 et Jordà *et al.* (2020) l'effet des grandes pandémies depuis le quatorzième siècle.

3.2. Architecture générale des modèles mixtes

Au contraire des modèles épidémiologiques où les choix optimaux de l'autorité publique sont déterminés par un objectif de santé publique, les modèles mixtes sont entièrement focalisés sur l'arbitrage épidémiologique vs. macroéconomique mis en évidence, en particulier, par Gourinchas (2020). Ainsi Hall *et al.* (2020) formalisent l'arbitrage en attribuant à la perte de la vie humaine la valeur du nombre d'années perdues, exprimées en termes de consommation annuelle. Le mécanisme d'arbitrage de ce modèle simple est illustratif de l'architecture générale des modèles mixtes.

En notant δ le taux de mortalité dû à la pandémie en l'absence de mesures spécifiques, v la valeur d'une année de vie mesurée en unités de consommation, et LE la durée de vie restante moyenne de la population, α est la fraction d'une année de consommation à laquelle la société est prête à renoncer pour éviter la mortalité au taux δ .

$$\alpha \approx \delta \cdot v \cdot LE \tag{1}$$

Supposons que l'utilité pour l'ensemble de sa durée de vie d'une personne d'âge a soit :

$$V_a = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \bar{S}_{a,t} u(c_t) = u(c_0) + \beta S_{a+1} V_{a+1} \tag{2}$$

où $\bar{S}_{a,t}$ est la probabilité qu'une personne d'âge a survive jusqu'en $a+1$ et $\bar{S}_{a,t} = S_{a+1} \cdot S_{a+2} \cdot \dots \cdot S_{a+t}$ la probabilité qu'une personne d'âge a survive les prochaines t années. β est le facteur d'actualisation, et $u(c_t)$ l'utilité associée à la consommation de l'année t .

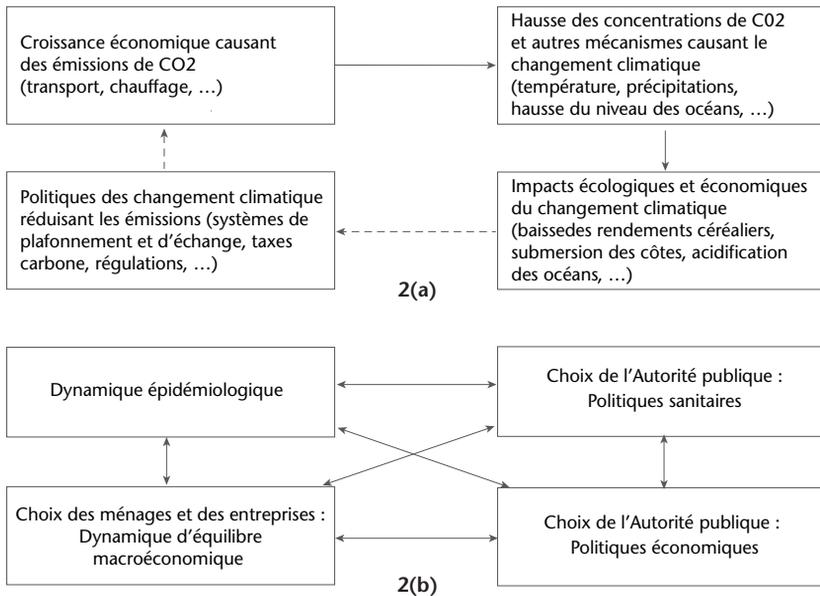
Avec $\lambda \equiv 1 - \alpha$ et en supposant la consommation identique à cette déviation près pour tous les groupes et toutes les tranches d'âge, on a :

$$V_a(\lambda, \delta) = u(\lambda c) + \beta(S_{a+1} - \delta_{a+1})V_{a+1}(1,0)$$

$V_a(\lambda, \delta)$ est l'utilité pour l'ensemble de sa durée de vie d'une personne d'âge a dont la consommation est réduite d'un facteur λ et le taux de mortalité augmente de δ_{a+1} . La fonction d'utilité sociale est la suivante :

$$\begin{aligned} W(\lambda, \delta) &= \sum_a N_a V_a(\lambda, \delta) \\ &= Nu(\lambda c) + \beta \sum_a (S_{a+1} - \delta_{a+1}) N_a V_{a+1}(1, 0) \end{aligned}$$

Figure 2. Ensemble des mécanismes décrits par les modèles d'évaluation intégrés du changement climatique et par les modèles mixtes épidémiologiques-macroéconomiques



(a) schéma circulaire du changement climatique décrit par les modèles d'évaluation intégrés (IAMs, *Integrated Assessment Models*, Source : Nordhaus, 2019) ; (b) schéma d'ensemble des interactions constituant le socle des modèles économiques de pandémies.

Par égalisation de $W(\lambda, 0) = W(1, \delta)$, c'est-à-dire de l'utilité sociale associée à une consommation diminuée sans hausse de mortalité à l'utilité sociale associée à une consommation inchangée avec mortalité accrue, on obtient :

$$u(\lambda c) - u(c) = \beta \sum_a \delta_{a+1} \omega_a V_{a+1}(1, 0) \quad (3)$$

avec $\omega_a = N_a/N$ la part initiale du groupe d'âge a dans la population, soit finalement :

$$\alpha \equiv 1 - \lambda = \beta \sum_a \delta_{a+1} \omega_a \tilde{V}_{a+1} \quad (4)$$

avec $\tilde{V}_{a+1} \equiv V_{a+1}(1,0) / [u'(c)c]$ valeur de la vie à l'âge $a + 1$, exprimée en unités de consommation rapportées au flux de consommation.

L'intuition de ce résultat est que la fraction de consommation à laquelle une société est prête à renoncer est la somme du nombre estimé de morts $\delta_{a+1} \omega_a$ dans chaque tranche d'âge pondérée par la valeur de la vie aux âges correspondants exprimée en unités de consommation relatives. Les modèles mixtes présentent des déclinaisons de ce cadre minimal de formalisation de l'arbitrage macro-épidémiologique, mais l'optimisation de l'utilité sociale intertemporelle, prenant en compte la valeur d'une perte de vie humaine elle-même fonction de l'âge est commune à ces approches. On note que cette formulation laisse ouverte la question du taux d'actualisation utilisé pour le calcul de l'utilité intertemporelle. Cette question ne constitue certes pas le sujet spécifique des modèles mixtes, mais la réponse qui lui est apportée peut évidemment constituer un biais dans les résultats obtenus, particulièrement dans le cas d'une pandémie qui affecte de manière très différenciée les différentes tranches d'âge.

3.3. Externalités des choix décentralisés et frontière de Pareto

De manière générale, la sous-optimalité des choix décentralisés en période de pandémie est au cœur des modèles mixtes. Le modèle de d'Albis et Augeraud-Véron (2021) présente l'originalité de définir le niveau optimal des mesures contraignantes à partir de l'association à un bloc SIR d'un modèle de contrôle optimal à horizon infini. L'optimalité est caractérisée à partir d'une fonction de bien-être social dépendant de la dynamique macroéconomique du système. Eichenbaum *et al.* (2020b,a) font dépendre les probabilités de transition du modèle SEIR des choix de consommation et d'offre de travail des agents. Ils montrent l'existence d'une « externalité d'infection » dès lors que ceux-ci ne prennent que partiellement en compte les conséquences de leurs comportements de consommation et d'offre de travail sur la dynamique globale de la pandémie. Cette externalité rend sous-optimal l'équilibre concurrentiel où les agents déterminent librement leurs comportements de consommation et d'offre de travail et justifie des mesures contraignantes prises par l'autorité publique.

Toutefois, en l'absence de tests permettant de cibler les mesures contraignantes sur les individus infectés, ces mesures ne sont efficaces que si elles sont durables et causent donc une récession de grande ampleur.

En l'absence de capacité à connaître les statuts infectieux des agents, Acemoglu *et al.* (2020) comparent l'effet de mesures contraignantes ciblées sur des groupes de risque spécifiques (population âgée) à celui de mesures contraignantes indifférenciées. L'arbitrage est formalisé par un continuum de choix (« frontière de Pareto ») associés à une préférence plus ou moins forte pour l'objectif de santé publique vs. macroéconomique. Outre l'existence de groupes de risque, leur déclinaison du modèle SIR standard prend en compte le fait que les mesures contraignantes peuvent présenter des rendements décroissants du point de vue des interactions et donc de la contagion générée par certaines activités. Ainsi, les interactions générées par les comportements de consommation décroissent en proportion stricte des mesures contraignantes, alors que les interactions au travail ou dans les cercles familiaux ou amicaux décroissent moins que proportionnellement. Le principal résultat est que les mesures contraignantes ciblées améliorent dans tous les cas l'arbitrage épidémiologique vs. macroéconomique. Cette approche règle en partie le problème de l'asymétrie d'information sur le statut des individus (états du modèle épidémiologique). En effet, elle permet de définir des mesures contraignantes améliorant l'arbitrage dont le ciblage correspond à des groupes de population directement identifiables par leur appartenance à un groupe d'âge. Toutefois, l'absence de tests généralisés ne permet pas de s'abstraire des biais usuels associés à la difficulté de mesure des paramètres du modèle épidémiologique, et donc finalement à la caractérisation pertinente de la frontière efficiente.

3.4. Chocs d'offre, effets d'amplifications, etc.

Dans le cas général de mesures contraignantes indifférenciées, la prise en compte, par exemple, d'effets d'amplification du choc de demande (Gourinchas, 2020 ; Guerrieri *et al.*, 2020), ou d'effets de dépréciation des prix d'actifs (Toda, 2020), renforce encore le coût macroéconomique des mesures les plus strictes. À partir de l'association d'un modèle SIR et d'un modèle macroéconomique simple où la valorisation des actifs dépend de la profitabilité future des entreprises, Toda (2020) trouve un effet défavorable notable de la pandémie sur les prix

d'actifs, cet effet étant persistant dans le cas de mesures contraignantes strictes. Dans une approche historique sur six siècles des effets des pandémies sur les rendements réels, Jordà *et al.* (2020) montrent que leurs effets défavorables persistent habituellement sur plusieurs décennies, ce résultat étant attribué à des opportunités d'investissement durablement déprimées par l'excès de capital par rapport à la main-d'œuvre survivante et au recours accru à l'épargne de précaution.

Les effets d'amplification des chocs de demande agrégée, ou « chocs keynésiens » (Guerrieri *et al.*, 2020), peuvent également causer des effets récessifs aggravés de la pandémie et de mesures contraignantes qui lui sont associées. Guerrieri *et al.* (2020) montrent, en simulant la pandémie dans un modèle multi-secteurs à marchés incomplets (contrainte de liquidité des agents), que des effets d'amplification peuvent survenir, particulièrement dans le cas de fermetures d'entreprises et de destructions d'emplois. Le *policy mix optimal* associé aux mesures contraignantes consiste alors à pratiquer une politique monétaire fortement expansionniste dont les effets favorables sont accentués par les fermetures d'entreprises évitées, et simultanément, à réaliser des transferts massifs aux ménages et aux entreprises les plus affectés par la crise, compte tenu de la baisse du multiplicateur keynésien associée à l'activité ralentie de certains secteurs d'activité. Un contexte de taux bas constitue alors un inconvénient puisque l'économie se trouve en situation de trappe, alors que pour Gourinchas (2020), qui préconise les mêmes mesures, c'est un avantage décisif pour financer des politiques budgétaires de grande ampleur.

Plus généralement, Bordo (2020) met en évidence à partir d'une comparaison historique des principaux chocs macroéconomiques du vingtième siècle que le rôle de la banque centrale est crucial en termes de stabilité financière mais aussi macroéconomique. En particulier, l'exercice extensif de la fonction de prêteur en dernier ressort, circonscrit à la durée du choc pour ne pas générer de tensions inflationnistes, est associé à un recul de la production industrielle moins durable et de moindre amplitude. Toutefois, l'auteur note que la pandémie de grippe espagnole, la plus fréquemment comparée à celle de Covid-19, présente aux États-Unis des effets macroéconomiques atténués du fait de la coïncidence de l'implication dans la Première Guerre mondiale et du choc de demande spécifique qui en résulte.

4. Les mécanismes macroéconomiques mis en jeu par la crise sanitaire

4.1. Scenarii épidémiologiques et macroéconomiques élaborés à partir de données historiques

Dans une revue de littérature des études empiriques du coût économique des pandémies, *Boissay et al.* (2020) mettent en évidence que celui-ci est très variable en fonction de leur nature et de la manière dont elles sont gérées. Les pays touchés sont affectés à la fois par des chocs d'offre et des chocs de demande dont les effets peuvent être persistants. Dans ce contexte, en parallèle des approches mixtes associant bloc macroéconomique et bloc épidémiologique, un autre pan de la littérature a pour objet d'évaluer le coût de la pandémie de Covid-19 dans une approche purement macroéconomique focalisée sur les mécanismes de transmission des chocs initiaux et de moyen terme subis par les principaux agrégats macroéconomiques. Ces approches consistent généralement à traduire la dynamique épidémiologique en chocs démographiques et économiques d'offre et de demande, ensuite appliqués à des modèles macroéconomiques standards. Elles font l'objet de notre quatrième partie.

Une première approche permettant de s'abstraire du bloc épidémiologique consiste à élaborer à partir de données de l'histoire des pandémies un ensemble de scenarii épidémiques. Ainsi, McKibbin et Fernando (2020), sur la base des scenarii épidémiques de (McKibbin *et al.*, 2006), proposent des estimations des effets de la pandémie sur les principales variables macroéconomiques et financières élaborées à partir d'un modèle hybride DSGE – équilibre général calculable à la McKibbin et Triggs (2018), McKibbin et Wilcoxon (1999). Une seconde approche sans bloc épidémiologique consiste à élaborer directement des scenarii macroéconomiques sans passer par les scenarii épidémiologiques. Primiceri et Tambalotti (2020) utilisent des données relatives à un ensemble des chocs macroéconomiques ayant causé des récessions pour produire par combinaison un « choc Covid candidat ». Ce choc candidat est ensuite décliné en scenarii pour prendre en compte les différences entre les effets de la diffusion de la pandémie et ceux des chocs de la base de données de référence. À partir d'un modèle VAR, ils construisent finalement une distribution de prévisions des principales variables macroéconomiques (emploi, chômage, consommation, production industrielle, mesures de l'inflation). Cette approche, totalement exempte de formalisation des

fonctions de comportement, prend en revanche pleinement en compte l'information relative à la diffusion des chocs majeurs contenue dans les données historiques.

Ces deux premières approches présentent l'avantage de reposer sur des modèles macroéconomiques et de séries temporelles habituellement robustes en matière de prévision macroéconomique. Toutefois, McKibbin et Fernando (2020) comme Primiceri et Tambalotti (2020) soulignent la dépendance des résultats obtenus aux scénarii utilisés, que ceux-ci soient épidémiologiques ou directement macroéconomiques. Contrairement aux modèles mixtes, il n'est pas possible de mettre en évidence de biais systématique dans le sens de la sur- ou de la sous-estimation des coûts de la pandémie. En effet, les biais éventuels ne résultent pas de l'incapacité à connaître par l'observation directe le statut infectieux des individus mais de la difficulté à élaborer à partir d'une combinaison de données historiques des scénarii suffisamment similaires à la pandémie de Covid-19. Compte tenu de sa transmission internationale exceptionnellement rapide et de la simultanéité des chocs d'offre et de demande dans de nombreux pays (Boissay *et al.*, 2020 ; CCSA, 2020), cette élaboration impose, *a minima*, des précautions méthodologiques spécifiques.

4.2. Modèles sectoriels, modèles d'équilibre partiel

Une autre approche purement macroéconomique consiste à évaluer le coût de la pandémie à partir de données sectorielles de commerce international. Dauvin *et al.* (2020a), Dauvin *et al.* (2020b) et Heyer et Timbeau (2020), sur la base des données World input-Output Database (WIOD, Timmer *et al.*, 2015), utilisent un modèle de Leontieff ayant pour objet de simuler les effets des chocs d'offre de travail et de demande adressés au système productif. Dauvin *et al.* (2020a) proposent une application au cas français, pour les premier et deuxième trimestres 2020, respectivement sur la base de données macroéconomiques mesurées et de données indirectes relatives aux systèmes de paiement, à la mobilité, etc. Ils mettent en évidence une différenciation forte des effets sectoriels en fonction des chocs spécifiques de demande et d'offre de travail à court et moyen terme. Avec une méthodologie similaire, Dauvin *et al.* (2020b) simulent les effets de la pandémie pour 12 pays et régions représentant l'économie mondiale. La représentation sectorielle des interactions mondiales au sein des chaînes de valeur a pour objet d'éclairer le fonctionnement des

mécanismes globaux de diffusion du choc. Outre les différences sectorielles précédemment mentionnées, cette représentation met en évidence des différences d'exposition nationale, accentuées ou réduites par l'usage des dispositifs d'activité partielle.

Enfin, un quatrième type d'approche purement économique consiste à mobiliser des modèles de marché du travail ou d'équilibre partiel, avec en général une focalisation spécifique sur les défaillances d'entreprises. Auray et Eyquem (2020) mobilisent un modèle de marché du travail à agents hétérogènes pour comparer les effets des confinements en tant que choc aux marges intensives (hausse des licenciements) vs. extensives (baisse de l'intensité du travail dans la fonction de production) et évaluer la capacité des dépenses publiques à limiter les effets sur la croissance et l'emploi. Gourinchas *et al.* (2020), dans une contribution largement reprise, proposent un modèle d'équilibre partiel de minimisation des coûts des firmes confrontées à des difficultés de trésorerie. Ce modèle présente la particularité de distinguer différentes composantes des chocs d'offre (contraintes sur l'offre de travail, variations des productivités sectorielles) et de demande (sectoriels, agrégés). Comme les travaux dont il constitue le socle, ce modèle est au croisement des approches macroéconomique et micro-empirique : les chocs, et l'impact qu'il a pour objet d'évaluer, sont de nature macroéconomique ; les résultats sont obtenus par agrégation de micro-simulations réalisées à partir de données entreprises individuelles.

Le modèle de Gourinchas *et al.* (2020) est appliqué à une base de données large de PME de 17 pays et les résultats mettent en évidence, en particulier, des expositions sectorielles fortement différenciées. Obtenus à partir d'un modèle d'optimisation à la Gourinchas *et al.* (2020) appliqué au cas français, les résultats de Guerini *et al.* (2020) et Heyer (2020) suggèrent, respectivement, que cette hétérogénéité selon les secteurs d'activité se double d'une hétérogénéité selon la taille des entreprises, les entreprises de taille moyenne et intermédiaire étant moins fragiles comparativement aux plus petites et aux plus grandes ; et qu'à ces hétérogénéités dans les défaillances d'entreprises sont associées des défaillances dans les destructions d'emplois, massives dans certains secteurs. Ces résultats suggèrent l'importance d'intégrer à l'avenir dans la formalisation un ensemble d'effets d'hystérèse relatifs, d'une part, aux effets directs de la pandémie ; et d'autre part, aux politiques économiques s'y rapportant, sans se limiter à la question de la

soutenabilité de la dette publique. Par exemple, les politiques de soutien aux entreprises visant à limiter les destructions d'emplois interfèrent avec les mécanismes de sélection par le marché et sont donc susceptibles d'exercer des effets défavorables durables sur la productivité globale (Guerini *et al.*, 2020).

Les approches par les modèles sectoriels et d'équilibre partiel peuvent être croisées. *Ex post*, l'évolution de la valeur ajoutée par branche étant connue, ce croisement permet d'utiliser les modèles sectoriels non pour prédire l'évolution macro-sectorielle mais pour décomposer l'impact de différents types de chocs. Dauvin et Sampognaro (2021), à partir d'une modélisation inspirée de Gourinchas *et al.* (2020) pour le choix des composantes des chocs d'offre et de demande, et des modèles de réseaux de production non linéaires et keynésiens de Baqaee et Farhi (2020, 2021) pour le rôle central de la structure des relations entre branches dans la diffusion des chocs d'offre et de demande, proposent une évaluation de l'impact du premier confinement dans le cas français (mois d'avril 2020). L'impact sur l'évolution de la valeur ajoutée est décomposé en quatre composantes : trois composantes du choc d'offre (fermetures administratives, indisponibilité de la main-d'œuvre, et autres chocs d'offre incluant les dysfonctionnements des chaînes d'approvisionnement), et le choc de demande (substitution et épargne de précaution). L'indisponibilité de la main-d'œuvre peut elle-même résulter de causes directes (personnes vulnérables, ou infectées), ou indirectes (en particulier, les fermetures des établissements scolaires), ce qui permet de prendre en compte de manière fine les caractéristiques de différents types de mesures contraignantes.

4.3. Méthodologie de la production de statistiques en période de pandémie

À l'instar des modèles épidémiologiques ou mixtes, les modèles macroéconomiques présentent inévitablement des biais inhérents aux choix de formalisation, connus des économistes et donc susceptibles d'être pris en compte dans les arbitrages de l'autorité publique. Outre ces biais de formalisation, il est important de noter que, de même que les résultats des approches mixtes incluant un bloc épidémiologique doivent être considérés sous réserve de la capacité à mesurer les statistiques épidémiologiques et en particulier le nombre de cas d'infection et le taux de létalité de manière pertinente, les résultats des approches purement macroéconomiques reposent eux-mêmes en partie sur des

statistiques élaborées dans un contexte qui soulève de nombreuses difficultés méthodologiques. Ces difficultés sont mises en évidence par les organismes statistiques eux-mêmes. Les données de prix par exemple peuvent être plus difficiles à collecter, voire manquantes. Pour pallier ces difficultés, les organismes statistiques proposent des guides méthodologiques spécifiques à l'élaboration de statistiques dans le contexte de la pandémie. C'est le cas, en particulier, d'Eurostat en Europe.

Par ailleurs, outre la mise à disposition directe des statistiques les concernant, les organismes internationaux (Eurostat, IMF, OECD, WorldBank, WTO, etc.) fournissent dans le cadre du Comité pour la Coordination des Activités Statistiques (CCSA⁵, 2020) des rapports synthétiques couvrant un large ensemble de données les plus récentes sur les effets de la pandémie : fluctuations économiques et environnementales, éducation, services publics (transport aérien, services postaux, etc.), etc. Certaines données non macroéconomiques sont utilisées, comme vu précédemment, pour apprécier la tendance des agrégats macroéconomiques, avant que les données trimestrielles soient rendues disponibles. *Brodeur et al.* (2020) soulignent que, parmi ces données non macroéconomiques, les données de mobilité prennent une importance particulière dans la mesure où elles sont utilisées à la fois par les épidémiologistes pour mesurer le respect des mesures de distanciation sociale (par exemple, dans le modèle ICL) et par les macroéconomistes, pour évaluer les coûts de la pandémie en termes de perte d'activité (par exemple, *Dauvin et al.*, 2020a).

D'autres pistes sont également explorées par les banques centrales. Par exemple, la Banque de France a adapté à la fois la fréquence et le contenu de ses enquêtes périodiques (Bignon et Garnier, 2020) et les documents de travail de la Banque centrale européenne évaluent la pertinence de l'usage d'indicateurs financiers composites de tensions systémiques comme indicateurs avancés de la distribution des prévisions de PIB, et en particulier de distributions asymétriques à gauche

5. Le Comité pour la coordination des activités statistiques comporte 36 organismes statistiques internationaux et organisations internationales dont le mandat inclut la fourniture de statistiques officielles dans le contexte des Principes régissant les activités statistiques internationales et qui possèdent des services statistiques permanents et ont des contacts réguliers avec les pays. Parmi les contributeurs se trouvent les Banques de développement régionales, la Banque des règlements internationaux, la Banque centrale européenne, le Fonds monétaire international, l'Organisation pour la coopération et le développement économiques, l'Organisation des nations unies, la Banque mondiale, etc.

(De Santis, 2020). Outre les enquêtes périodiques des organismes statistiques, certaines études récentes sur les effets de la pandémie et des confinements, notamment les documents de travail du NBER aux États-Unis, mobilisent des données d'enquêtes spécialement administrées par les auteurs auprès de panels larges de consommateurs (Coibion *et al.*, 2020) ou d'entreprises (Bartik *et al.*, 2020).

En dépit de l'effort de coordination matérialisé par la mise en ligne des rapports du Comité pour la coordination des activités statistiques, la comparabilité internationale des chiffres, qui n'est pas triviale même en l'absence de crise, a vraisemblablement été dégradée par une hétérogénéité des réponses des organismes statistiques du point de vue de leurs systèmes de collecte d'information (Blanchet et Tavernier, 2020). Hors cette question de la comparabilité internationale, les auteurs des modèles macroéconomiques d'évaluation du coût de la pandémie pointent la possibilité que même les statistiques du premier trimestre 2020, où les économies avancées ne sont encore que marginalement impactées, fassent à terme l'objet de révisions importantes à la hausse comme à la baisse (Heyer et Timbeau, 2020). Ces biais dans la mesure et la prévision des coûts de la pandémie constituent, dans un cas comme dans l'autre, également des biais dans la définition pertinente de l'arbitrage macro-épidémiologique qui s'y rapporte. Enfin, l'objet même de la mesure est interrogé (Blanchet et Tavernier, 2020), dans le contexte d'une crise sanitaire et économique dont l'ampleur exceptionnelle remet en question les concepts-clés de l'analyse économique (Ragot, 2020).

5. Conclusion

« [P]andemics are likely to occur at most once during one's lifetime. Nevertheless, individuals need to make everyday decisions such as [...] how much to consume and save, when to buy or sell stocks, etc., and these decisions depend on the expectation of how long and severe the epidemic is. Governments must also make decisions such as to what extent imposing travel restrictions, social distancing, closure of schools and businesses, etc., and for how long ». (Toda, 2020, p. 1).

En définitive, la diversité d'approches disciplinaires de la pandémie de Covid-19 met en évidence une large gamme de biais possibles dans les choix optimaux de mesures contraignantes prises par l'autorité publique. D'abord, le volet modélisation macroéconomique de l'arbitrage ne prend pas systématiquement en compte les effets

d'amplification (Gourinchas, 2020) ou « chocs de demande keynésiens » (Guerrieri *et al.*, 2020) résultant de la pandémie et des mesures contraignantes elles-mêmes, ce qui conduit à sous-estimer le déficit de croissance. Il en va de même des chocs de prix d'actifs dont les effets et la persistance ne généralement pas pris en compte (Toda, 2020). Ensuite, les paramètres du modèle de propagation virale ne sont pas nécessairement connus dans les débuts d'une pandémie, par exemple le taux de létalité (Anderson *et al.*, 2020). L'incapacité de pratiquer des tests généralisés conduit alors systématiquement à sous-estimer la population infectée, donc à surestimer le taux de létalité (Atkeson, 2020a,b). La production de statistiques macroéconomiques elle-même est affectée par la pandémie (CCSA, 2020 ; Heyer et Timbeau, 2020) malgré une mobilisation massive des organismes statistiques et des institutions internationales. Enfin, les modèles épidémiologiques eux-mêmes peuvent être biaisés, notamment dans le cas de virus dont la diffusion ne suit pas une distribution exponentielle et ne peut donc pas être caractérisée par un processus de Markov (Nowzari *et al.*, 2015) et dans le cas où les différents niveaux d'hétérogénéité des réseaux de contacts (humains, de transports...) ne sont pas pris en compte (Prakash *et al.*, 2010).

Ces biais se trouvent renforcés, pour la plupart des économies avancées, par l'inexpérience des agents économiques et en particulier de l'autorité publique face aux situations de pandémies majeures. L'Asie constitue de ce point de vue une exception, ayant été la plus directement touchée, en particulier, par le SRAS en 2003.

Toutefois, cette inexpérience pourrait à l'avenir se trouver relativisée dans le contexte d'une troisième transition épidémiologique principalement caractérisée par la réémergence des pandémies. Des causes structurelles liées à l'interaction entre les activités humaines et les écosystèmes accroissent aujourd'hui le risque d'une telle réémergence (Barrett *et al.*, 1998). Par ailleurs, les structures fortement hétérogènes des réseaux de transport et des réseaux commerciaux sont de plus en plus favorables à une diffusion globale rapide des pandémies (Colizza *et al.*, 2007 ; Adda, 2016).

Références

- Abry P., Pustelnik N., Roux S., Jensen P., Flandrin P., Gribonval R., Lucas C.G., Guichard E., Borgnat P., Garnier N., 2020, « Spatial and temporal regularization to estimate Covid-19 reproduction number $r(t)$: Promoting piecewise smoothness via convex optimization », *PLOS One*, n° 15, pp. 1-22.
- Acemoglu D., Chernozhukov V., Werning I., Whinston M. D., 2020, « A multi-risk sir model with optimally targeted lockdown ». *NBER Working Paper Series*.
- Adam D., 2020, Special report: The simulations driving the world's response to covid-19 ». *Nature*, n° 580, p. 316.
- Adda J., 2016, « Economic activity and the spread of viral diseases: Evidence from high frequency data », *Quarterly Journal of Economics*, n° 131, pp. 891-941.
- Anderson RM., Heesterbeek H., Klinkenberg D., Hollingsworth T. D., 2020, « How will country-based mitigation measures influence the course of the Covid-19 epidemic ? », *The Lancet*, n° 395, pp. 931-934.
- Atkeson A., 2020a, « How deadly is covid-19 ? Understanding the difficulties with estimation of its fatality rate », *NBER Working Paper Series*.
- Atkeson A., 2020b, « What will be the economic impact of Covid-19 in the US? Rough estimates of disease scenarios », *NBER Working Paper Series*.
- Auray S., Eyquem A., 2020, « The macroeconomic effects of lockdown policies ». *Journal of public economics*, n° 190.
- Baqae D., Farhi E., 2020, « Nonlinear production networks with an application to the Covid-19 crisis ». *NBER Working Paper Series*.
- Baqae D., Farhi E., 2021, « Keynesian production networks and the Covid-19 crisis: A simple benchmark ». *NBER Working Paper Series*.
- Barnett T., Whiteside A., Desmond C., 2001, « The social and economic impact of Hiv/Aids in poor countries: A review of studies and lessons », *Progress in Development Studies*, n° 1, pp. 151-170.
- Barrett R., Kuzawa C. W., McDade T., Armelagos G. J., 1998, « Emerging and re-emerging infectious diseases: The third epidemiologic transition », *Annual review of anthropology*, n° 27, pp. 247-271.
- Bartik A. W., Bertrand M., Cullen Z. B., Glaeser E. L., Luca M., Stanton C. T., 2020, « How are small businesses adjusting to Covid-19? Early evidence from a survey », *National Bureau of Economic Research WP*.
- Bignon V., Garnier O., 2020, « Mesurer l'impact de la crise covid-19 », *Revue de l'OFCE*, n° 166, pp. 45-57.
- Blanchet D., Tavernier J. L., 2020, « Mesurer l'activité durant la crise sanitaire », *Revue de l'OFCE*, n° 166, pp. 23-44.
- Bloom D. E., Mahal A. S., 1997, « Does the aids epidemic threaten economic growth ? », *Journal of Econometrics*, n° 77, pp. 105-124.

- Boissay F., Rungcharoenkitkul P. *et al.*, 2020, « Macroeconomic effects of Covid-19: An early review ». *BIS bulletin*.
- Bordo M., 2020, « The Fed's response to COVID-19 through the lens of history », *The Hill* URL : <https://thehill.com/opinion/finance/506925-the-feds-response-to-covid-19-through-the-lens-of-history>.
- Brodeur A., Gray D. M., Islam A., Bhuiyan S., 2020, « A literature review of the economics of covid-19 », *IZA Discussion Paper*.
- CCSA, 2020. *How Covid-19 is changing the world: A statistical perspective*. CCSA report.
- CEPR, *Covid Economics*, Centre for Economic Policy Research. URL: <https://cepr.org/content/covid-economics-vetted-and-real-time-papers-0>.
- Coibion O., Gorodnichenko Y., Weber M., 2020, « The cost of the Covid-19 crisis: Lockdowns, macroeconomic expectations, and consumer spending ». *NBER Working Paper Series*.
- Colizza V., Barthélemy M., Barrat A., Vespignani A., 2007, « Epidemic modeling in complex realities ». *Comptes rendus biologies*, n° 330, pp. 364-374.
- d'Albis H., Augeraud-Véron E., 2021, « Optimal prevention and elimination of infectious diseases », *Journal of Mathematical Economics*, n° 93.
- Dauvin M., Ducoudré B., Heyer É., Madec P., Plane M., Sampognaro R., Timbeau X., 2020a, « Évaluation au 26 juin 2020 de l'impact économique de la pandémie de la Covid-19 et des mesures du confinement et du déconfinement en France », *Revue de l'OFCE*, n° 166.
- Dauvin M., Malliet P., Sampognaro R., 2020b, « Impact du choc de demande lié à la pandémie de la Covid-19 en avril 2020 sur l'activité économique mondiale », *Revue de l'OFCE*, n° 166.
- Dauvin M., Sampognaro R., 2021, « Dans les coulisses du confinement : modélisation de chocs simultanés d'offre et de demande, une application au confinement du mois d'avril 2020 en France », *Sciences Po-OFCE Working Paper*, n° 05/2021.
- De Santis R. A., 2020, « Forecasting macroeconomic risk in real time: Great and covid-19 recessions », *ECB Working Paper*.
- Eichenbaum M. S., Rebelo S., Trabandt M., 2020a, « The macroeconomics of epidemics », *NBER Working Paper Series*.
- Eichenbaum M. S., Rebelo S., Trabandt M., 2020b, « The macroeconomics of testing and quarantining », *NBER Working Paper Series*.
- Eurostat, 2021, *COVID-19* - Eurostat. URL : <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/help/faq/covid-19>.
- Giordano G., Blanchini F., Bruno R., Colaneri P., Di Filippo A., Di Matteo A., Colaneri M., 2020, « Modelling the Covid-19 epidemic and implementation of population-wide interventions in Italy », *Nature Medicine*, n° 26, pp. 855-860.

- Gourinchas P. O., 2020, « Flattening the pandemic and recession curves. Mitigating the Covid-19 Economic Crisis: Act Fast and Do Whatever », *CEPR-voxeu.org*
- Gourinchas P. O., Kalemli-Ozcan S., Penciakova V., Sander N., 2020, « Covid-19 and SME failures », *NBER Working Paper Series*.
- Guerini M., Nesta L., Ragot X., Schiavo S. *et al.*, 2020, « Firm liquidity and solvency under the Covid-19 lockdown in France », *OFCE Policy Brief*, n° 76.
- Guerrieri V., Lorenzoni G., Straub L., Werning I., 2020, « Macroeconomic implications of Covid-19: Can negative supply shocks cause demand shortages ? », *NBER Working Paper Series*.
- Hall R. E., Jones C. I., Klenow P. J., 2020, « Trading off consumption and Covid-19 deaths », *Stanford University Working Paper*.
- Heyer É., 2020, « Défaillances d'entreprises et destructions d'emplois. Une estimation de la relation sur données macro-sectorielles », *Revue de l'OFCE*, n° 168, pp. 163-177.
- Heyer E., Timbeau X., 2020, « Évaluation de la pandémie de Covid-19 sur l'économie mondiale », *Revue de l'OFCE*, n° 166.
- Ibn-Mohammed T., Mustapha K., Godsell J., Adamu Z., Babatunde K., Akintade D., Acquaye A., Fujii H., Ndiaye M., Yamoah F. *et al.*, 2020, « A critical analysis of the impacts of Covid-19 on the global economy and ecosystems and opportunities for circular economy strategies », *Resources, Conservation and Recycling*, n° 164.
- ICL, 2020, *Imperial College London combined reports website*. URL: <https://github.com/mrc-ide/global-lmic-reports>.
- IMF, 2020, *The IMF and Covid-19 (Coronavirus)*. URL: <https://www.imf.org/en/Topics/imf-and-covid19>.
- Jordà Ò., Singh S. R., Taylor A. M., 2020, « Longer-run economic consequences of pandemics », *NBER Working Paper Series*.
- Kermack W. O., McKendrick A. G., 1927, « A contribution to the mathematical theory of epidemics », *Proceedings of the Royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character*, n° 115, pp. 700-721.
- McKibbin W. J., Fernando R., 2020, « The global macroeconomic impacts of Covid-19: Seven scenarios », *CAMA Working Paper*, n° 19/2020.
- McKibbin W. J., Sidorenko A. *et al.*, 2006, *Global macroeconomic consequences of pandemic influenza*, Lowy Institute for International Policy Sydney, Australia.
- McKibbin W. J., Triggs A., 2018, « Modelling the g20 », *CAMA Working Paper*.
- McKibbin W. J., Wilcoxon P. J., 1999, « The theoretical and empirical structure of the g-cubed model », *Economic modelling*, n° 16, pp. 123-148.
- Newman M., 2018, *Networks*. Oxford university press.

- Nordhaus W., 2019, « Climate change: the ultimate challenge for economics », *American Economic Review*, n° 109, pp. 1991-2014.
- Nowzari C., Ogura M., Preciado V. M., Pappas G. J., 2015, « A general class of spreading processes with non-markovian dynamics » in : 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), IEEE. pp. 5073-5078.
- OECD, 2020a, *Tackling coronavirus (Covid-19): Contributing to a global effort*, URL: <https://www.oecd.org/coronavirus/en/>.
- OECD, 2020b, *Beyond containment: Health systems responses to Covid-19 in the OECD*. URL: <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/beyond-containment-health-systems-responses-to-covid-19-in-the-oecd-6ab740c0/>.
- Omran A. R., 1971, « The epidemiologic transition: A theory of the epidemiology of population change », *The Milbank Memorial Fund Quarterly*, n° 49, pp. 509-538.
- Prakash B. A., Chakrabarti D., Faloutsos M., Valler N., Faloutsos C., 2010, « Got the flu (or mumps) ? Check the eigenvalue ! », *arXiv preprint arXiv*, n° 1004.0060 .
- Primiceri G. E., Tambalotti A., 2020, « Macroeconomic forecasting in the time of Covid-19 », manuscript, Northwestern University .
- Ragot X., 2020, « La crise de la Covid-19 changera-t-elle notre façon de faire de l'économie ? », *Revue de l'OFCE*, n° 166, pp. 5-21.
- Timmer M. P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer R., de Vries G. J., 2015, « An illustrated user guide to the world input-output database: the case of global automotive production », *Review of International Economics*, n° 23, pp. 575-605.
- Toda A. A., 2020, « Susceptible-infected-recovered (sir) dynamics of covid-19 and economic impact », *arXiv preprint arXiv*, n° 2003.11221.
- Touzé V., Ventelou B., 2002, « Sida et développement : un enjeu mondial », *Revue de l'OFCE*, hors série mars, pp. 153-174.
- WorldBank, *The World Bank Group and COVID-19 (coronavirus)*. URL: <https://www.worldbank.org/en/who-we-are/news/coronavirus-covid19>.
- WTO, Covid-19 and world trade. URL: https://www.wto.org/english/tratop_e/covid19_e/covid19_e.htm.