

LES MODÈLES MULTI-AGENTS ET LEURS CONSÉQUENCES POUR L'ANALYSE MACROÉCONOMIQUE

Mauro Napoletano

OFCE, Sciences Po ; SKEMA Business School et Université de la Côte d'Azur (GREDEG)

Cet article analyse les progrès récents de la modélisation multi-agents appliquée à l'analyse macroéconomique. Je présente d'abord les principaux ingrédients des modèles multi-agents. Ensuite, en s'appuyant sur des exemples tirés de travaux récents, je montre que les modèles multi-agents apportent des éclairages complémentaires ou nouveaux sur des questions macroéconomiques clés telles que les cycles économiques endogènes, les interactions entre cycles et croissance à long terme, le rôle des ajustements de prix versus quantités dans le retour au plein emploi. Enfin, je discute certaines limites des modèles multi-agents et comment ils sont actuellement abordés dans la littérature.

Mots clés : modèles multi-agents, analyse macroéconomique, cycles économiques endogènes, dynamique à court et à long terme, politique monétaire et budgétaire, ajustements de prix ou des quantités.

Cet article examine les avancées récentes de la modélisation multi-agents en macroéconomie. L'objectif est de donner un bref aperçu de ses principes constructifs et de montrer, exemples de travaux récents à l'appui, que cette nouvelle catégorie de modèles éclaire sous un jour nouveau plusieurs questions macroéconomiques, traitées habituellement dans les modèles plus orthodoxes.

Dans les modèles multi-agents (*Agent-Based Models*, ABMs), l'économie est représentée comme un système dynamique d'agents hétérogènes en interaction. L'hétérogénéité porte sur les caractéristiques des agents (par exemple la taille des entreprises ou le niveau

de revenu des ménages) et/ou leurs comportements (par exemple leurs stratégies d'anticipation). Dans ces modèles, les agents peuvent interagir au niveau global par les prix (comme ils le font dans les modèles traditionnels macroéconomiques) mais aussi par des variables hors-prix (par exemple l'imitation d'une technologie ou une stratégie d'anticipation empruntée à une autre entreprise de l'économie). En outre, l'hétérogénéité des agents et la structure de leurs réseaux d'interactions ne sont pas stables mais évoluent au cours du temps et ce, en même temps que les forces de tout le système. Autre principe constructif important de ces modèles : ils ne s'attachent pas exclusivement aux états d'équilibre de l'économie. En effet, ils permettent aussi d'analyser les dynamiques du système dans des situations où certains marchés ne sont pas établis et/ou certains agents n'optimisent pas leur comportement et reçoivent des incitations pour en changer¹. En conséquence, les ABMs ne font pas l'hypothèse d'une parfaite rationalité d'agents dont les décisions relèveraient d'une optimisation inter-temporelle ; ils s'appuient plutôt sur une rationalité limitée des agents qui, dans les ABMs, se comportent selon des règles très simples dans un environnement trop complexe pour que quiconque le comprenne (Howitt, 2011 ; Tesfatsion, 2006). La rationalité limitée des agents peut aller de l'optimisation statique ou évolutive à la mise en place de routines fondées sur l'évidence empirique concernant le comportement réel des agents. On peut, enfin, associer à la modélisation multi-agents un concept important, celui de *propriété émergente*. Plus précisément, un ABM n'établit pas d'isomorphisme entre les propriétés des agrégats du système et les hypothèses spécifiques concernant les caractéristiques ou le comportement d'agents singuliers peuplant le système. Les propriétés des agrégats découlent des interactions entre les agents qui peuplent l'économie (Turrell, 2016). Cette philosophie d'une modélisation *bottom-up*, soit « procédant de bas en haut », n'est pas sans rappeler celle que la mécanique quantique appliquée depuis presque un siècle dans l'étude physique de l'interaction des particules.

1. Pour pouvoir rendre compte des états de déséquilibre, il faut aussi que le comportement du système ne soit plus décrit par l'évolution des variables d'état qui résultent de la solution du système d'équations. Dans une modélisation à base d'agents, toutes les variables sont au contraire actualisées en suivant une chronologie précise des événements.

L'une des conséquences les plus directes de l'introduction de l'hétérogénéité des agents et des structures d'interaction est la conception de l'économie comme un système dynamique de grande dimension où nulle solution analytique n'est plus possible. C'est pourquoi les ABMs recourent généralement à des simulations probabilistes à grande échelle, relevant de la méthode dite de Monte Carlo, déjà largement utilisée en économétrie et en statistique.

La modélisation multi-agents est une tradition ancienne et bien établie dans d'autres disciplines scientifiques, notamment en physique², en biologie et en informatique. Elle se répand aussi de plus en plus dans les sciences sociales, notamment en sociologie et en archéologie. Elle est moins bien acceptée en économie, même si dans le sillage de la crise de 2007-2008, les critiques faites aux modèles macroéconomiques classiques ont contribué à la tirer hors des lointaines périphéries de la théorie économique. Depuis lors, la modélisation à agents multiples est considérée avec une attention croissante en tant qu'elle fournit des outils utiles à l'analyse des principaux marchés, notamment du marché financier et de celui de l'énergie (voir, par exemple, Le Baron, 2006 ; Testfatsion, 2006, ainsi que Weidlich et Weit, 2008), mais elle fournit aussi des instruments nouveaux utilisés dans l'étude des dynamiques économiques et du changement climatique (voir par exemple, Balint *et al.*, 2017), ainsi que l'analyse macroéconomique (voir Haldane, 2016).

Cet article n'a pas la prétention de fournir une revue exhaustive des travaux sur les ABMs utilisés dans l'analyse macroéconomique. On trouvera par exemple de bonnes revues actualisées chez Fagiolo et Roventini (2017) ou chez Turrell (2016) tandis que des collections de travaux de recherche récents reposant sur un ABMs sont inclus dans Delli Gatti *et al.* (2011), Gaffard et Napoletano (2012) ou Gallegati *et al.* (2017). Cet article tentera au contraire d'expliquer les conséquences de certains concepts fondamentaux de la modélisation multi-agents. Pour cela, il s'appuiera sur des exemples tirés pour l'essentiel de travaux récents de l'auteur et de ses co-auteurs. Il montrera comment ces modèles offrent *des perspectives complémentaires sinon totalement nouvelles* sur des questions

2. Turrell (2016) remarque que l'un des premiers scientifiques à avoir appliqué les techniques de la modélisation multi-agents fut Enrico Fermi, dans le but de résoudre des problèmes impliquant le transport de neutrons à travers la matière.

fondamentales de la macroéconomie, telles que les fluctuations agrégées produites par des chocs idiosyncratiques micro-économiques, mais aussi les effets persistants à long terme des fluctuations de court terme (et, par voie de conséquence, des politiques budgétaires et monétaires), ou encore le rôle joué par les prix dans le retour de l'économie au plein emploi. Enfin, il examinera certaines critiques adressées à la modélisation macroéconomique multi-agents et les réponses apportées par la littérature récente à ces critiques.

1. Modélisation multi-agents : propriétés émergentes et approche générative

Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, l'un des éléments moteurs de la modélisation multi-agents est le concept de propriété émergente, c'est-à-dire une propriété globale d'un système (par exemple un cycle économique) qui ne peut dériver d'hypothèses émises concernant les composants singuliers de ce système (par exemple les ménages ou les entreprises). Aussi les ABMs empruntent-ils une approche *générative*. L'objectif du modèle est de fournir une micro-spécification concernant la nature de l'hétérogénéité des agents et de leur interaction. Le modèle est alors validé – c'est-à-dire qu'il apporte une explication à un macro-phénomène donné – s'il est capable de développer ce phénomène à partir d'une interaction précise parmi des agents hétérogènes. Comme le note Epstein (2007, chap. 1) :

« Les modèles multi-agents fournissent par le calcul la démonstration qu'une micro-spécification donnée est en fait suffisante à générer la macro-structure considérée. Les modélisateurs peuvent à cette fin utiliser les statistiques pour mesurer si une micro-spécification donnée a un pouvoir générateur suffisant – c'est-à-dire tester l'accord entre le monde réel et les macro-structures générées [...]. L'adéquation est bonne lorsqu'elle démontre que la macro-structure cible – l'*explanandum*, la chose qui doit être expliquée –, qu'il s'agisse d'une distribution de patrimoine, d'un modèle de ségrégation, d'un équilibre des prix, d'une norme ou de quelque autre macro-structure, peut effectivement être atteinte par l'application répétée des règles d'interactions entre agents : elle est effectivement calculable par la société d'agents. [...] Ainsi pourrait-on résumer la devise des sciences sociales génératives : si vous n'êtes pas parvenu à déve-

lopper une propriété, c'est que vous n'avez pas pu expliquer son émergence. »

L'approche générative suivie par les ABMs s'oppose nettement à l'approche *réductionniste*, selon laquelle l'explication d'un phénomène peut être réduite à quelques lois fondamentales gouvernant le comportement des éléments singuliers du système. Cette approche réductionniste a encore les faveurs de nombreux économistes³, et l'auteur de ces lignes pense sincèrement que cette prédominance explique pour une bonne part la défiance qui s'attache encore aux ABMs, souvent considérés comme des « boîtes noires », en l'occurrence des modèles où les causes et les mécanismes conduisant au résultat sont brouillés. En revanche, dans d'autres disciplines, notamment en physique, c'est le réductionnisme qui est remis en question. L'insatisfaction est très bien expliquée par Philip Anderson, Prix Nobel de physique en 1977 (Anderson, 1972) :

« La possibilité de tout réduire en lois fondamentales n'implique pas qu'on puisse partir de ces lois pour reconstruire l'univers. En fait, plus les physiciens des particules élémentaires nous en disent au sujet de la nature des lois fondamentales, moins elles semblent pertinentes face aux problèmes extrêmement réels du reste de la science et moins encore face à ceux de la société. [...] Il apparaît que le comportement d'importants agrégats complexes de particules élémentaires ne peut être compris au moyen d'extrapolations simples des propriétés de quelques-unes de ces particules. Mais qu'au contraire, des propriétés entièrement nouvelles se font jour à chaque niveau de complexité, et la compréhension de ces nouveaux comportements nécessite des recherches qui sont, je pense, d'une nature tout aussi fondamentale que celles qui ont été menées jusque-là. »

Il s'ensuit que l'approche générative (ou *bottom-up*) ne se contente pas d'identifier les « causes » d'un phénomène donné, mais plutôt de chercher comment à partir de certaines hypothèses concernant le comportement des agents et les structures d'interaction, le modèle est capable ou non de reproduire le phénomène à un niveau « macro ». L'approche a aussi à voir avec le concept de « causalité séquentielle » décrit par Hicks (1979) dans le sens où un

3. La faveur du réductionnisme résiste malgré les résultats fondamentaux apportés par la théorie de l'équilibre général (théorème de Sonnenschein-Mantel-Debreu) selon lesquels on ne peut obtenir, en partant directement des hypothèses concernant le micro-comportement des agents, des fonctions de demande excédentaire agrégées se comportant convenablement (voir, pour un résumé, Kirman, 1992).

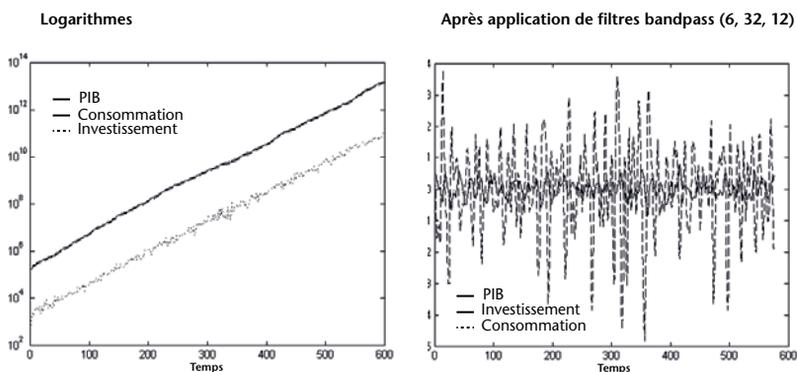
« phénomène » donné (e.g. une récession) peut être ou non la conséquence directe d'une « cause » spécifique (e.g. un choc exogène) selon la séquence des décisions (et des contraintes résultantes) qui se produisent dans le laps de temps. Cette séquence peut fondamentalement modifier le chemin menant à l'émergence d'une propriété donnée, de sorte qu'il n'est pas toujours possible d'établir un lien direct entre la cause spécifique et ses effets.

Tentons maintenant de donner un exemple de propriété émergente dans un ABM. On prendra le modèle K+S [Keynes+Schumpeter], tel que développé dans Dosi *et al.* (2010, 2013, 2015, 2016, 2017). La micro-spécification du modèle décrit une économie composée d'entreprises produisant des biens d'équipement et de consommation, d'une main-d'œuvre, de banques, d'un gouvernement et d'une banque centrale. Les entreprises produisant des biens d'équipement ont une activité de R&D et fabriquent des machines-outils hétérogènes. Les entreprises produisant des biens de consommation investissent dans de nouvelles machines et livrent des biens de consommation homogènes. Ces dernières financent leur production et leur investissement avec leurs actifs liquides, et si ceux-ci ne suffisent pas, ils demandent un crédit à leur banque. Des niveaux de production et d'investissement plus élevés augmentent la dette des entreprises, abaissent leur valeur nette et par conséquent accroissent leur risque d'insolvabilité. Les banques, en retour, peuvent rationner davantage le crédit et, ce faisant, contraignent les entreprises à limiter leur investissement et leur production, déclenchant ainsi une possible récession. La faillite des banques peut survenir de façon endogène après accumulation des pertes sur prêts dans leurs bilans. Les crises bancaires entraînent des coûts directs de renflouement provenant du budget de l'État et peuvent par conséquent affecter les dynamiques du déficit budgétaire et de la dette publique. Ces dernières peuvent également varier en fonction du montant des recettes fiscales et des allocations chômage au cours du cycle économique.

Le modèle K+S génère comme propriétés émergentes les principaux faits stylisés au niveau macroéconomique. Par exemple, il génère les séries temporelles du PIB, de la consommation et de l'investissement affichant une croissance sur le long terme (graphique 1, gauche), mais aussi les fluctuations économiques sur le court terme (graphique 1, droite). En outre, la liste des faits

stylisés reproduite ne se limite pas aux seuls agrégats. Le modèle génère aussi un vaste éventail de faits caractérisant les dynamiques transversales des entreprises, par exemple une distribution leptokurtique de leur taux de croissance⁴. Il est important de souligner qu'aucune de ces propriétés n'est la conséquence directe d'hypothèses spécifiques sur le comportement des entreprises concernées. Par exemple, ni les récessions ni les expansions ne sont générées par une réponse propre des entreprises à quelque choc agrégé. Au contraire, toutes les propriétés mentionnées sont le fruit de chocs technologiques idiosyncratiques qui se diffusent du secteur des biens d'investissement aux biens de consommation au travers des interactions en matière d'investissement⁵.

Graphique 1. Séries temporelles de la production, de la consommation et de l'investissement



Source : Dosi et al. (2015).

La diffusion de la technologie est hétérogène au sein des entreprises dans la mesure où leur effort d'investissement diffère, selon leur anticipation de la demande finale et parce qu'elles sont soumises à des contraintes financières plus ou moins fortes. Il en résulte que le niveau d'investissement agrégé détermine, à son tour, l'ensemble de l'activité économique, mais aussi la disponibilité future du crédit : les entreprises accumulent de la dette au titre

4. En cela, le modèle se conforme aux vœux d'Anderson (1972), qui souhaitait qu'on fournisse des explications aux différents niveaux de la complexité.

5. En outre, aucune hétérogénéité des agents, même modérée, n'est imposée *ex ante*. Au contraire, les entreprises sont par hypothèse complètement homogènes au début de chaque exercice de simulation.

de leur investissement et de leur activité de production, ce qui peut les rendre fragiles financièrement jusqu'à les conduire à la faillite qui, à son tour, à travers l'effet des créances irrécupérables sur la valeur nette des banques, peut diminuer l'offre agrégée de crédit et augmenter le rationnement du crédit. Les tensions qu'on vient d'évoquer, entre *changement* (induit par l'innovation et la diffusion des nouvelles technologies) et *coordination* (induite par la demande effective et les contraintes de crédit), déterminent non seulement la croissance de l'économie à long terme mais créent aussi les cycles d'activité.

La section qui suit développe les points mentionnés ci-dessus et examine les perspectives que la modélisation à agents multiples peut fournir à différentes questions d'ordre macroéconomique.

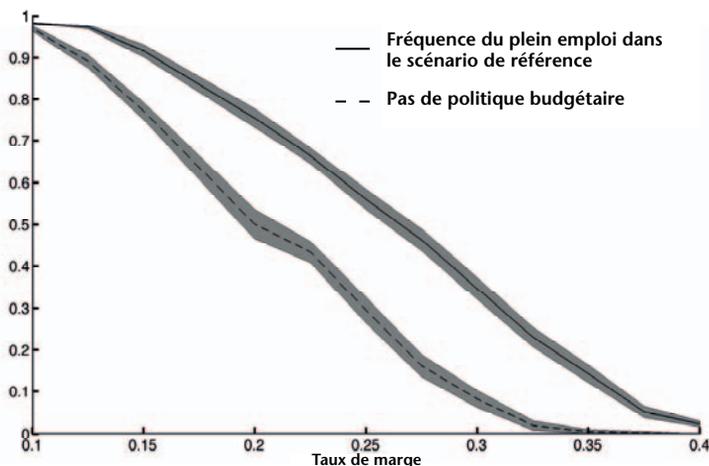
2. Quelques implications de la modélisation à agents multiples pour l'analyse macroéconomique

Les ABMs empruntent l'approche générative exposée précédemment afin d'expliquer un large éventail de phénomènes macroéconomiques et d'évaluer l'impact des différentes politiques macroéconomiques. La liste – non exhaustive – comprend la génération des cycles d'activité et de la croissance à long terme en conjuguant dynamiques schumpetériennes de l'innovation et dynamiques keynésiennes de la demande (le model K+S de Dosi *et al.*, 2010, 2013, 2015, 2017), la génération des fluctuations d'activité à partir de l'évolution de la distribution des risques de faillite des banques (e.g. Delli Gatti *et al.*, 2005, 2010 ; Cincotti *et al.*, 2010 ou Mandel *et al.*, 2015), l'analyse des interactions entre inégalités et croissance (e.g. Dosi *et al.*, 2013 ; Ciarli *et al.*, 2010, Cardaci et Saraceno, 2015, ou Caiani *et al.*, 2016), l'analyse de la combinaison des politiques budgétaires et monétaires (e.g. Dosi *et al.*, 2013, 2015), l'analyse de l'influence des structures politiques sur la recherche et le développement ainsi que sur l'innovation (e.g. Dosi, 2010, ou Russo *et al.*, 2007), l'analyse des interactions entre changement climatique et dynamiques économiques (Lamperti *et al.*, 2017), l'impact des réformes du marché du travail sur les dynamiques agrégées (Napoletano *et al.*, 2012, ou Dosi *et al.*, 2016, 2017) et celle des politiques de cohésion sur la convergence régionale (Dawid *et al.*, 2014), ainsi que les effets conjoints des

politiques monétaire et macro-prudentielle (Ashraf *et al.*, 2017, ou Popoyan *et al.*, 2017).

Cette longue liste traduit à elle seule la grande flexibilité des ABMs, auxquels tant les analyses normatives que positives des questions macroéconomiques peuvent recourir. Comme mentionné plus haut, il n'est pas dans l'ambition de cet article de donner un compte-rendu complet des résultats obtenus par la modélisation multi-agents. L'attention est portée sur quelques exemples de façon à illustrer les possibilités de réponses offertes par les ABMs à quelques questions macroéconomiques fondamentales et ce, dans une perspective différente de celle des modèles plus classiques.

Graphique 2. Fréquence du plein emploi dans le scénario de référence et dans celui qui élimine toute politique budgétaire



Source : Dosi *et al.* (2013).

Exemple 1 : cycles économiques endogènes

Les ABMs présentent un avantage certain par rapport aux modèles d'équilibre général stochastique dynamique (mieux connu par la profession sous l'acronyme DSGE), y compris lorsqu'ils intègrent des agents hétérogènes. Dans ces modèles, les phases d'expansion et de récession résultent respectivement de chocs agrégés positifs ou négatifs frappant un agent représentatif ou, dans les travaux les plus récents, un ensemble d'agents hétérogènes. Dans les ABMs, en revanche, le système peut tout autant

généraliser des situations où l'économie connaît le plein emploi que d'autres où elle est plongée dans des récessions plus ou moins profondes, le passage d'une situation à une autre se faisant de façon endogène (voir graphique 1 et la discussion dans la section précédente). Dans les ABMs, l'endogénéité des cycles d'activité provient de l'hétérogénéité des agents et des mécanismes d'interaction qui introduisent plusieurs non-linéarités dans le système dynamique décrivant l'économie. Ces modèles donc permettent d'analyser les conséquences de l'agrégation des comportements (et des interactions) individuels dans la génération des fluctuations⁶.

Cette capacité propre aux ABMs à générer de façon endogène des fluctuations économiques n'est pas seulement importante d'un point de vue purement théorique. Elle signifie aussi que ces modèles constituent des outils pertinents pour explorer (voire contrôler par la mise en œuvre de politiques adaptées) les mécanismes économiques qui déclenchent l'instabilité durant une phase d'expansion ou sèment les graines de la récession. Par exemple, la fréquence des états pendant lesquels l'économie connaît le plein emploi peut être liée à certains paramètres qui caractérisent les différents scénarios institutionnels et les choix politiques (par exemple la structure des interactions, le niveau d'inégalité des revenus ou l'intensité de la politique budgétaire). Ainsi, dans Dosi *et al.* (2013), la fréquence moyenne des états de plein emploi, c'est-à-dire le temps que l'économie passe en moyenne à l'équilibre du plein-emploi, est inversement liée à l'inégalité de répartition entre profits et salaires (comme le montre le niveau du taux de marge sur le graphique 2). En outre, l'incidence de l'équilibre au plein emploi chute quel que soit le niveau d'inégalité si la politique budgétaire est totalement absente (le scénario où il n'y a pas de politique budgétaire).

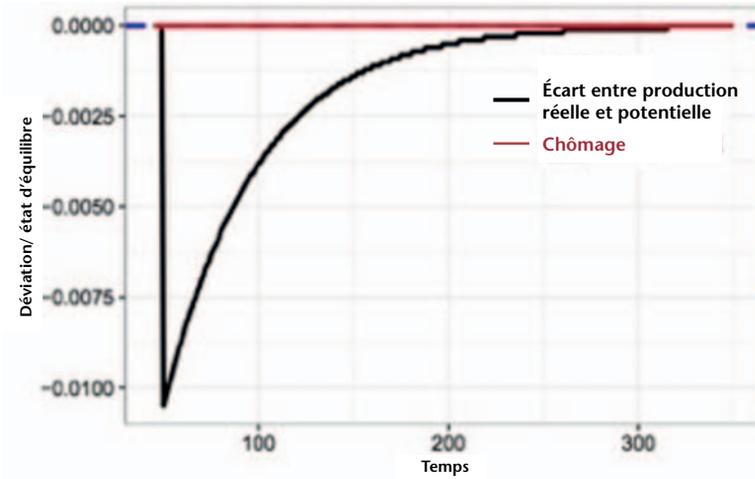
Guerini *et al.* (2018) fournissent un autre modèle illustrant bien le rôle joué par l'hétérogénéité des agents et les interactions générant des cycles d'activité endogènes. Dans leur article, ils analysent le comportement d'une économie soumise à deux protocoles d'appariements (*matching protocols*) concurrents : (a) un scénario

6. En revanche, cette analyse n'est pas possible dans les modèles DSGE, encore plus dans ceux qui reposent sur l'hypothèse d'agent représentatif. Voir aussi le papier de Dos Santos Ferreira dans ce numéro spécial.

d'appariement centralisé où un adjudicateur fictif résout tout problème de coordination entre les agents et (b) un scénario d'appariement décentralisé où les agents interagissent localement sur les marchés. Dans ce dernier cas, les frictions d'appariement et l'hétérogénéité des agents peuvent conduire à des répartitions imparfaites des biens et du travail. En outre, les ménages doivent faire face à des contraintes de liquidité (leur consommation est limitée par le niveau de leur patrimoine). Les auteurs initialisent les variables du modèle (consommation, salaires, prix, production, valeur nette des entreprises, patrimoine des ménages, etc.) en leur attribuant des valeurs compatibles avec le plein emploi dans une économie d'agents homogènes à l'équilibre. Ils laissent alors des chocs technologiques idiosyncratiques (et autorégressifs) négatifs frapper cette économie au niveau des entreprises, et étudient la stabilité de l'équilibre qui en découle ainsi que les propriétés de convergence du modèle. Le comportement du modèle selon que celui-ci répond à l'un ou l'autre protocole d'appariement est très différent. Dans le scénario centralisé, le système économique est toujours capable de revenir à l'équilibre de plein emploi après des chocs de productivité. En outre, les fonctions impulsion-réponse générées (graphique 3) se comportent comme celles obtenues dans un DSGE standard et, finalement, l'hétérogénéité des agents tend à disparaître. Dans le scénario décentralisé en revanche, l'économie fluctue autour d'un équilibre de sous-emploi (graphique 4) et se caractérise par l'hétérogénéité persistante du comportement des ménages et des entreprises. Ces résultats complètement différents d'un scénario à l'autre sont générés par le fait que le scénario décentralisé conduit naturellement à un chômage frictionnel. Cependant, la présence de contraintes de liquidité pesant sur les ménages amplifie les effets du chômage frictionnel, ce qui conduit à une baisse de la demande agrégée sur le marché des produits, laquelle entretient à son tour une demande globale plus faible et un chômage plus élevé sur le marché du travail. Ce dernier exemple illustre combien la structure de l'interaction exerce une influence sur les propriétés dynamiques des agrégats de l'économie et dans quelles proportions elle peut amplifier une hétérogénéité, même faible, entre les agents, due par exemple à un chômage résultant de frictions dans la répartition du travail entre les entreprises.

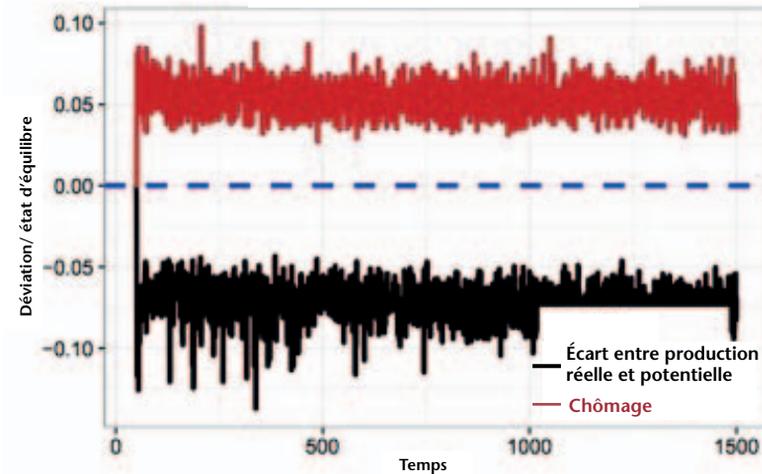
3. Production et chômage

Graphique 3. Impulsion-réponse de la production et du chômage dans le modèle de Guerini *et al.* (2018) selon le scénario d'appariement centralisé



Sur le graphique, la déviation/état d'équilibre représente les déviations par rapport à l'équilibre de plein emploi.
 Source : Guerini *et al.* (2017).

Graphique 4. Impulsion-réponse de la production et du chômage dans le modèle de Guerini *et al.* (2018) selon le scénario d'appariement centralisé



Sur le graphique, la déviation/état d'équilibre représente les déviations par rapport à l'équilibre de plein emploi.
 Source : Guerini *et al.* (2017).

Exemple 2 : Interactions entre dynamiques de long terme et de court terme dans une économie

La théorie macroéconomique se caractérise par une distinction très nette entre l'analyse des processus de croissance à long terme et celle des cycles d'activité. Cette dichotomie provient de l'hypothèse selon laquelle les problèmes de coordination se résolvent à long terme. Il s'ensuit que la croissance à long terme est principalement entretenue par les facteurs d'offre et, en premier lieu, par le progrès technique. En revanche, certains défauts de coordination peuvent survenir dans le court terme, en raison des déficiences de la demande agrégée. Ce cadre d'analyse a cependant ses limites, notamment parce qu'il ne permet pas de comprendre les mécanismes par lesquels le progrès technique se diffuse dans une économie et enchaîne ou non une croissance plus forte et comment l'instabilité inhérente aux processus d'évolution technologique peut être atténuée. Or, d'une part, les innovations technologiques peuvent avoir des conséquences sur la croissance à long terme de l'économie, tout autant que sur l'évolution à court terme de la production (et du chômage) au cours du cycle d'activité. De l'autre, la situation macroéconomique (telle que la détermine, par exemple, la demande agrégée, la disponibilité du crédit, etc.) module probablement la création et la diffusion des innovations technologiques ainsi que les performances à long terme de l'économie (Dosi *et al.*, 2017). Pour répondre aux questions qui viennent d'être évoquées, il faut considérer avec un minimum de sérieux la question du temps dans l'analyse économique, et rejeter l'idée d'un chemin de croissance équilibré vers lequel l'économie converge à long terme. Au contraire, l'évolution à long terme de l'économie résulte d'une séquence d'états de court terme caractérisés par une coordination imparfaite⁷ (voir Gaffard, 2017 et Dosi et Virgillito, 2017). Les ABMs sont très adaptés pour ce type d'analyse parce qu'ils ne s'attachent pas exclusivement aux états d'équilibre de l'économie. Ils peuvent donc servir à comprendre comment les déséquilibres inter-temporels (dus, par exemple, aux changements structurels induits par la technologie) et/ou des problèmes de coordination (dus, par exemple, à un

7. Cette idée de modèles de long terme émergeant d'une séquence d'ajustements imparfaits de court terme est tout à fait en adéquation avec l'approche générative examinée dans la section précédente.

déficit de la demande agrégée) peuvent affecter les dynamiques de long terme d'une économie, et comment différents types de politiques macroéconomiques peuvent agir dans un tel contexte. Les séries de résultats obtenus avec le modèle K+S par Dosi *et al.* (2010, 2013, 2015, 2017) sur les effets à court et long termes de la combinaison des politiques monétaires et budgétaires offrent un exemple de ce type d'exercice. Les tableaux 1 et 2 – provenant de Dosi *et al.* (2015) – montrent les effets des différentes combinaisons de politiques budgétaires et monétaires sur le taux de croissance du PIB réel et le taux de chômage. Les politiques budgétaires considérées sont les suivantes : une politique sans contrainte (*pas de règle*), deux politiques contraintes (par le pacte de stabilité et de croissance – PSC – et par le pacte budgétaire – TSCG) et, enfin, les mêmes politiques budgétaires contraintes, mais avec une possibilité de dérogation pour les phases de récession – $PSC_{dér.}$ et $TSCG_{dér.}$. Les politiques monétaires considérées respectent la règle de Taylor : une politique ciblée seulement sur le taux d'inflation – $TR_{\pi-}$, une politique de mandat dual (inflation-chômage) – $TR_{\pi,U}$ – et enfin la même politique monétaire, mais dans un scénario tenant compte aussi des écarts de taux sur les obligations d'État afin d'envisager de possibles réactions des taux d'intérêt à l'endettement public lorsque celui-ci atteint des niveaux élevés.

Tableau 1. Les effets des interactions entre politique budgétaire et politique monétaire sur le taux de croissance moyen du PIB

Politique budgétaire	Politique monétaire		
	TR_p	$TR_{p,U}$	<i>Spread</i>
Pas de règle	1	1,019** (3,730)	0,994 (1,017)
PSC	0,527** (6,894)	1,014 (1,157)	0,794** (3,982)
TSCG	0,572** (6,499)	0,958 (1,296)	0,765** (4,863)
$PSC_{dér.}$	0,995 (0,876)	1,013** (2,572)	0,991* (1,665)
$TSCG_{dér.}$	0,992 (1,388)	1,021** (4,169)	0,997 (0,524)

* significatif à 10 % près ; ** significatif à 5 % près.

Interactions des politiques budgétaires et monétaires ; valeurs normalisées des taux de croissance moyens du PIB selon différentes conditions d'expérience ; valeur absolue de la statistique t (test de Student) de simulation de H_0 : « pas de différence entre la situation initiale et l'expérience » entre parenthèses ; *Politiques budgétaires* : pas de règle budgétaire (*pas de règle*) ; règle des 3 % de déficit (*PSC*) ; règle de réduction de la dette (*TSCG*) ; PSC avec clause dérogatoire ($PSC_{dér.}$) ; TSCG avec clause dérogatoire ($TSCG_{dér.}$). *Politiques monétaires* : règle de Taylor indexée sur la seule inflation (TR_p) ; règle de Taylor à mandat dual ($TR_{\pi,U}$) ; Taylor indexée sur la seule inflation en présence ajustement des spreads obligataires (*spread*).

Source : Dosi *et al.* (2015).

Tableau 2. Les effets des interactions entre politique budgétaire et politique monétaire sur le taux de chômage

Politique budgétaire	Politique monétaire		
	TR_p	TR_{pU}	<i>Spread</i>
Pas de règle	1	0,322** (5,903)	1,068 (0,468)
<i>PSC</i>	5,692** (8,095)	0,909 (0,555)	4,201** (6,842)
<i>TSCG</i>	5,706** (7,585)	1,383 (1,350)	4,963** (7,443)
<i>PSC_{dér.}</i>	1,419** (2,088)	0,343** (5,527)	1,680** (3,495)
<i>TSCG_{dér.}</i>	1,948** (3,928)	0,317** (5,886)	1,679** (3,139)

* significatif à 10 % près ; ** significatif à 5 % près.

Interactions des politiques budgétaires et monétaires. Valeurs normalisées des taux de chômage moyens en fonction des conditions d'expérience. Valeur absolue de la statistique *t* (test de Student) de simulation de H_0 : « pas de différence entre la situation initiale et l'expérience » entre parenthèses.

Source : Dosi *et al.* (2015).

Les valeurs reportées dans les tableaux sont relatives à la situation où la politique budgétaire est non contrainte et où la règle monétaire cible uniquement l'inflation. Les résultats qui apparaissent à l'analyse des tableaux est que les politiques budgétaire et monétaire ont des effets réels significatifs à court terme, comme le montrent les différences significatives de taux de chômage selon les différents scénarios. En outre, elles importent aussi pour la détermination du taux de croissance à long terme de l'économie. Plus précisément, les contraintes exercées sur la politique budgétaire ont des effets délétères tant sur le chômage que sur la croissance de l'économie à long terme, seulement atténués par l'introduction de clauses dérogatoires ou par le mandat dual fixé à la politique monétaire.

En dehors des effets produits par les combinaisons spécifiques de politiques monétaire et budgétaire, les résultats ci-dessus sont importants parce qu'ils révèlent l'inanité de la dichotomie classique qui occupe une place centrale dans les modèles macroéconomiques et mettent en lumière les effets que les politiques budgétaire et monétaire peuvent avoir à long terme sur les éléments moteurs d'une économie.

Comment les résultats ci-dessus sont-ils apparus ? Le mécanisme de transmission peut être attribué à une série d'ajustements de court terme qui façonnent les taux à long terme de l'innovation

technologique et de sa diffusion. Les contraintes imposées à la politique budgétaire réduisent ses capacités à servir d'amortisseur lorsque la demande se contracte. Le système se rapproche alors de ce qu'il serait en l'absence de toute politique budgétaire, et l'incidence des états de chômage augmente (voir aussi le graphique 2). Un chômage plus élevé et une demande agrégée plus faible ont également pour conséquence de minimiser les incitations des entreprises à investir (investissement et production suivent, dans le modèle K+S, le principe de la demande effective). De moindres investissements se traduisent par une diffusion plus lente des nouvelles technologies débouchant sur la construction de nouvelles machines vendues par le secteur des biens d'équipement. En outre, en raison de la réduction de la demande faite aux entreprises de biens d'équipement, la baisse des investissements diminue aussi les incitations des entreprises à développer leur recherche, ce qui débouche finalement sur une baisse des taux d'innovation.

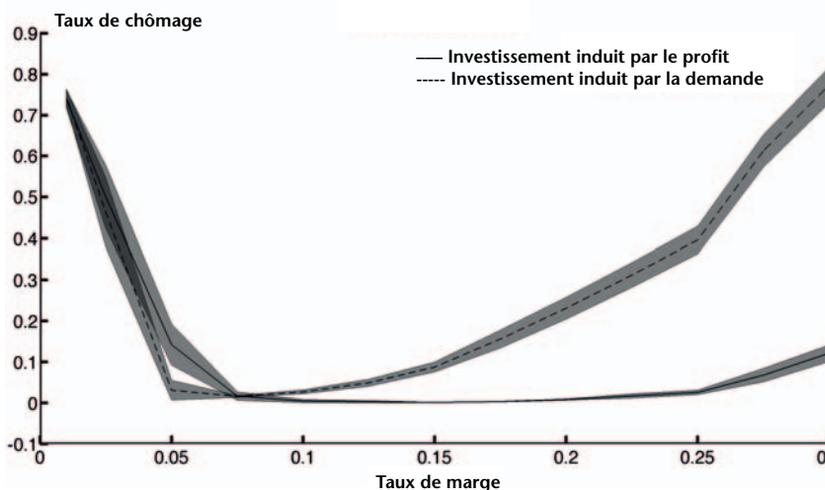
La section suivante examine brièvement un troisième exemple de questions macroéconomiques sur lesquelles les ABMs apportent des éclaircissements nouveaux: la possibilité de favoriser le retour au plein emploi en ajustant prix et salaires.

Exemple 3 : l'ajustement des prix et salaires et ses conséquences sur la résorption du chômage

Depuis la *Théorie générale* de Keynes (1936), l'une des questions les plus débattues en macroéconomie est de savoir si l'évolution des salaires réels est capable ou non de résorber les déséquilibres du marché du travail et de restaurer le plein emploi. Aujourd'hui, l'idée d'une relation inverse entre salaires réels et chômage est solidement enracinée dans les modèles macroéconomiques standard. Les résultats récents obtenus par les ABMs montrent que la forme de la relation entre salaire réels et chômage est très dépendante du contexte : elle est déterminée par les règles qui régissent les entreprises sur le marché des produits et du travail ainsi que par les protocoles spécifiques d'interaction des agents sur les deux marchés. Il en résulte que la relation inverse entre salaires réels et chômage n'apparaît que dans quelques cas bien particuliers. Le graphique 5 montre ainsi que cette fameuse relation inverse dépend des règles propres aux entreprises qui déterminent le

niveau d'investissement. Ce graphique est tiré de *Napoletano et al. (2012)* qui utilisent le modèle K+S décrit aux sections précédentes pour analyser le comportement de l'économie selon deux scénarios distincts d'investissement des entreprises : le premier est « induit par le profit », c'est-à-dire que le niveau d'investissement souhaité est fonction des profits réalisés dans le passé par l'entreprise ; le second est « induit par la demande », c'est-à-dire que le niveau d'investissement dépend de la demande attendue sur les marchés de produits. Notons que le premier archétype traduit l'idée d'un niveau d'investissement essentiellement déterminé par la rentabilité des entreprises. Le second archétype emprunte beaucoup à l'idée keynésienne de demande effective.

Graphique 5. La relation entre le taux de chômage moyen et le taux de marge dans le modèle K+S



Source : *Napoletano et al. (2012)*.

Le graphique 5 décrit la relation entre le chômage et le taux de marge fixé par les entreprises sur le marché des produits. Lorsque le taux de marge augmente, la part du produit par travailleur que les entreprises paient aux travailleurs au titre des salaires réels décroît en proportion. Le graphique indique donc que le chômage décroît avec l'augmentation du taux de marge dans le scénario induit par le profit. En baissant les salaires réels, on diminue donc les taux de chômage, comme dans les modèles macroéconomiques standard.

Ceci s'explique par le fait qu'un niveau plus bas des salaires réels accroît les profits des entreprises, avec pour conséquence une incitation plus forte à investir (avec aussi une trésorerie plus importante pour financer ces investissements). La hausse de l'investissement entraîne à son tour celle de la demande agrégée qui entraîne une baisse du chômage.

Les choses sont différentes si les entreprises fixent leur investissement sur la base de la demande attendue. De fait, la relation entre taux de marge et taux de chômage prend la forme d'une courbe en « U » dans le scénario induit par la demande, indiquant que des salaires réels élevés ou bas peuvent alors générer un chômage élevé. Ce résultat apparemment surprenant est expliqué par le rôle double joué par les salaires réels dans ce scénario. D'une part, les salaires réels déterminent la consommation et par conséquent la demande finale à laquelle les entreprises doivent répondre : la demande de consommation décroît donc à mesure que nous allons de la gauche vers la droite sur le graphique 5, ce qui incite peu les entreprises à investir. D'autre part, les salaires réels affectent aussi les profits et par conséquent la capacité des entreprises à financer leurs investissements sur fonds propres quand les salaires réels sont élevés : les entreprises qui ont de faibles taux de marge ont une forte incitation à investir, mais leurs investissements sont contrariés par les contraintes financières auxquelles elles doivent faire face en raison de leurs faibles profits. L'investissement effectif est donc faible et le chômage élevé. Napoletano *et al.* (2012) analysent aussi les effets de la flexibilité des salaires nominaux sur le chômage. Ils établissent que des salaires nominaux plus flexibles favorisent la baisse du chômage dans le scénario induit par le profit mais pas dans celui induit par la demande. Dosi *et al.* (2017) généralisent le résultat mentionné ci-dessus en examinant un ensemble plus vaste de règles concernant les salaires et la détermination de la production⁸.

8. Les résultats qui viennent d'être énoncés quant au rôle joué par les ajustements du salaire réel en fonction du contexte ne sont pas tout à fait nouveaux dans la littérature. Ils ont notamment été soulignés dans les travaux de l'école française dite de la « régulation » (voir, par exemple, Boyer, 1988, Aglietta, 2000) et par ceux d'Amendola *et al.* (2004) ou de Howitt (1986). On doit néanmoins aux ABMs l'obtention de ces résultats dans le cadre de modèles à fondements micro-économiques peuplés d'agents interactifs hétérogènes et qui permettent explicitement la possibilité d'un déséquilibre du marché.

Les ABMs ont également été utilisés pour montrer que la structure des interactions entre les agents importe plus pour expliquer les résultats agrégés que les ajustements des salaires et des prix. Par exemple, Howitt et Clower (2000) étudient l'échange dans une économie primitive, peuplée d'agents qui n'ont d'autre connaissance de leur environnement que ce qu'ils ont appris lors de rencontres aléatoires avec d'autres agents, et qui souhaitent utiliser leurs ressources en échange de quelque chose qu'ils voudraient consommer. En partant d'une situation autarcique, sans organisation commerciale, ils montrent l'émergence d'un réseau cohérent d'unités commerciales (les « boutiques ») qui permet à presque tous d'exploiter pleinement les gains potentiels de l'échange. Howitt (2006) montre que la même économie génère un processus multiplicateur, dans lequel la faillite de l'une de ces entreprises commerciales accroît la probabilité de faillite des autres, ce qui peut déclencher une cascade de faillites entraînant d'importantes déperditions de la production agrégée jusqu'à ce qu'émerge un ensemble adéquat de boutiques de remplacement. Howitt (2006) montre en outre que la flexibilité des salaires et des prix n'est d'aucune utilité pour hâter la reprise, car ce ne sont pas des prix différents qui sont nécessaires, mais la réintroduction de structures organisationnelles qui permettent aux relations commerciales de se développer sans heurts. De la même façon, Guerini *et al.* (2018) utilisent le modèle décrit précédemment pour étudier les effets sur le chômage et sur l'écart entre production réelle et potentielle d'un meilleur processus d'appariement sur les marchés des biens et du travail. Ils montrent qu'en rendant la recherche du travail et des biens moins locale, l'économie se rapproche du plein emploi. En effet, l'économie tend alors vers le scénario d'appariement centralisé. Ils montrent en outre que ni la flexibilité totale ni la fixation stricte des salaires réels n'affectent ce résultat. La raison en est que les ajustements quantitatifs importent beaucoup plus que la réévaluation des prix. En se rapprochant du scénario centralisé, on réduit non seulement les frictions imputables au processus d'allocation de l'emploi mais aussi leur amplification sur les marchés des biens imputables aux réactions de la demande.

4. La macroéconomie multi-agents : résumé des résultats et discussion de ses limites

Dans cet article, j'ai présenté les principes constructifs des modèles macroéconomiques multi-agents et expliqué comment ils utilisent l'approche générative pour proposer une analyse des questions macroéconomiques, différente de l'approche réductionniste traditionnelle utilisée dans d'autres modèles macroéconomiques. À l'aide d'exemples, j'ai aussi illustré comment cette nouvelle classe de modèles peut fournir des éclairages nouveaux sur plusieurs questions centrales intéressant la macroéconomie. J'ai d'abord montré comment ces modèles peuvent générer des cycles économiques endogènes imputables aux interactions entre agents hétérogènes frappés par des chocs idiosyncratiques. Puis j'ai fait remarquer que ces modèles pouvaient servir à l'analyse des interactions entre dynamiques de court et de long termes d'une économie, comme à celle des effets pérennes des politiques monétaire et budgétaire. Enfin, j'ai mentionné comment on pouvait, grâce à ces modèles, éclairer d'un jour nouveau les conditions auxquelles les ajustements des salaires et des prix pouvaient ou non favoriser le retour d'une économie au plein emploi après qu'elle a subi un choc.

Il est généralement difficile d'obtenir de tels résultats avec les modèles plus classiques de la macroéconomie, par exemple de type DSGE. Ces derniers ont récemment réalisé des progrès significatifs en incorporant l'hétérogénéité des agents (par exemple, le nouveau modèle keynésien à agent hétérogène - HANK- de Kaplan *et al.*, 2017) et en étudiant l'effet de cette hétérogénéité sur les canaux de transmission des politiques budgétaire et monétaire (e.g. Algan et Ragot, 2010 ; Challe et Ragot, 2011). Ils ont aussi été enrichis par l'introduction de productivité endogène afin d'analyser les fluctuations de l'activité à moyen terme (Comin *et al.*, 2006) et de nouvelles versions de ces modèles peuvent aussi rendre compte de la multiplicité des équilibres (e.g. Farmer et Serletis, 2016). Enfin, ces modèles ont aussi été modifiés pour y inclure des éléments de rationalité limitée (e.g. Gabaix, 2016 ; Woodford, 2013, et les articles examinés dans Assenza *et al.*, 2014). *Cependant, les cycles économiques de ces modèles résultent de chocs agrégés exogènes. En outre, ils intègrent une séparation nette entre l'analyse de la dynamique à court et à long terme d'une économie.* En conséquence, ces modèles ne permettent pas d'analyser comment les interactions entre

agents hétérogènes peuvent générer une dynamique des agrégats qui bascule, de façon endogène, de phases d'utilisation complète des ressources à des récessions plus ou moins fortes, et comment tout cela peut avoir des effets persistants sur le comportement à long terme de l'économie. En outre, les modèles DSGE, conçus dans un cadre d'équilibre général complet, ne peuvent guère rendre compte du rôle joué par les ajustements quantitatifs – par opposition à celui joué par les ajustements de prix – pour permettre à l'économie de se redresser après un choc.

Les ABMs constituent donc un outil pertinent pour l'analyse macroéconomique. En même temps, ces modèles ont aussi leurs limites, dont certaines ont été mises en exergue dans des travaux récents. Je tenterai brièvement d'analyser quatre critiques soulevées contre les ABMs et les réponses qui leur sont apportées : i) le fait d'être des modèles « ad hoc », perdus dans « le monde sauvage de la rationalité limitée » (c'est la critique « de l'ad-hocquerie ») ; ii) la mauvaise compréhension des mécanismes de cause à effet (c'est la critique « de la boîte noire ») ; iii) l'incapacité des agents à répondre aux politiques mises en œuvre (c'est la « critique de Lucas ») ; iv), enfin, la faible utilisation des données réelles pour valider les modèles (c'est la critique de la « validation des données »).

Commençons par la critique d'« ad-hocquerie ». Il faut tout d'abord reconnaître qu'un degré comparable d'« ad-hocquerie » entache aussi les modèles où les agents optimisent, où différentes formes fonctionnelles de production et différentes fonctions d'utilité sont utilisées pour obtenir – à partir d'une maximisation sous contrainte(s) – les règles de comportements souhaités. Ensuite, les micro-fondements par lesquels les ABMs justifient leurs règles comportementales s'appuient sur des données empiriques ou expérimentales concernant le comportement réel des agents. Enfin, les ABMs sont généralement soumis à un test indirect de validation, c'est-à-dire qu'ils doivent pouvoir reproduire – avec les mêmes valeurs de paramètres – un très vaste ensemble de faits stylisés aux niveaux micro- et macroéconomique⁹.

9. Cela dit, comme exposé dans l'introduction au volume Gaffard et Napoletano (2012), il ne s'agit pas seulement de reproduire un seul fait stylisé, mais un très grand nombre en même temps. Et le nombre de faits stylisés qu'un ABMs tente de reproduire est généralement beaucoup plus grand que dans les modèles standard, ce qui impose déjà beaucoup de contraintes à l'ensemble des valeurs des paramètres qui peuvent être sélectionnées.

En ce qui concerne la critique de « la boîte noire », j'ai déjà expliqué plus haut qu'elle tient largement aux différences entre l'approche générative utilisée par les ABMs et l'approche réductionniste traditionnellement favorisée en économie. En outre, force est de constater que des mécanismes de cause à effet peuvent être mis en évidence par des analyses contrefactuelles – même dans des ABMs très complexes. Plus précisément, la structure des ABMs permet souvent de vérifier la présence de certaines dynamiques dans le modèle (en réglant les paramètres) et de tester comment les résultats diffèrent en fonction de l'activation ou de la neutralisation de ces dynamiques. On peut prendre pour exemple de cette approche les expériences qui ont été menées avec les différents types de politiques budgétaire et monétaire discutés plus haut ou encore les protocoles d'appariements sur les marchés du travail et des biens, ou, enfin, l'analyse par diagramme de phases réalisée dans Gualdi *et al.* (2015). En outre, cette analyse contrefactuelle peut être mise en avant dans la modélisation multi-agents, jusqu'à construire des groupes de traitement et de contrôle et à appliquer les mêmes méthodologies que celles qui sont utilisées en économétrie pour mettre en évidence les relations de cause à effet. Les articles de Neugart (2008) et de Petrovic *et al.* (2017) sont de bons exemples à cet égard.

Concernant la critique de Lucas, il est vrai que les ABMs – en accord avec un nombre croissant de données empiriques et expérimentales (voir par exemple, Assenza *et al.*, 2014) – ne font pas l'hypothèse d'anticipations rationnelles. En outre, de nombreux ABMs font usage d'agents dont les comportements reflètent des habitudes et/ou dont les anticipations sont naïves. Pour cette raison, ils sont plus facilement applicables à des situations où les agents sont confrontés à des contraintes concernant l'obtention ou le traitement de l'information pertinente sur les variables économiques et /ou à des situations où les limites financières et de revenus sont contraignantes (ce qui est souvent le cas dans une récession). En d'autres termes, ils sont plus facilement applicables à des situations où les anticipations des agents n'ont guère de conséquences. Cependant, de façon à apporter une réponse à la critique de Lucas, certains ABMs ont récemment introduit des agents avec des normes d'anticipation plus sophistiquées, tenant compte de phénomènes d'apprentissage par exemple (Evans et Honkapja,

2012). Les travaux d'Arifovic *et al.* (2010) ainsi que de Salle (2015) et de Dosi *et al.* (2017) offrent de bons exemples de ce nouveau courant de recherches en macroéconomie multi-agents.

Enfin, les ABMs ont été critiqués pour ne pas utiliser suffisamment les données empiriques dans leurs processus de validation, lesquelles sont au contraire largement utilisées pour calibrer et évaluer les modèles DSGE. Malgré la capacité des ABMs à reproduire un grand nombre de micro- et de macro-données, on ne peut que souscrire à cette critique et reconnaître un certain retard des ABMs à utiliser des techniques de validation des données plus élaborées. Sur ces prémisses, toute une littérature consacrée aux techniques de validation des modèles multi-agents est apparue récemment recouvrant un large éventail d'approches, allant des méthodes de distance minimale simulée aux algorithmes d'apprentissage automatique en passant par les méthodes d'identification induites dans des modèles vectoriels autorégressifs (VAR), soit pour estimer les paramètres des ABMs, soit pour vérifier la capacité des ABMs à reproduire les éléments des séries temporelles empiriques¹⁰. Fagiolo *et al.* (2017) présentent un récapitulatif de cet axe de recherche récent. Ainsi, Guerini et Moneta (2017) appliquent une analyse en composantes indépendantes pour comparer les structures causales de modèles VAR estimés sur des séries temporelles empiriques et sur des séries temporelles générées par le ABMs. Ils trouvent que les ABMs qu'ils utilisent permettent de reproduire entre 65 % et 80 % des relations causales engendrées par un modèle vectoriel autorégressif structurel (SVAR) estimé sur données réelles.

En conclusion, les ABMs constituent un nouvel outil permettant au macro-économiste d'explorer de nouvelles voies de recherche, qui sont inaccessibles aux modèles macroéconomiques traditionnels, malgré les améliorations récentes. Dans le même temps, les ABMs ont été sévèrement critiqués en tant que modèles *ad hoc* ou qui ne suivaient pas certaines pratiques ordinaires de la macroéconomie. Néanmoins, les problèmes soulevés par ces critiques valent aussi, en bonne part, pour les modèles standard ou

10. Ces validations techniques peuvent aussi s'appliquer aux modèles DSGE. Cela ouvre la voie à la possibilité de meilleures comparaisons entre les performances des modèles ABMs et DSGE.

– comme nous l’avons précisé plus haut – sont aujourd’hui en voie de résolution dans les publications récentes.

La macroéconomie peut donc envisager sérieusement d’avancer plus loin sur la voie de la modélisation multi-agents.

Références

- Aglietta M., 2000, *A Theory of Capitalist Regulation: The US Experience*, Editions Verso.
- Algan Y. et Ragot X., 2010, « Monetary policy with heterogeneous agents and borrowing constraints », *Review of Economic Dynamics*, 13(2) : 295-316.
- Amendola M., Gaffard, J. L. et Saraceno, F., 2004, « Wage flexibility and unemployment: the Keynesian perspective revisited », *Scottish Journal of Political Economy*, 51(5) : 654-674.
- Anderson P. W., 1972, « More is different », *Science*, 177(4047) : 393-396.
- Arifovic J., Dawid H., Deissenberg C. et Kostyshyna O., 2010, « Learning benevolent leadership in a heterogenous agents economy », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34(9) : 1768-1790.
- Ashraf Q., Gershman B. et Howitt P., 2017, « Banks, market organization, and macroeconomic performance: An agent-based computational analysis », *Journal of Economic Behavior & Organization*, 135 : 143-180.
- Assenza T., Bao T., Hommes C. et Massaro D., 2014, *Experiments on Expectations in Macroeconomics and Finance. Experiments in Macroeconomics*, Emerald Group Publishing Limited, pp. 11-70.
- Assenza T., Gatti D. D. et Grazzini, J., 2015, « Emergent dynamics of a macroeconomic agent based model with capital and credit », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 50 : 5-28.
- Balint T., Lamperti F., Mandel A., Napoletano M., Roventini A. et Sapio, A., 2017, « Complexity and the Economics of Climate Change: A Survey and a Look Forward », *Ecological Economics*, 138st(C) : 252-265.
- Baumol W. J. et Benhabib J., 1989, « Chaos: significance, mechanism, and economic applications », *The Journal of Economic Perspectives*, 3(1) : 77-105.
- Benhabib J., 1992, *Cycles and Chaos in Economic Equilibrium*, Princeton University Press.
- Boyer R., 1988, « Formalizing Growth Regimes », in G. Dosi, C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg et L. L. Soete (eds.), *Technical Change and Economic Theory*, Francis Pinter, pp. 609-629.
- Caiani A., Russo A. et Gallegati M., 2016, *Does Inequality Hamper Innovation and Growth?*, Technical report, University Library of Munich, Germany.

- Cardaci A. et Saraceno F., 2015, *Inequality, Financialisation and Economic Crises: An Agent-Based Macro Model*, Technical report, Department of Economics, Management and Quantitative Methods at Università degli Studi di Milano.
- Carlin W. et Soskice D. W., 2014, *Macroeconomics: Institutions, Instability, and the Financial System*, Oxford University Press, USA.
- Challe E. et Ragot X., 2011, « Fiscal Policy in a Tractable Liquidity-Constrained Economy », *The Economic Journal*, 121(551) : 273-317.
- Ciarli T., Lorentz A., Savona M. et Valente M., 2010, « The effect of consumption and production structure on growth and distribution. A micro to macro model », *Metroeconomica*, 61(1) : 180-218.
- Cincotti S., Raberto M. et Teglio A., 2010, « Credit Money and Macroeconomic Instability in the Agent-based Model and Simulator Eurace », *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 4.
- Comin D. et Gertler M., 2006, « Medium-term business cycles », *The American Economic Review*, 96(3) : 523-551.
- Dawid H., Harting P. et Neugart M., 2014, « Economic convergence: Policy implications from a heterogeneous agent model », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 44 : 54-80.
- Delli Gatti D., Desiderio S., Gaffeo E., Cirillo P. et Gallegati M., 2011, *Macroeconomics from the Bottom-up*, Vol. 1, Springer Science & Business Media.
- Delli Gatti D., Di Guilmi C., Gaffeo E., Giulioni G., Gallegati M. et Palestini A., 2005, « A new approach to business fluctuations: heterogeneous interacting agents, scaling laws and financial fragility », *Journal of Economic behavior & organization*, 56(4) : 489-512.
- Delli Gatti D., Gallegati M., Greenwald B., Russo A. et Stiglitz J. E., 2010, « The financial accelerator in an evolving credit network », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34(9) : 1627-1650.
- Dosi G., Fagiolo G., Napoletano M. et Roventini A., 2013, « Income distribution, credit and fiscal policies in an agent-based Keynesian model », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 37(8) : 1598-1625.
- Dosi G., Fagiolo G., Napoletano M., Roventini A. et Treibich T., 2015, « Fiscal and monetary policies in complex evolving economies », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 52 : 166-189.
- Dosi G., Fagiolo G. et Roventini A., 2010, « Schumpeter meeting Keynes: A policy-friendly model of endogenous growth and business cycles », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34(9) : 1748-1767.
- Dosi G., Napoletano M., Roventini A. et Treibich T., 2017, « Micro and macro policies in the Keynes+ Schumpeter evolutionary models », *Journal of Evolutionary Economics*, 27(1) : 63-90.
- Dosi G., Pereira M. C., Roventini A. et Virgillito M. E., 2017, « When more flexibility yields more fragility: The microfoundations of Keynesian

- aggregate unemployment », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 81 : 162-186.
- Dosi G, Napoletano M., Roventini A., Stiglitz J. E. et Treibich T., 2017, « Rational Heuristics? Expectations and Behaviors in Evolving Economies with Heterogeneous Interacting Agents », *LEM Working Paper*, 2017/31.
- Dosi G. et Virgillito M. E., 2017, « In order to stand up you must keep cycling: Change and coordination in complex evolving economies », *Structural Change and Economic Dynamics*, <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2017.06.003>.
- Dos Santos Ferreira R., 2017, « L'Hiver de notre mécontentement. La macroéconomie après la crise », *Revue de l'OFCE*, ce numéro.
- Epstein J. M., 2006, *Generative Social Science: Studies in Agent-based Computational Modeling*, Princeton University Press.
- Evans G. W. et Honkapohja S., 2012, *Learning and Expectations in Macroeconomics*, Princeton University Press.
- Fagiolo G., Guerini M., Lamperti F., Moneta A. et Roventini A., 2017, « Validation of Agent-Based Models in Economics and Finance », *LEM Working Paper*, 2017/23, Technical report.
- Fagiolo G. et Roventini A., 2017, « Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Models Redux: New Developments and Challenges Ahead », *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, 20(1).
- Farmer R. E. A. et Serletis A., 2016, « The evolution of endogenous business cycles », *Macroeconomic Dynamics*, 20(2) : 544-557.
- Gabaix X., 2016, *A Behavioral New Keynesian Model*, Technical report, National Bureau of Economic Research.
- Gaffard J. L. et Napoletano M., 2012, « Agent-Based Models and Economic Policy », *Revue de l'OFCE*, 124.
- Gaffard J.-L., 2017, « Vers une macroéconomie non walrasienne », *Revue de l'OFCE*, ce numéro.
- Gallegati M., Palestrini A. et Russo A., 2017, *Introduction to Agent-Based Economics*, Academic Press.
- Grandmont J.-M., 1985, « On endogenous competitive business cycles », *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 995-1045.
- Gualdi S., Tarzia M., Zamponi F. et Bouchaud J.-P., 2015, « Tipping points in macroeconomic agent-based models », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 50, 29-61.
- Guerini M., M. Napoletano, et A. Roventini, 2018, « No man is an Island: The impact of heterogeneity and local interactions on macroeconomic dynamics », *Economic Modelling* 68, 82 - 95.
- Guerini M. et Moneta A., 2017, « A method for agent-based models validation », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 82: 125-141.

- Haldane A., 2016, *The Dappled World*, Bank of England-GLS Shackle Biennial Memorial Lecture.
- Hicks J. R., 1979, *Causality in Economics*, Basil Blackwell, Oxford.
- Hommes C., 2013, *Behavioral Rationality and Heterogeneous Expectations in Complex Economic Systems*, Cambridge University Press.
- Howitt P., 1986, « Wage flexibility and employment », *Eastern Economic Journal*, 12(3) : 237-242.
- Howitt P., 2006, « The microfoundations of the Keynesian multiplier process », *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 1(1) : 33-44.
- Howitt P., 2012, « What have central bankers learned from modern macroeconomic theory? », *Journal of Macroeconomics*, 34(1) : 11-22.
- Howitt P. et Clower R., 2000, « The emergence of economic organization », *Journal of Economic Behavior & Organization*, 41(1) : 55-84.
- Kaplan G., Moll B. et Violante G., 2015, « The macroeconomy according to HANK », *NBER Working paper*, 21897.
- Keynes J. M., 1936, *General Theory of Employment, Interest and Money*, Atlantic Publishers & Dist.
- Kirman A. P., 1992, « Whom or what does the representative individual represent? », *The Journal of Economic Perspectives*, 6(2) : 117-136.
- Lamperti F., G. Dosi, M. Napoletano, A. Roventini et A. Sapio, 2017, « Faraway, so close: coupled climate and economic dynamics in an agent based integrated assessment model » (2017-10), *Technical report OFCE*,
- LeBaron B., 2006, « Agent-based computational finance », *Handbook of computational economics*, 2 : 1187-1233.
- Mandel A., Landini S., Gallegati M. et Gintis H., 2015, « Price dynamics, financial fragility and aggregate volatility », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 51 : 257-277.
- Napoletano M., Dosi G., Fagiolo G. et Roventini A., 2012, « Wage formation, investment behavior and growth regimes: An agent-based analysis », *Revue de l'OFCE*, supplément, 124 : 235-261.
- Neugart M., 2008, « Labor market policy evaluation with ACE », *Journal of Economic Behavior & Organization*, 67(2) : 418-430.
- Petrovic M., Ozel B., Teglio A., Raberto M. et Cincotti S., 2017, « Eurace Open: An agent-based multi-country model » *Technical report*, 2017/09, Economics Department, Universitat Jaume I, Castellón (Spain).
- Popoyan L., Napoletano M. et Roventini A., 2017, « Taming macroeconomic instability: Monetary and macro-prudential policy interactions in an agent-based model », *Journal of Economic Behavior & Organization*, 134 : 117-140.
- Russo A., Catalano M., Gaffeo E., Gallegati M. et Napoletano M., 2007, « Industrial dynamics, fiscal policy and R&D: Evidence from a compu-

- tational experiment », *Journal of Economic Behavior & Organization*, 64(3) : 426-447.
- Salle I. L., 2015, « Modelling expectations in agent-based models. An application to central bank's communication and monetary policy », *Economic Modelling*, 46 : 130-141.
- Sun J. et Tesfatsion L., 2007, « Dynamic testing of wholesale power market designs: An open-source agent-based framework », *Computational Economics*, 30(3) : 291-327.
- Tesfatsion L., 2006, « Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory », *Handbook of computational economics*, 2 : 831-880.
- Turrell A., 2016, « Agent-based models: understanding the economy from the bottom up », *Bank of England Quarterly Bulletin*, 56(4) : 173-188.
- Weidlich A. et Veit D., 2008, « A critical survey of agent-based wholesale electricity market models », *Energy Economics*, 30(4) : 1728-1759.
- Woodford M., 2013, « Macroeconomic analysis without the rational expectations hypothesis », *Annual Review of Economics*, 5(1) : 303-346.