



**HAL**  
open science

# Modèles multi-agents et stock-flux cohérents : une convergence logique et nécessaire

Pascal Sepecher

► **To cite this version:**

Pascal Sepecher. Modèles multi-agents et stock-flux cohérents : une convergence logique et nécessaire. 2016. hal-01309361

**HAL Id: hal-01309361**

**<https://hal.science/hal-01309361v1>**

Preprint submitted on 29 Apr 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modèles multi-agents et stock-flux cohérents : une convergence logique et nécessaire

Pascal Sepecher\*

29 avril 2016

## Résumé

Les modèles à base d'agents multiples sont des modèles informatiques macroscopiques peuplés d'un grand nombre de modèles individuels. Dans ces modèles, les relations entre grandeurs agrégées ne sont pas postulées : elles « émergent » du système complexe formé par les interactions des agents individuels qui les peuplent. C'est dans le champ de la macroéconomie, il y a plus de 50 ans, qu'ont été posées les bases de cette approche. Pourtant, ses méthodes restent encore un objet d'étonnement parmi les économistes, qu'ils soient orthodoxes ou non.

Cette approche connaît cependant depuis quelques années des succès croissants, surtout depuis le développement de modèles respectant la cohérence des stocks et des flux. Si le rapprochement entre une approche centrée sur les individus et une méthodologie issue d'une macroéconomie post-keynésienne volontiers organiciste peut paraître inattendu, pour nous, il répond à des nécessités logiques et scientifiques. Nous défendons l'idée selon laquelle la combinaison de la cohérence des stocks et des flux et de la multiplicité des agents est une opération essentielle au renouveau de la modélisation macroéconomique.

**Mots clés** – Modèles multi-agents, modèles stocks flux cohérents.

**Codes JEL** – B59, C63, E12.

---

\*CEPN, Université de Paris 13 et CNRS ; GREDEG, Université de Nice Sophia Antipolis et CNRS. Email : [pascal.sepecher@univ-paris13.fr](mailto:pascal.sepecher@univ-paris13.fr).

*Understanding the nature of the behavior through time of economic forces may someday become synonymous with being able to program and simulate the processes determining the behavior of these variables.*

---

Cohen (1960)

## 1 Introduction

Les modèles à base d'agents multiples (ABM, pour *agent-based models*) sont des modèles informatiques macroscopiques peuplés d'un grand nombre de modèles individuels. Dans ces modèles, les relations entre grandeurs agrégées ne sont pas postulées : elles « émergent » du système complexe formé par les interactions des agents individuels qui les peuplent. Si cette approche de la modélisation est à présent considérée comme une technique pertinente dans des disciplines aussi différentes que la géographie, la logistique ou l'immunologie (par exemple et respectivement [Brown et al. 2005](#), [Davidsson et al. 2005](#), [An 2004](#)), ses méthodes restent encore un objet d'étonnement parmi les économistes, qu'ils soient orthodoxes ou non.

C'est pourtant dans le champ de la macroéconomie, il y a plus de 50 ans, qu'ont été posées les bases de cette approche (section 2). Longtemps marginale, cette approche connaît depuis quelques années des succès croissants, surtout depuis le développement d'ABM respectant la cohérence des stocks et des flux (SFC, pour *stock-flow consistency*) (section 3). Pour inattendue qu'elle puisse paraître, cette rencontre entre une approche centrée sur les individus et une méthodologie issue d'une macroéconomie post-keynésienne volontiers organiciste répond à des nécessités logiques et scientifiques (section 4). L'acte de formalisation s'en trouve transformé en une démarche constructiviste permettant d'articuler étroitement le modèle avec le réel (section 5). En conclusion, nous défendons l'idée selon laquelle la combinaison de la cohérence des stocks et des flux et de la multiplicité des agents est une opération essentielle au renouveau de la modélisation macroéconomique (section 6).

## 2 Les origines

C'est un économètre qui a, le premier, énoncé des principes de la modélisation à base d'agents multiples et c'est à la modélisation de systèmes

économiques complets qu'il a, le premier, tenté de les appliquer (Orcutt 1957, 1960, 1962, Orcutt et al. 1961). Le point de départ d'Orcutt est la critique des modèles macroéconomiques existants à son époque, qu'il juge incapables de fournir des prédictions satisfaisantes. Il constate que ces modèles n'intègrent pas ce que l'on sait du comportement réel des agents économiques, ce qu'il explique par la difficulté de construire un comportement agrégé sur la base de comportements individuels, à moins de procéder à des simplifications radicales.

*There is an inherent difficulty, if not practical impossibility, in aggregating anything but absurdly simple relationships about elemental decision-making units into comprehensible relationships between large aggregative units such as industries, the household sector, and the government sector. (Orcutt 1957, p. 116)*

Pour Orcutt, la puissance de calcul offerte par les ordinateurs qui viennent de faire leur apparition permet de modéliser directement chacun des agents individuels composant le système cible. Selon lui, chaque agent doit être modélisé comme une sorte d'unité input-output qui interagit avec ses semblables : l'input d'une unité peut être soit l'output d'une autre unité, soit un produit de l'environnement commun. La description du modèle envisagé évoque une sorte de système d'interdépendance générale à la Leontief (1936), mais infiniment plus complexe, non seulement par le nombre de ses composants mais aussi parce que chaque composant est conçu comme un agent autonome (« *small decision-making unit* »). Surtout, Orcutt explique comment les modèles multi-agents solutionnent le problème de l'agrégation :

*Predictions about aggregates will still be needed but will be obtained by aggregating behavior of elemental units rather than by attempting to aggregate behavioral relationships of these elemental units. That is, aggregates will be obtained from the simulated models in a fashion analogous to the way a census or survey obtains aggregates relating to real socioeconomic systems. (Orcutt 1957, p. 117)*

Parallèlement, les chercheurs du *Carnegie Institute of Technology* sont engagés dans un programme de travail très proche. Pour Cohen & Cyert (1961, p. 127), l'outil informatique permet la construction de modèles dynamiques et complexes. Pour Cyert & March (1963, p. 125), les langages de programmation informatiques, par nature séquentiels, constituent le « langage théorique naturel » pour la description des processus microéconomiques. Avec Simon (1955, 1959, 1962), ces chercheurs élaborent une théorie comportementale de la rationalité limitée et procédurale, inspirée à la fois par

la psychologie et la cybernétique, à laquelle se référeront toutes les critiques subséquentes de l'*homo economicus* néoclassique. Pourtant, au sein de ce groupe, seul [Cohen \(1960\)](#) semble avoir saisi que la théorie comportementale de la firme constitue le point d'appui sur lequel il est possible de construire des modèles macroéconomiques dont la dynamique agrégée résulte des interactions d'un grand nombre de modèles microéconomiques.

Malgré leur caractère visionnaire, il faudra attendre de nombreuses années avant que les intuitions d'Orcutt et Cohen ne se traduisent par l'émergence des ACE (*Agent-based Computational Economics*) et autres ABM : les ordinateurs de l'époque étaient trop peu puissants, leur accès difficile, les langages de programmation trop rudimentaires pour que les modèles très complexes imaginés par Orcutt et Cohen puissent être réalisés avec succès. Ce n'est qu'avec la révolution des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans les années 90 que seront réalisées les bases matérielles du développement des modèles multi-agents.

En attendant, de nombreuses avancées viennent préparer le terrain d'un point de vue théorique. Parmi les plus notables, citons le modèle de ségrégation spatiale de [Schelling \(1969, 1971\)](#) ; les algorithmes génétiques développés par [Holland \(1975\)](#) et utilisés pour modéliser les processus d'apprentissage ([Arifovic 1994](#)) ; le marché financier artificiel de [Arthur et al. \(1996\)](#). Parallèlement, le développement des systèmes multi-agents (paradigme informatique issu de l'intelligence artificielle distribuée dont les applications sont très diverses) conforte le courant naissant des ABM en le plaçant au sein d'un mouvement technique et scientifique plus large et plus puissant.

### 3 La crise et les premiers modèles AB-SFC

La place manque pour rendre compte de chacun des nouveaux ABM qui apparaissent au cours de la décennie suivante. Cependant, ce tout jeune courant peine à trouver sa place entre un *mainstream* suffisant et une hétérodoxie pour qui toute tentative de construire un modèle macroéconomique sur des bases micro doit être considérée comme une « variante de l'approche marginaliste traditionnelle » ([Graziani 2003a](#), p. 122). Comme le souligne [Kuhn \(1992](#), p. 113), « il en est des sciences comme de l'industrie — le renouvellement des outils est un luxe qui doit être réservé aux circonstances qui l'exigent ».

Si, au début des années 2000, les tenants d'une macroéconomie dont les fondements microéconomiques sont constituées par un agent représentatif avec anticipations rationnelles peuvent encore affirmer que « l'état de la ma-

cro est bon » (Blanchard 2008), l'éclatement de la crise économique et financière vient brutalement balayer cette certitude (Trichet 2010, Borio 2014, Ellis 2014). Pour Blanchard (2014, p. 31), la construction de modèles capables de rendre compte des dynamiques économiques dans leur complexité s'avère hors de portée :

*Trying to create a model that integrates normal times and systemic risks may be beyond the profession's conceptual and technical reach at this stage.*

Pour les partisans de l'approche multi-agents, cette faillite du *mainstream* doit conduire à un renouveau théorique (Farmer & Foley 2009, Colander et al. 2011, Stiglitz & Gallegati 2011) dont la macroéconomie à base d'agents multiples constituera le « nouveau paradigme » (Delli Gatti et al. 2010).

Au même moment apparaît un nouveau type de modèle qui combine cohérence des stocks et des flux et multiplicité des agents (modèles AB-SFC). Selon Caverzasi & Godin (2015), les modèles présentés par Cincotti et al. (2010), Kinsella et al. (2011), Seppecher (2012) constituent les premiers exemples connus de modèles macroéconomiques combinant explicitement ces deux principes. Cependant, selon Ballot et al. (2015), on trouve déjà chez Bergmann (1974) les bases de cette approche. Dans ce modèle (peuplé avec 1000 travailleurs, mais seulement six entreprises représentant chacune un secteur industriel), des contraintes réelles et monétaires strictes s'imposent aux agents (Bergmann 1974, p. 476). Selon la description de Bennet & Bergmann (1986, p. 23), la cohérence des stocks et des flux est assurée :

*[The transaction routine] is used whenever money changes hands...  
[This routine] also insures that all stocks (money, financial claims, and goods) are built up or drawn down in accordance with the flows that the microunits decide shall occur.*

Bruun (1999, p. 9) manifeste la même exigence de cohérence lorsqu'elle présente la première tentative de construire un modèle multi-agents d'une économie monétaire de production. Selon l'auteure, cette cohérence est la condition indispensable d'un processus d'agrégation rigoureux (« ... to avoid possible fallacies of composition »). Cette intuition ne trouvera cependant guère d'échos, en l'absence d'une méthodologie adéquate. Ce n'est qu'après que Lavoie & Godley (2001), Godley & Lavoie (2006, 2007) ont élaboré leur méthodologie appuyée sur la comptabilité en partie quadruple que l'application de ce principe aux modèles multi-agents va pouvoir se développer.

Dans le modèle *Eurace* (Cincotti et al. 2010), la monnaie est endogène (avec une référence à Graziani 2003b) et la règle de la cohérence des stocks et des flux est affirmée comme le moyen de valider le modèle au niveau

agrégé, sans toutefois que les matrices correspondantes ne soient fournies. [Kinsella et al. \(2011\)](#), en revanche, exposent la structure de leur modèle au moyen d'une matrice de comptabilité sociale dont la somme de chaque ligne et de chaque colonne est nulle, se plaçant explicitement dans le cadre méthodologique défini par [Godley & Lavoie \(2007\)](#).

Le modèle *Jamel* ([Seppecher 2011](#)), ouvertement post-keynésien, est celui d'une économie monétaire dans laquelle la production prend réellement du temps (plusieurs périodes). La cohérence du modèle est vérifiée à chaque période au moyen de matrices de comptabilité sociale dans lesquelles la valeur des stocks des entreprises est égale à la richesse nette des ménages. Ce modèle est utilisé pour montrer comment une flexibilité accrue des salaires entraîne l'économie simulée dans une spirale déflationniste ([Seppecher 2012](#)) et pour étudier le rôle déterminant de la durée de rotation du capital circulant dans le rapport salaires/profits ([Seppecher 2014](#)).

Sans surprise, l'hypothèse d'instabilité financière de Minsky constitue une source d'inspiration essentielle pour les auteurs de modèles AB-SFC. En effet, pour [Minsky \(1993, 1996\)](#), la structure d'une économie monétaire est constituée d'une multiplicité de bilans comptables interdépendants. Face à la difficulté de reproduire cette structure et ses conséquences dynamiques à l'aide des outils de modélisation classiques, la modélisation AB-SFC constitue une alternative prometteuse ([Bezemer 2012](#), [Bucciarelli & Silvestri 2013](#)). Ainsi, [Raberto et al. \(2012\)](#), [Riccetti et al. \(2015\)](#), [Seppecher & Salle \(2015\)](#), [Di Guilmi & Carvalho \(2015\)](#), [Van der Hoog & Dawid \(2015\)](#) présentent différents modèles centrés sur l'étude des dynamiques d'endettement et de désendettement, leurs interactions avec le cycle des affaires et l'émergence de crises endogènes.

Dans le modèle d'[Assenza et al. \(2015\)](#) — un modèle qui comporte deux secteurs industriels, l'un produisant des biens de consommation, l'autre des biens capitaux — l'irruption de crises endogènes s'explique par les effets croisés des interdépendances industrielles et du comportement adaptatif des entreprises. Interdépendances industrielles, comportements d'ajustement et stricte cohérence des stocks et des flux caractérisent aussi le modèle de [Hagedorn \(2014\)](#) dont l'inspiration principalement autrichienne est complétée par des emprunts assumés à la pensée post-keynésienne.

Pour [Caiani et al. \(2015\)](#), la fusion des approches ABM et SFC pourrait constituer un « paradigme alternatif » pour la modélisation macroéconomique. Le modèle développé se démarque par l'attention portée à la calibration selon une procédure complexe visant à produire des situations initiales cohérentes.

Mentionnons enfin les modèles multi-agents de [Dosi et al. \(2010, 2013\)](#),

2015) qui, bien qu'ils ne s'inscrivent pas dans un cadre SFC, sont développés dans un esprit très proche, avec un intérêt particulier pour les problématiques industrielles et évolutionnistes.

## 4 Une rencontre inattendue

Cette convergence entre l'approche ABM, souvent perçue comme atomiste, et l'approche SFC d'inspiration post-keynésienne, plutôt perçue comme holiste, peut surprendre. Pourtant, la description que [Robinson \(1962\)](#) donne du modèle causal d'une économie capitaliste pourrait être celle d'un ABM :

*To build up a causal model, we must start not from equilibrium relations but from the rules and motives governing human behavior. We therefore have to specify to what kind of economy the model applies, for various kinds of economies have different rules (...) Our present purpose is to find the simplest kind of model that will reflect conditions in the modern capitalist world (...) Our model, therefore, depicts a system in which production is organized by individual firms and consumption by individual households, interacting with each other without any overriding control.*

Comme le souligne [Lavoie \(2014, p. 17\)](#), dans un ABM, les règles d'interaction forment une structure qui s'impose aux agents, quelle que soit l'autonomie qui leur est accordée. Si les partisans de l'approche multi-agents tendent à adopter le cadre SFC pour leurs modèles macroéconomiques, c'est parce qu'ils ont conscience de l'importance d'une structure réaliste pour les interactions monétaires : l'individu n'est donc pas tout.

Pour autant, le nombre d'agents n'est pas la seule différence entre un modèle SFC classique et un modèle AB-SFC : tandis qu'un modèle SFC standard prend la forme d'un système d'équations simultanées ([Reyes & Mazier 2014](#)), le fonctionnement d'un ABM (même SFC) est strictement séquentiel ([Orcutt 1957, p. 119](#)). Que recouvre cette différence ? A notre avis, cette résolution d'équations qui vient à chaque période assurer le bouclage des modèles SFC classiques correspond à la nécessité de concilier, d'une façon ou d'une autre, les décisions pas nécessairement cohérentes des différents groupes d'agents, par exemple des acheteurs et des vendeurs sur le marché des biens. En effet, il faut bien que les achats soient égaux aux ventes pour que le modèle soit cohérent ; la résolution d'équation vient assurer cette cohérence, quel que soit le type d'ajustement choisi (par les prix, par la production ou par les stocks, voir [Godley & Lavoie 2007, p. 63–65](#)). Autrement dit, la résolution d'équations dans les modèles SFC classiques tient lieu des mécanismes



de marché.

En revanche, dans les ABM (SFC ou non), les marchés peuvent être modélisés explicitement, comme l'ensemble des mécanismes permettant à des agents individuels d'entrer en interaction pour nouer des relations commerciales directes. Que ces mécanismes soient stylisés ou hyper détaillés (par exemple les modèles de marchés financiers à carnets d'ordre de [Mathieu & Brandouy 2010](#)), ils permettent d'intégrer les phénomènes de concurrence de façon beaucoup plus fine et réaliste que ne peuvent le faire les modèles SFC classiques, dans lesquels chaque secteur est représenté par un agent unique.

Pour [Duménil & Lévy \(1995, p. 369\)](#), « deux grands défis sont posés à la micro-économie » :

1. Comment décrire les comportements d'agents *décentralisés*, en *déséquilibre*, possédant une *information limitée*, ne connaissant ni le vrai modèle de l'économie, ni les lois de distribution des variables aléatoires, ni les caractéristiques des autres agents, dans un environnement en perpétuelle mutation et largement imprévisible, c'est-à-dire placés dans une situation d'« incertitude radicale » ?

2. Comment comprendre les mécanismes qui assurent (assez bien, d'ailleurs) la *coordination* des actions de ces agents, *en dépit* ou, peut-être même, *grâce* à ces limitations, mais, en tous cas, compte tenu de ces limitations ?

L'approche multi-agents entend relever ces défis en rejetant l'abstraction de l'agent représentatif partout où c'est nécessaire, c'est-à-dire partout où l'on est en droit de supposer que l'usage d'un agent représentatif « s'oppose à la perception des dysfonctionnements économiques » ([Malinvaud 1995, p. 535](#)) et en particulier partout où les agents sont en concurrence les uns avec les autres. Ainsi, la combinaison du principe de cohérence des stocks et des flux et du principe de multiplicité des agents permet d'intégrer dans un même modèle les caractéristiques essentielles des économies de marché, qui sont à la fois monétaires et décentralisées.

[Caiani et al. \(2014, p. 444–445\)](#) soulignent que les techniques de modélisation multi-agents, en donnant aux modèles SFC de véritables fondements microéconomiques, leur permettent de rendre compte de l'hétérogénéité des agents au sein même des secteurs. Cette hétérogénéité est :

- multi-dimensionnelle : réelle et monétaire (structure des bilans), cognitive (informations, mémoire, représentations et croyances) et sociale (place dans le réseau d'interactions) ;
- endogène : elle découle du caractère direct et décentralisé des inter-

actions entre les agents ;

- dynamique et complexe : elle évolue sous l’effet des changements macroéconomiques qu’elle a elle-même générés.

Par là, les modèles AB-SFC sont susceptibles de générer des dynamiques beaucoup plus riches et réalistes que les modèles SFC classiques dans lesquels l’affectation de fonctions de comportement à des agrégats sectoriels revient à supposer que tous les agents représentés sont identiques et marchent d’un même pas.

## 5 Une approche constructiviste

Les modèles à base d’agents multiples se situent généralement à un niveau d’abstraction bien moins élevé que celui des modèles analytiques : ils sont plus complexes, ils peuvent aussi avoir un plus grand nombre de paramètres, en particulier pour définir le comportement d’agents dont la rationalité est limitée. De là, on a cru pouvoir déceler des difficultés méthodologiques susceptibles d’affaiblir l’approche multi-agents et d’entraver son accession au statut envié de modèles d’aide à la prévision et à la décision (Windrum et al. 2007, Fagiolo et al. 2007, Sornette 2014). Résumons en quelques mots ces inquiétudes :

- Si, en changeant la calibration, n’importe quel résultat peut être obtenu, quel est le pouvoir explicatif du modèle ? Dans ce cas, la réplique n’implique pas nécessairement l’explication.
- Inversement, si différents modèles peuvent être cohérents avec les données utilisées pour la validation empirique, comment distinguer le « bon modèle » parmi eux ?

Remarquons tout d’abord que l’approche multi-agents s’oppose à l’utilitarisme qui caractérise les modèles d’équilibre général utilisés par les institutions monétaires et financières (modèles DSGE). Les modélisateurs multi-agents se fixent généralement un objectif plus ambitieux que de reproduire plus ou moins fidèlement certains faits stylisés observables au niveau agrégé. L’objectif premier de la modélisation multi-agents est la compréhension des enchaînements causaux non triviaux qui relient les comportements individuels au comportement macroéconomique agrégé et cette compréhension passe par la reconstruction progressive et méthodique de ces enchaînements (Tefatsion 2003, p. 2).

Ainsi, lors des premières étapes du développement du modèle, on définit les comportements individuels le plus simplement possible, puis on accroit progressivement le réalisme du modèle (Phan 2006, p. 233). Face à l’incer-

titude, les agents du monde réel ont élaboré des règles de comportement et des conventions, telles que les règles comptables (Hagedorn 2014, p. 87) : intégrer ces règles et ces conventions au niveau des agents individuels réduit drastiquement les degrés de liberté du modèle. De plus, on peut extraire d'une simulation les traces laissées par chaque agent, en particulier son historique comptable ; l'étude de ces traces permet d'évaluer la crédibilité du comportement de l'agent au regard de ses motivations, de son état individuel et de son environnement immédiat (Darty et al. 2014, p. 4). Chaque invraisemblance conduit à retravailler le modèle jusqu'à ce qu'il donne des résultats suffisamment réalistes au regard des objectifs que l'on s'est fixés (Cohen 1960, p. 3).

Cependant, de même que « la validité au niveau macroscopique ne garantit en rien la validité au niveau microscopique [...] le fait que les comportements locaux soient valides ne garantit pas un comportement global cohérent » (Darty et al. 2014, p. 1). C'est ici qu'intervient à nouveau le principe de cohérence des stocks et des flux (Berg et al. 2015, p. 5) : l'interdépendance des bilans comptables qui caractérise toute économie monétaire au niveau microéconomique conduit, au niveau macroéconomique, à de fortes contraintes sur les stocks et les flux (Lavoie & Godley 2001, p. 307 ; Lavoie 2014, p. 273) et l'expérience montre qu'il est extrêmement difficile d'atteindre des niveaux réalistes pour tous les stocks et les flux simultanément. Cette difficulté, quand elle conduit à un écart persistant entre données simulées et données réelles, est la claire indication de l'absence, dans le modèle, de certains éléments de complexité qui jouent un rôle important dans le monde réel (que ce soit au niveau des comportements individuels ou au niveau de la structure).

Ainsi, tant au niveau macroéconomique qu'au niveau microéconomique, la confrontation des résultats du modèle avec les données du monde réel prend place à toutes les étapes du développement du modèle, selon une démarche constructiviste (Tsfatsion 2006). Cette approche constitue un guide pour le modélisateur, lui permettant de découvrir sans cesse de nouvelles lignes de recherche et d'enrichir constamment son modèle pour en renforcer le réalisme (Orcutt 1957, p. 122 ; Cohen & Cyert 1961, p. 127 ; Eliasson et al. 1976, p. 30).

## 6 Conclusion

Le développement de l'approche SFC répond à la nécessité de donner un cadre formel à la macroéconomie post-keynésienne, jusque là trop souvent

narrative (Godley 1996, p. 3). Cette approche permet de construire des modèles dont les fondements sont plus solides que ceux du *mainstream* (Lavoie & Godley 2001, p. 307) et, ainsi, de contester aux économistes néoclassiques le monopole de la formalisation macroéconomique (Godley & Lavoie 2007, p. 3).

Pareillement, il n’y a pas de raison d’abandonner à l’orthodoxie le champ de la microéconomie (Duménil & Lévy 1995, p. 363). L’approche multi-agents donne aux modèles SFC de véritables fondements microéconomiques, basés sur les principes d’incertitude radicale et de rationalité procédurale à la Simon. Réciproquement, l’approche SFC donne aux ABM une structure d’interaction rigoureuse et réaliste, basée sur le principe de comptabilité en partie quadruple.

Cette synthèse se traduit par le développement des modèles AB-SFC dont la structure rend compte fidèlement de l’interdépendance générale des bilans individuels, caractéristique essentielle des économies monétaires décentralisées. Les perspectives ouvertes par cette synthèse sont tellement prometteuses que la convergence des deux approches, bien qu’entamée depuis peu, apparaît non seulement logique mais aussi nécessaire au renouvellement de la modélisation macroéconomique.

## Références

- An, G. (2004), ‘In silico experiments of existing and hypothetical cytokine-directed clinical trials using agent-based modeling’, *Critical care medicine* **32**(10), 2050–2060.
- Arifovic, J. (1994), ‘Genetic algorithm learning and the cobweb model’, *Journal of Economic dynamics and Control* **18**(1), 3–28.
- Arthur, W. B., Holland, J. H., LeBaron, B., Palmer, R. G. & Tayler, P. (1996), Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market.
- Assenza, T., Delli Gatti, D. & Grazzini, J. (2015), ‘Emergent dynamics of a macroeconomic agent based model with capital and credit’, *Journal of Economic Dynamics and Control* **50**, 5–28.
- Ballot, G., Mandel, A. & Vignes, A. (2015), ‘Agent-based modeling and economic theory : where do we stand?’, *Journal of Economic Interaction and Coordination* **10**(2), 200–220.

- Bennet, R. L. & Bergmann, B. R. (1986), *A microsimulated transactions model of the United States economy*, Johns Hopkins University Press.
- Berg, M., Hartley, B. & Richters, O. (2015), ‘A stock-flow consistent input–output model with applications to energy price shocks, interest rates, and heat emissions’, *New Journal of Physics* **17**(1), 015011.
- Bergmann, B. R. (1974), A microsimulation of the macroeconomy with explicitly represented money flows, *in* ‘Annals of Economic and Social Measurement, Volume 3, number 3’, NBER, pp. 475–489.
- Bezemer, D. J. (2012), ‘The economy as a complex system : the balance sheet dimension’, *Advances in Complex Systems* **15**(supp02), 1250047.
- Blanchard, O. (2008), The state of macro. NBER Working Paper (14259).
- Blanchard, O. (2014), ‘Where danger lurks’, *Finance & Development* **51**(3), 28–31.
- Borio, C. (2014), ‘The financial cycle and macroeconomics : What have we learnt?’, *Journal of Banking & Finance* **45**, 182–198.
- Brown, D. G., Riolo, R., Robinson, D. T., North, M. & Rand, W. (2005), ‘Spatial process and data models : Toward integration of agent-based models and GIS’, *Journal of Geographical Systems* **7**(1), 25–47.
- Bruun, C. (1999), Agent-based keynesian economics : Simulating a monetary production system bottom-up. Aalborg University.
- Bucciarelli, E. & Silvestri, M. (2013), ‘Hyman P. Minsky’s unorthodox approach : recent advances in simulation techniques to develop his theoretical assumptions’, *Journal of Post Keynesian Economics* **36**(2), 299–324.
- Caiani, A., Godin, A., Caverzasi, E., Gallegati, M., Kinsella, S. & Stiglitz, J. E. (2015), ‘Agent based-stock flow consistent macroeconomics : Towards a benchmark model’, *Available at SSRN* .
- Caiani, A., Godin, A., Caverzasi, E., Riccetti, L., Russo, A., Gallegati, M., Kinsella, S. & Stiglitz, J. (2014), Innovation, demand, and finance in an agent based-stock flow consistent model, WP, Conference Agent-Based modeling and Stock-Flow Consistent Macroeconomics Program, Monte Conero (Ancona).
- Caverzasi, E. & Godin, A. (2015), ‘Post-keynesian stock-flow-consistent modelling : a survey’, *Cambridge Journal of Economics* **39**(01), 157–187.

- Cincotti, S., Raberto, M. & 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**(26).
- Cohen, K. J. (1960), ‘Simulation of the firm’, *The American Economic Review* **50**(2), 534–540.
- Cohen, K. J. & Cyert, R. M. (1961), ‘Computer models in dynamic economics’, *The Quarterly Journal of Economics* **75**(1), 112–127.
- Colander, D., Goldberg, M., Haas, A., Juselius, K., Kirman, A., Lux, T. & Sloth, B. (2011), The financial crisis and the systemic failure of the economics profession, in J. Friedman, ed., ‘What Caused the Financial Crisis’, University of Pennsylvania Press.
- Cyert, R. M. & March, J. G. (1963), *A Behavioral Theory of The Firm*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Darty, K., Saunier, J. & Sabouret, N. (2014), Analyse des comportements agents par agrégation aux comportements humains, in ‘22èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2014)’, Vol. 1.
- Davidsson, P., Henesey, L., Ramstedt, L., Törnquist, J. & Wernstedt, F. (2005), ‘An analysis of agent-based approaches to transport logistics’, *Transportation Research part C : emerging technologies* **13**(4), 255–271.
- Delli Gatti, D., Gaffeo, E. & Gallegati, M. (2010), ‘Complex agent-based macroeconomics : a manifesto for a new paradigm’, *Journal of Economic Interaction and Coordination* **5**(1), 5.
- Di Guilmi, C. & Carvalho, L. (2015), The dynamics of leverage in a Minskyan model with heterogeneous firms. University of São Paulo (FEA-USP).
- Dosi, G., Fagiolo, G., Napoletano, M. & 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. & Treibich, T. (2015), ‘Fiscal and monetary policies in complex evolving economies’, *Journal of Economic Dynamics and Control* **52**, 166–189.
- Dosi, G., Fagiolo, G. & Roventini, A. (2010), ‘Schumpeter meeting keynes : A policy-friendly model of endogenous growth and business cycles’, *Journal of Economic Dynamics and Control* **34**, 1748–1767.

- Duménil, G. & Lévy, D. (1995), ‘Vrais et faux dilemmes’, *Recherches Économiques de Louvain/Louvain Economic Review* pp. 359–394.
- Eliasson, G., Olavi, G. & Heiman, M. (1976), A micro-to-macro model of the Swedish economy. IUI Working Paper (7).
- Ellis, L. (2014), ‘Future directions in financial stability analysis : Learning from others, learning from the past’, Paul Woolley Centre for the Study of Capital Market Dysfunctionality Conference.
- Fagiolo, G., Moneta, A. & Windrum, P. (2007), ‘A critical guide to empirical validation of agent-based models in economics : methodologies, procedures, and open problems’, *Computational Economics* **30**(3), 195–226.
- Farmer, J. D. & Foley, D. (2009), ‘The economy needs agent-based modeling’, *Nature* **460**(August 6), 685–686.
- Godley, W. (1996), Money, finance and national income determination : An integrated approach, Technical Report 167, Jerome Levy Economics Institute of Bard College.
- Godley, W. & Lavoie, M. (2006), Prolegomena to realistic monetary macroeconomics : A theory of intelligible sequences. The Levy Economics Institute of Bard College Working Paper (441).
- Godley, W. & Lavoie, M. (2007), *Monetary Economics, An Integrated Approach to Credit, Money, Income, Production and Wealth*, Palgrave Macmillan, Basingstoke.
- Graziani, A. (2003a), Microéconomie et macroéconomie : à qui la priorité ?, in P. Piégay & L.-P. Rochon, eds, ‘Théories monétaires Post Keynésiennes’, *Economica*, Paris, pp. 121–128.
- Graziani, A. (2003b), *The Monetary Theory of Production*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hagedorn, H. (2014), *A model of Austrian economics*, Springer.
- Holland, J. H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Kinsella, S., Greiff, M. & Nell, E. J. (2011), ‘Income distribution in a stock-flow consistent model with education and technological change’, *Eastern Economic Journal* **37**(1), 134–149.

- Kuhn, T. S. (1992), *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris.
- Lavoie, M. (2014), *Post-Keynesian Economics : New Foundations*, Edward Elgar Publishing.
- Lavoie, M. & Godley, W. (2001), ‘Kaleckian models of growth in a coherent stock-flow monetary framework : a Kaldorian view’, *Journal of Post Keynesian Economics* pp. 277–311.
- Leontief, W. W. (1936), ‘Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States’, *The review of economic statistics* pp. 105–125.
- Malinvaud, E. (1995), ‘Sur l’hypothèse de rationalité en théorie macro-économique.’, *Revue économique* **46**(3), 523–536.
- Mathieu, P. & Brandouy, O. (2010), A generic architecture for realistic simulations of complex financial dynamics, *in* ‘Advances in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems’, Springer, pp. 185–197.
- Minsky, H. P. (1993), ‘Comment on Ben Bernanke, ‘Credit in the Macroeconomy’’, Hyman P. Minsky Archive, Paper 361.
- Minsky, H. P. (1996), The essential characteristics of Post Keynesian economics, *in* G. Deleplace, ed., ‘Money in Motion : The Post Keynesian and Circulation Approaches’, Macmillan, London, pp. 70–88.
- Orcutt, G. H. (1957), ‘A new type of socio-economic system’, *The review of economics and statistics* pp. 116–123.
- Orcutt, G. H. (1960), ‘Simulation of economic systems’, *The American Economic Review* pp. 894–907.
- Orcutt, G. H. (1962), ‘Microanalytic models of the united states economy : need and development’, *The American Economic Review* pp. 229–240.
- Orcutt, G. H., Greenberger, M., Korbel, J. & Rivlin, A. (1961), *Microanalysis of socioeconomic systems : a simulation study*, Harper, New York.
- Phan, D. (2006), Modélisation et simulation multi-agents en économie et sciences sociales comme *compléments* des formalismes classiques, *in* F. Amblard & D. Phan, eds, ‘Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société’, Hermes-Sciences Lavoisier, Paris, pp. 231–236.



- Raberto, M., Teglio, A. & Cincotti, S. (2012), ‘Debt, deleveraging and business cycles : An agent-based perspective’, *Economics : The Open-Access, Open-Assessment E-Journal* **6**.
- Reyes, L. & Mazier, J. (2014), ‘Financialized growth regime : lessons from stock flow consistent models’, *Revue de la Régulation [En ligne]* **16**(2eme semestre / Autumn).
- Riccetti, L., Russo, A. & Gallegati, M. (2015), ‘An agent based decentralized matching macroeconomic model’, *Journal of Economic Interaction and Coordination* **10**(2), 305–332.
- Robinson, J. (1962), *Essays in the Theory of Economic Growth*, Macmillan, London.
- Schelling, T. C. (1969), ‘Models of segregation’, *The American Economic Review* pp. 488–493.
- Schelling, T. C. (1971), ‘Dynamic models of segregation’, *The Journal of Mathematical Sociology* **1**(2), 143–186.
- Sepecher, P. (2011), Modélisation multi-agents d’une économie monétaire de production. Un système dynamique et complexe d’interactions réelles et monétaires entre des agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents, PhD thesis, CEMAFI, Université de Nice Sophia Antipolis.
- Sepecher, P. (2012), ‘Flexibility of wages and macroeconomic instability in an agent-based computational model with endogenous money’, *Macroeconomic Dynamics* **16**(s2), 284–297.
- Sepecher, P. (2014), ‘Pour une macroéconomie monétaire dynamique et complexe’, *Revue de la Régulation* **16**(2eme semestre/Autumn).
- Sepecher, P. & Salle, I. (2015), ‘Deleveraging crises and deep recessions : a behavioural approach’, *Applied Economics* **47**(34-35), 3771–3790.
- Simon, H. A. (1955), ‘A behavioral model of rational choice’, *The Quarterly Journal of Economics* **69**(1), 99–118.
- Simon, H. A. (1959), ‘Theories of decisions-making in economics’, *The American Economic review* **49**(3), 253–283.
- Simon, H. A. (1962), ‘The architecture of complexity’, *Proceedings of the american philosophical society* **106**(6).

- Sornette, D. (2014), ‘Physics and financial economics (1776–2014) : puzzles, ising and agent-based models’, *Reports on Progress in Physics* **77**(6), 062001.
- Stiglitz, J. & Gallegati, M. (2011), ‘Heterogeneous interacting agent models for understanding monetary economies’, *Eastern Economic Journal* **37**(1), 6–12.
- Tesfatsion, L. (2003), Agent-based computational economics, Technical report, Department of Economics, Iowa State University, Ames, Iowa. ISU Economics Working Paper No. 1.
- Tesfatsion, L. (2006), Agent-based computational economics : A constructive approach to economic theory, *in* L. Tesfatsion & K. L. Judd, eds, ‘Handbook of Computational Economics’, Vol. 2, Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- Trichet, J.-C. (2010), Approches de la politique monétaire revisitée : leçons tirées de la crise. Discours prononcé à la Banque Centrale Européenne, Francfort, le 18 novembre 2010.
- Van der Hoog, S. & Dawid, H. (2015), ‘Bubbles, crashes and the financial cycle : Insights from a stock-flow consistent agent-based macroeconomic model’.
- Windrum, P., Fagiolo, G. & Moneta, A. (2007), ‘Empirical validation of agent-based models : Alternatives and prospects’, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **10**(2), 8.