

THÉORIE DE LA CROISSANCE ÉVOLUTIVE¹

Giovanni Dosi

Istituto di Economia e l'EMbeDS, Scuola Superiore Sant'Anna (Italie)

Andrea Roventini

Istituto di Economia e l'EMbeDS, Scuola Superiore Sant'Anna (Italie) ; OFCE, Sciences Po

Cet article présente la théorie de la croissance évolutive, qui étudie les moteurs et les modèles de changement technologique et de production ainsi que les mécanismes (imparfaits) de coordination entre une multitude d'entreprises. Cela nécessite d'étudier les économies comme des systèmes évolutifs complexes, c'est-à-dire comme des écologies peuplées d'agents hétérogènes dont les interactions de marché locales hors d'équilibre conduisent à l'émergence d'un certain ordre collectif à un niveau d'agrégation plus élevé, tandis que le système évolue continuellement. En conséquence, un modèle multi-pays multi-industries basé sur des agents est introduit, dans lequel la concurrence effrénée des entreprises sur les marchés internationaux conduit à l'émergence d'une croissance et d'une divergence persistantes des revenus entre les pays. En outre, chaque économie connaît une transformation structurelle de sa structure productive au cours du processus de développement. Cette dynamique résulte de cycles vertueux (ou vicieux) au niveau des entreprises entre l'accumulation de connaissances, les performances commerciales et la dynamique de croissance. Le modèle rend également compte d'un riche ensemble de régularités empiriques aux niveaux d'agrégation macro, méso et micro. Enfin, le modèle est utilisé pour évaluer les différentes stratégies que les pays en retard peuvent adopter pour rattraper les leaders. Les résultats montrent qu'en l'absence d'interventions gouvernementales, les pays retardataires continueront à prendre du retard. Au contraire, les politiques industrielles peuvent conduire à une convergence internationale entre les pays.

Mots clés : croissance endogène, changement structurel, écarts technologiques, politiques industrielles, économie évolutionnaire, modèles basés sur des agents.

1. Ce texte est la version française d'un chapitre rédigé pour la prochaine édition d'*Alternative Theories of Economic Growth* (2^e édition), édité par Mark Setterfield. Merci à Alessandro Caiani, Emanuele Russo et Mark Setterfield. Naturellement, tous les avertissements habituels s'appliquent.

Depuis la publication de *La richesse des nations* (Smith, 1776), la science économique a étudié les causes de la croissance et les disparités émergentes entre les pays. Les économistes et les historiens (voir Landes, 1969 ; Cipolla, 1994 ; Allen, 2001, parmi de nombreuses contributions) sont parvenus à la conclusion que le changement technologique est le principal moteur de ces deux phénomènes. Toutefois, si la théorie économique néoclassique a reconnu l'importance de la technologie, les progrès réalisés pour expliquer son évolution et la manière dont elle affecte la croissance économique ont été lents et insuffisants. D'une part, dans Solow (1956) et les contributions ultérieures, la croissance économique découle d'un progrès technologique exogène. D'autre part, les nouvelles théories de la croissance (voir par exemple Romer, 1990 ; Aghion et Howitt, 1992) ont réussi à endogénéiser l'innovation dans la dynamique économique, mais cela a été fait soit comme une externalité d'apprentissage, soit comme le résultat d'efforts coûteux et délibérés de la part d'un agent représentatif cherchant à maximiser son profit. Dans ce dernier cas, l'endogénéisation du changement technique a pour principal inconvénient de réduire les activités d'innovation au résultat d'équilibre d'une allocation intertemporelle optimale des ressources, avec ou sans incertitude (probabiliste).

À l'opposé, l'économie évolutionniste (Nelson et Winter, 1982 ; Dosi *et al.*, 1988 ; Metcalfe et Foster, 2010) part des processus de déséquilibre schumpétériens de génération et de diffusion de l'innovation et de la concurrence sur le marché pour expliquer les différents modèles de croissance macroéconomique et les causes ultimes de la prospérité ou de la misère des pays. La dynamique de déséquilibre est en effet considérée comme une caractéristique générale du « capitalisme effréné » (Metcalfe, 1998 ; Metcalfe et Ramlogan, 2006) observée aux niveaux d'agrégation de l'entreprise, de l'industrie et du pays. La théorie de l'évolution ne se contente pas d'analyser les moteurs et les modèles de changement du moteur capitaliste de l'innovation et de la production, mais elle étudie également les mécanismes (imparfaits) de coordination entre une multitude d'agents à la recherche de leur propre intérêt, souvent caractérisés par des intérêts contradictoires (Dosi, 2023). À cet égard, la théorie évolutionniste étudie les économies comme des systèmes évolutifs complexes (Kirman, 2010, 2016 ; Rosser, 2011 ; Dosi et Roventini, 2019), c'est-à-dire comme des

écologies peuplées d'agents hétérogènes dont les interactions de marché locales hors d'équilibre conduisent à l'émergence d'un certain ordre collectif à un niveau d'agrégation supérieur, tandis que le système change continuellement. Dans un tel cadre, *plus, c'est différent* (Anderson, 1972) : il n'y a pas d'isomorphisme² entre les niveaux micro, méso et macro, et l'agrégation peut conduire à l'émergence de nouveaux phénomènes (par exemple, le changement structurel et la croissance auto-entretenu), de nouvelles régularités statistiques (par exemple, la distribution des taux de croissance à deux pics entre pays) et de structures totalement nouvelles (par exemple, les marchés, les industries, les institutions). Dans un monde complexe, l'incertitude profonde (Knight, 1921 ; Keynes, 1936) est si omniprésente que les agents ne peuvent pas construire le « bon » modèle de l'économie et, encore moins, le partager entre eux ainsi qu'avec le modélisateur (Kirman, 2014). Les agents doivent plutôt s'appuyer sur des heuristiques (Simon, 1955, 1959 ; Cyert et March, 1992), qui s'avèrent être des outils robustes pour l'inférence et les actions (Gigerenzer et Brighton, 2009 ; Dosi *et al.*, 2020). Dans le même temps, les agents à rationalité limitée peuvent apprendre et découvrir de nouveaux modèles de comportement et de nouvelles technologies, introduisant ainsi sans cesse de la nouveauté (et de l'incertitude) dans le système économique. Enfin, les agents interagissent localement sur les marchés qui fonctionnent à la fois comme des mécanismes d'échange d'informations et de coordination et comme des dispositifs de sélection. Ces interactions sont responsables de l'auto-organisation apparente des marchés sans aboutir à des résultats efficaces ou à des équilibres optimaux, ni à des crises soudaines déclenchées par le franchissement de points de basculement.

L'étude des systèmes évolutifs complexes nécessite l'utilisation de modèles basés sur les agents, ou ABM (Tesfatsion, 2006 ; LeBaron et Tesfatsion, 2008 ; Fagiolo et Roventini, 2017 ; Dosi et Roventini, 2019), dont l'économie évolutionniste a été la pionnière depuis ses fondements (Nelson et Winter, 1982)³. Les ABM construisent l'économie de

2. Dans le même ordre d'idées, la notion (souvent mal comprise) de main invisible d'Adam Smith devrait être considérée comme une proposition concernant l'absence d'isomorphismes entre la cupidité des bouchers et des boulangers individuels et la livraison relativement ordonnée de viande et de pain sur les marchés (Dosi et Roventini, 2019).

3. L'économie évolutionniste ne repose pas exclusivement sur des modèles basés sur des agents, mais inclut également des théories appréciables et des modèles plus agrégés, tels que celui présenté dans Metcalfe et Foster (2010). Cet article se concentre uniquement sur les modèles évolutionnaires à base d'agents.

bas en haut (Tsfatsion, 2002) et intègrent directement l'hétérogénéité, la rationalité limitée, les interactions directes entre les agents et les dynamiques endogènes hors équilibre. En tant que tels, ces modèles fournissent des *fondements microéconomiques réalistes*, c'est-à-dire ancrés dans les données microéconomiques empiriques réelles (Simon, 1977 ; Kirman, 2016). Il convient de noter que les fondements microéconomiques évolutionnistes sont antithétiques aux fondements néoclassiques. Ces derniers conduisent à des modèles avec un agent représentatif⁴ solitaire et hyper-rationnel qui partage le « vrai » modèle de l'économie avec le modélisateur. Les fondements microéconomiques néoclassiques réduisent ainsi le niveau macroéconomique au microéconomique. À l'opposé, les théoriciens de l'évolution rejettent l'idée idiote et scandaleuse que l'on peut modéliser la dynamique d'une ruche en étudiant celle d'une « abeille représentative » (Dosi et Roventini, 2019) et considèrent que l'agrégation conduit à l'émergence. Des microfondations évolutionnaires sont donc nécessaires pour comprendre comment l'interaction d'entités hétérogènes produit des propriétés émergentes aux niveaux méso et macro.

Les modèles de croissance évolutifs basés sur des agents ont fleuri au cours des dernières décennies. En raison de contraintes d'espace, cet article ne fournit pas une étude⁵, mais présente les théories de la croissance évolutionnaire par le biais du modèle multi-pays multi-industries développé dans Dosi, Roventini et Russo (2019 ; 2020). Le modèle étudie une économie mondiale peuplée d'un ensemble d'entreprises appartenant à différents pays et industries et se faisant concurrence sur les marchés internationaux. Les entreprises s'efforcent d'innover et d'imiter leurs concurrents afin d'accroître leur productivité, leur compétitivité et, en fin de compte, leurs parts de marché. Le modèle présente donc un moteur schumpétérien de changement technique endogène entièrement microfondé. Dans le même temps, en accord avec une perspective Keynes-Kaldor, les changements dans les conditions de la demande intérieure et internationale affectent à la fois

4. Voir Kirman (1992) pour une critique dévastatrice de la fiction de l'agent représentatif.

5. Naturellement, le premier modèle de croissance évolutionnaire est apparu dans Nelson et Winter (1982). Depuis lors, le nombre de contributions a explosé. Une première série de modèles explore l'émergence de la croissance dans un cadre mono-pays, voir Silverberg et Lehnert (1994), Silverberg et Verspagen (1994), Fagiolo et Dosi (2003), Dosi, Fagiolo et Roventini (2010), et Caiani, Russo et Gallegati (2019) parmi beaucoup d'autres. D'autres contributions étudient la croissance endogène dans une perspective multi-pays, voir par exemple Dosi *et al.* (1994), Silverberg et Verspagen (1995), Llerena et Lorentz (2004), et Caiani, Catullo et Gallegati (2019). Enfin, une série de modèles se concentrent sur le changement structurel et la croissance économique, voir Saviotti et Pyka (2004 ; 2008), Ciarli *et al.* (2010 ; 2018), Lorentz *et al.* (2016) et Dosi *et al.* (2022).

les fluctuations économiques, le commerce international et les trajectoires de croissance⁶.

Les résultats de la simulation montrent que le modèle évolutionnaire est capable de rendre compte de l'émergence de la croissance, alors que les trajectoires de croissance des pays divergent au fil du temps. Cette dynamique est due à l'évolution des avantages/désavantages technologiques *absolus* qui façonnent la spécialisation nationale et de la structure des échanges entre les pays (Dosi, Pavitt et Soete, 1990). La formation d'avantages absolus entre les pays découle des rétroactions cumulatives kaldoriennes au niveau de l'entreprise entre l'innovation et la dynamique de la demande, qui s'amplifient au niveau du pays (Kaldor, 1967 ; Myrdal, 1957). En effet, les activités d'innovation et d'imitation des entreprises (ou leur absence) déterminent leur compétitivité et leurs parts de marché sur les marchés mondiaux, en stimulant (ou non) leurs ventes et leurs ressources pour la recherche et l'apprentissage. Le résultat de ces mécanismes est l'émergence d'un groupe de nations leaders et d'un club plus large de retardataires accumulant des *écarts technologiques* (Cimoli, 1988 ; Dosi, Pavitt et Soete, 1990 ; Freeman et Soete, 1997 ; Reinert, 2009 ; Cimoli et Porcile, 2013 ; Lavopa et Szirmai, 2018) dans la plupart de leurs secteurs d'activité. La structure de ces lacunes et de ces écarts, enracinée dans les trajectoires d'apprentissage propres à chaque entreprise, est également responsable du processus de transformation structurelle que chaque pays connaît le long de sa trajectoire de croissance. L'histoire décrite jusqu'à présent s'accompagne d'une riche liste de faits stylisés qui correspondent au modèle aux niveaux micro, méso et macro.

Enfin, le modèle évolutionnaire est utilisé pour évaluer les politiques qui permettent aux pays en retard de rattraper les leaders. Les résultats de la simulation montrent que les politiques favorables au marché ne permettent jamais aux pays en retard d'atteindre la frontière technologique ; au contraire, elles renforcent la polarisation entre les différents clubs d'économies. À l'inverse, les politiques industrielles (Cimoli, Dosi et Stiglitz, 2009) ciblant le développement des capacités des entreprises et les investissements en recherche et développement (R et D), ainsi que les restrictions commerciales visant à protéger les industries naissantes, favorisent la convergence des économies à la traîne. Les coûts statiques relativement mineurs (par exemple, l'augmentation des

6. Le modèle répond ainsi à l'appel de Solow (2005) pour la prise en compte des rétroactions complexes entre la demande et l'offre à moyen et long terme dans un cadre multi-pays.

prix intérieurs) introduits par les politiques industrielles sont plus que compensés par les gains dynamiques importants découlant de l'apprentissage et de l'absorption des technologies étrangères. Le protectionnisme ne suffit pas à lui seul à favoriser le rattrapage : les pays se retrouvent alors coincés dans un piège à revenus moyens. Enfin, dans une guerre commerciale mondiale, où les économies à revenu élevé imposent des droits de douane en représailles, les retardataires comme les leaders sont moins bien lotis et la croissance de la productivité mondiale ralentit.

Le reste de l'article est organisé comme suit. La section 1 présente quelques faits stylisés à différents niveaux d'agrégation qui devraient être reproduits par tout modèle de croissance. Les fondements des modèles évolutionnaires à base d'agents sont examinés à la section 2. Le modèle évolutionnaire multi-pays de base est présenté à la section 3. Les résultats de la simulation sont présentés à la section 4. Enfin, la section 5 conclut en discutant des complémentarités fructueuses possibles entre les théories évolutionnistes et d'autres théories alternatives de la croissance.

1. Que faut-il expliquer ? Données à plusieurs échelles sur les modèles d'innovation et de croissance

Comme nous l'avons indiqué, la croissance économique auto-entretenu doit être expliquée comme un phénomène à plusieurs échelles. En effet, l'apparente croissance exponentielle ordonnée que connaît le PIB de nombreux pays émerge de dynamiques turbulentes qui se produisent à des niveaux d'agrégation inférieurs, où les entreprises se livrent à une concurrence schumpétérienne, innovant pour survivre à un processus de sélection du marché. Dans le même temps, de nouvelles industries apparaissent et se développent tandis que d'autres déclinent, dans un processus perpétuel de changement structurel. Ces processus autocatalytiques qui se produisent aux niveaux micro et méso sont à l'origine de la croissance économique.

La racine du processus évolutif de croissance est capturé par les statistiques macroéconomiques (Metcalfe et Foster, 2010). Pour ces raisons, il faut commencer par examiner les données empiriques sur la croissance économique dans une perspective multi-pays aux niveaux macro, méso et micro d'agrégation (pour des enquêtes, voir Dosi, Freeman et Fabiani, 1994 ; Durlauf, Johnson et Temple, 2005 ; et Jones, 2016). Les faits stylisés présentés dans cette section devraient

être considérés comme le banc d'essai pour évaluer le pouvoir explicatif des théories et modèles de croissance concurrents⁷.

1.1. Croissance et fluctuations macroéconomiques

De nombreux récits historiques font état d'une hausse exceptionnelle des niveaux de vie au cours des deux derniers siècles (Landes, 1969 ; Bordo, Taylor et Williamson, 2007 ; Maddison, 2010). Néanmoins, ce décollage s'est produit dans un nombre relativement restreint de pays occidentaux, et ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que ce club a été rejoint par le Japon et, plus tard encore, par quelques économies d'Asie de l'Est. Ces épisodes de rattrapage ont été plutôt rares, tout comme les phénomènes d'avance ou de retard (Abramovitz, 1986). Plus généralement, l'ère de la croissance économique auto-entretenu est sans aucun doute associée à la « grande divergence » (Allen, 2001) : partant de conditions préindustrielles similaires (Bairoch, 1981), les pays sont aujourd'hui extrêmement différenciés en termes de plusieurs indicateurs, notamment les niveaux de productivité et la richesse par habitant.

Il n'est pas surprenant que la littérature empirique sur la croissance ait largement rejeté l'hypothèse de convergence sur la base de différentes techniques économétriques. En effet, il n'existe aucune preuve empirique de ce que l'on appelle la *s-convergence* (c'est-à-dire la diminution de la dispersion des revenus entre les pays – Sala-i Martin, 1996), et la *b-convergence* (c'est-à-dire que les pays dont le revenu par habitant est initialement faible connaissent une croissance plus rapide) ne se produit que dans des sous-échantillons d'économies caractérisées par des conditions initiales similaires et des caractéristiques communes (Durlauf et Johnson, 1995) et au cours de certaines périodes historiques spécifiques. Si l'on considère la dynamique de l'ensemble de la distribution transversale des revenus des pays, la recherche a plutôt montré une forte évolution dans le temps vers la bimodalité et la polarisation (Quah, 1996 ; Bianchi, 1997 ; Henderson, Parmeter et Russell, 2008 ; Castaldi et Dosi, 2009), ainsi qu'une faible mobilité entre les « clubs » de revenus (Quah, 1993 ; 1997). Les classements relatifs entre les pays ont tendance à être stables et seules quelques économies réussissent à passer du club des faibles revenus à celui des hauts revenus (tandis que certaines passent du club des hauts revenus à celui des bas revenus, comme l'Argentine).

7. Cette section s'inspire largement de Dosi, Roventini et Russo (2019).

Contrairement à ce qu'implique tout modèle d'équilibre, les données réelles n'indiquent guère de trajectoires de croissance stables. La corrélation entre les périodes des taux de croissance des différents pays est plutôt faible, ce qui suggère que les trajectoires de développement sont relativement instables (Easterly *et al.*, 1993 ; Pritchett *et al.*, 2000), avec une alternance de phases d'accélération et de décélération (Rodrik, 1999 ; Hausmann, Pritchett et Rodrik, 2005 ; Lamperti et Mattei, 2018).

En ce qui concerne les propriétés statistiques des distributions des taux de croissance, Castaldi et Dosi (2009) constatent l'existence de queues épaisses dans la densité empirique obtenue en regroupant les taux de croissance de différents pays et années. Symétriquement, les données montrent une relation négative entre les niveaux de revenu et la variabilité des taux de croissance (Canning *et al.*, 1998 ; Castaldi et Dosi, 2009). En gros, les pays en retard ont tendance à connaître des fluctuations globales plus importantes.

Résumons la première série de faits stylisés (FS) concernant les modèles de croissance internationale :

FS 1 : Au cours des deux derniers siècles, les revenus par habitant ont augmenté de façon exponentielle dans tous les pays touchés par le processus d'industrialisation.

FS 2 : L'histoire a connu des épisodes (pas trop fréquents) de rattrapage, d'avance et de retard.

FS 3 : La dispersion des revenus globaux a augmenté au fil du temps sans *s*-convergence.

FS 4 : *b*-convergence n'apparaît que sous une forme ou une autre de biais de sélection *ex ante*.

FS 5 : La distribution transversale des revenus révèle une tendance à la bimodalité et à la polarisation.

FS 6 : Il y a un manque général de mobilité entre les clubs de revenus ; les classements relatifs sont plutôt stables.

FS 7 : Les taux de croissance sont faiblement corrélés entre les périodes ; les trajectoires de croissance sont relativement peu stables.

FS 8 : La distribution des taux de croissance internationaux a une forme laplacienne avec des queues épaisses.

FS 9 : La volatilité des taux de croissance est négativement associée aux niveaux de revenus.

Ensuite, nous examinons le comportement des économies à moyen et à court terme. Tout d'abord, il est clairement établi que des récessions légères coexistent avec des crises profondes (Stiglitz, 2011 ; 2015). Cela est cohérent avec les preuves sur les distributions de taux de croissance du PIB à queues épaisses fournies par Fagiolo, Napoletano et Roventini (2008). À court terme, depuis les travaux fondateurs de Burns et Mitchell (1946), il existe des faits stylisés solides concernant les co-mouvements et la volatilité relative entre la production, la consommation et l'investissement (voir par exemple Stock et Watson, 1999 ; Napoletano, Roventini et Sapio, 2006). Les dépenses totales d'investissement sont plus volatiles que le PIB qui, à son tour, fluctue davantage que la consommation. L'investissement et la consommation évoluent conjointement avec le PIB et sont des variables coïncidentes et procycliques. Nous pouvons ensuite ajouter d'autres faits stylisés à la liste :

FS 10 : La production croît de manière exponentielle en affichant d'importantes fluctuations endogènes.

FS 11 : Des récessions légères coexistent avec des récessions profondes.

FS 12 : L'investissement est plus volatil que la production, tandis que la consommation l'est moins.

FS 13 : L'investissement et la consommation sont des variables à la fois procycliques et coïncidentes.

1.2. Dynamique industrielle

Le processus de développement implique une transformation structurelle de l'économie (Kuznets, 1966). Le changement structurel façonne continuellement les trajectoires de croissance à mesure que la production migre des activités agricoles traditionnelles vers l'industrie manufacturière et, plus récemment, vers les secteurs à forte intensité d'information (Lavopa et Szirmai, 2018). En utilisant des données inter-pays pour les sous-secteurs manufacturiers, Dosi, Pavitt et Soete (1990) constatent que les nations avancées ont tendance à développer des avantages absolus dans la plupart des activités industrielles, respectivement des « avantages comparatifs » plus finement définis.

Il semble qu'il y ait des spécificités nationales dans les écarts de productivité qui ne varient pas de manière significative lorsque l'on réduit l'échelle d'observation à des industries individuelles. Cela semble suggérer l'existence de grands modèles dirigés par des externalités et

des rétroactions vertueuses (vicieuses) à l'échelle du pays, reliant des processus d'apprentissage et d'« autodécouverte » plus fins et sous-sectoriels (Hausmann et Rodrik, 2003 ; Cimoli, Dosi et Stiglitz, 2009). Toutefois, au niveau sectoriel également, la croissance se fait par à-coups : analysant les propriétés de distribution des taux de croissance sectoriels, Castaldi et Sapio (2008) ont trouvé des preuves en faveur de densités à queue épaisse, conformément à ce qui a été observé au niveau national.

Les régularités empiriques au niveau méso peuvent être résumées comme suit :

FS 14 : Des changements structurels endogènes accompagnent les trajectoires de développement et de croissance.

FS 15 : Les pays leaders ont tendance à accumuler des avantages technologiques absolus dans la plupart des secteurs d'activité.

FS 16 : La distribution des taux de croissance de l'industrie présente des queues épaisses.

1.3. Régularités empiriques au niveau de l'entreprise

Les entreprises sont les principaux lieux d'innovation et de changement technique. Par conséquent, elles sont l'un des principaux moteurs de la dynamique observée au niveau de l'industrie et du pays. C'est pourquoi il convient de tenir compte également des faits stylisés microéconomiques concernant la dynamique des entreprises (voir Dosi, 2007, pour une étude sur le sujet).

Toutes les données disponibles suggèrent une hétérogénéité forte et persistante entre les entreprises. Les entreprises diffèrent profondément dans leurs capacités et leurs formes d'organisation, elles maîtrisent des technologies différentes et suivent des trajectoires d'apprentissage idiosyncrasiques (Nelson et Winter, 1982 ; Dosi, Nelson et Winter, 2001). Cela se reflète dans les données relatives à la productivité des entreprises, qui révèlent toujours une grande dispersion persistant dans le temps (Bartelsman et Doms, 2000 ; Syverson, 2011). À leur tour, les niveaux d'efficacité hétérogènes se traduisent par des rentabilités et des performances différentes. Dans l'ensemble, la distribution de la taille des entreprises s'écarte fortement de la référence gaussienne (log), tandis que les distributions des taux de croissance microéconomiques sont bien approximées par une densité de Laplace à queue épaisse (Bottazzi et Secchi, 2003 ; 2006). À son tour, la présence de queues épaisses peut être directement liée à un

certain degré de dispersion sous-jacent dans le processus de croissance des entreprises ainsi qu'à la structure de corrélation découlant du processus même de la concurrence (voir Dosi, 2007 ; Dosi, Pereira et Virgillito, 2016). Il convient de noter que les distributions des taux de croissance observées au niveau de l'entreprise, de l'industrie et du pays suggèrent qu'un tel processus irrégulier survit à l'agrégation et pourrait indiquer une conjecture universelle de mise à l'échelle (Fagiolo, Napoletano et Roventini, 2008).

Les trajectoires de croissance hétérogènes des pays affectent leurs schémas commerciaux et la performance des entreprises sur les marchés internationaux. Tout d'abord, les entreprises exportatrices ne représentent qu'une petite fraction de la population totale des entreprises (Bernard et Jensen, 1999 ; Bernard *et al.*, 2012). Une question naturelle se pose alors : les exportateurs présentent-ils des caractéristiques spécifiques ? Les données empiriques montrent clairement que les entreprises exportatrices sont généralement plus grandes, plus productives, ont une intensité capitalistique plus élevée, emploient des travailleurs plus qualifiés et versent des salaires plus élevés que leurs concurrents non exportateurs (Bernard et Jensen, 1999 ; Bernard *et al.*, 2012).

Les régularités empiriques au niveau de l'entreprise qui précèdent concluent notre liste de faits stylisés à plusieurs échelles :

FS 17 : Il existe des écarts de productivité importants et persistants entre les entreprises d'un même secteur et d'un même pays, à tous les niveaux d'agrégation, et plus encore entre les pays.

FS 18 : La distribution de la taille des entreprises s'écarte de la log-normalité et est asymétrique à droite.

FS 19 : La distribution des taux de croissance des entreprises présente des queues épaisses.

FS 20 : Seul un sous-ensemble relativement restreint d'entreprises est exportateur.

FS 21 : Les exportateurs sont plus grands et plus productifs que les non-exportateurs.

2. Modèles évolutifs basés sur des agents

La grande ambition du programme de recherche évolutionniste est de rendre compte conjointement de l'émergence de la croissance et des fluctuations économiques, ainsi que des faits stylisés multi-échelles énumérés ci-dessus. Pour ce faire, on développe des modèles basés sur des agents, ou ABM (Tsfatsion, 2006 ; LeBaron et Tsfatsion, 2008 ; Fagiolo et Roventini, 2017 ; Dosi et Roventini, 2019), qui permettent l'étude informatique des économies connues comme des systèmes évolutifs complexes (voir introduction). Un ABM construit une économie de bas en haut, où les interactions hors équilibre d'agents hétérogènes (entreprises, travailleurs, banques, etc.) produisent un certain ordre collectif, même si la structure du système change continuellement.

Les modèles basés sur des agents reposent sur des *fondements microéconomiques* solides, c'est-à-dire sur des hypothèses réalistes concernant les comportements et les interactions des agents, le terme *réaliste* signifiant ici ancré dans les données microéconomiques empiriques réelles (Simon, 1977 ; Kirman, 2016). En tant que telles, les microfondations évolutionnaires représentent un progrès radical par rapport aux fondations néoclassiques, qui supposent imprudemment que le théoricien et l'agent représentatif connaissent comme Dieu le « vrai » modèle de l'économie, quelles que soient les informations dont ils disposent. Cela implique un isomorphisme étrange entre la connaissance incarnée par l'observateur et celle incarnée par l'objet de l'observation. De plus, les agents humains ne sont pas dotés d'une « rationalité olympique », mais se comportent selon des règles, des routines et des heuristiques (Gigerenzer, 2007 ; Gigerenzer et Brighton, 2009) qui évoluent de manière adaptative au fil du temps par le biais de l'apprentissage.

Après le principe crucial concernant les *comportements*, examinons les *interactions*. La méthodologie évolutive basée sur les agents est encline à construire tout macro-édifice, dans la mesure du possible, sur des micro-interactions réelles. Cela concerne ce qui se passe *au sein des organisations* – un sujet qui dépasse la portée de ce travail – et *entre les organisations et les individus*, c'est-à-dire l'ensemble flou des marchés. Même si l'on est loin d'une compréhension globale du « fonctionnement des marchés », cela n'empêche pas de rechercher les interactions du marché en invoquant l'existence d'un point fixe, comme le font les modèles néoclassiques. Il est certainement nécessaire de disposer de

plus d'éléments sur l'architecture institutionnelle spécifique des interactions de marché et de leurs résultats (Kirman et Dosi, 2023, constitue un bon point de départ). À défaut, des représentations beaucoup plus concises (et plus noires) proviennent de la théorie du travail en réseau (par exemple, Albert et Barabási, 2002) et des interactions sociales (par exemple, Brock et Durlauf, 2001), qui s'éloignent des modèles d'interaction non triviaux. Ces éléments, ainsi que les preuves de l'hétérogénéité et de la turbulence persistantes qui caractérisent les marchés et les économies, orientent l'étude vers des modèles d'interaction non triviaux.

La recherche sur les dynamiques hors d'équilibre, alimentées de manière endogène par les interactions entre agents hétérogènes, est un élément essentiel de la stratégie de l'Union européenne (UE).

Ces éléments constitutifs sont plus que suffisants pour produire les propriétés des *environnements complexes*. Mais qu'en est-il de l'évolution ? Fondamentalement, cela signifie l'émergence de la nouveauté, c'est-à-dire de nouvelles technologies, de nouveaux produits, de nouvelles formes d'organisation, de nouvelles industries, etc., qui apparaissent à un moment donné le long de la flèche du temps et qui n'existaient pas dès le départ. Tout cela – qui est essentiel pour comprendre les différents modèles de croissance – peut être capturé par des dynamiques *endogènes* sur les « fondamentaux » des économies (voir Dosi et Winter, 2002 et Dosi et Virgillito, 2021).

Ce sont les piliers évolutionnaires concernant les comportements, les interactions et l'évolution sur lesquels repose le modèle basé sur les agents présenté dans la section suivante.

3. Le modèle de croissance évolutionnaire de base

Le modèle multi-pays multi-industries de Dosi, Roventini et Russo (2019 ; 2020) présente N économies (indexées par i) composées de M industries de biens de consommation (indexées par h) et d'un secteur de biens d'équipement⁸. Chaque secteur de biens de consommation est peuplé de S entreprises (indexées par j). Les technologies de production sont hétérogènes d'une entreprise à l'autre et évoluent de manière endogène par le biais de processus schumpétériens d'innovation et d'imitation. Par souci de simplicité, nous supposons que la

8. Cette section s'inspire de Dosi, Roventini et Russo (2019 ; 2020).

recherche et l'innovation ne se produisent que dans le secteur des biens de consommation et prennent la forme d'augmentations de la productivité du travail, c'est-à-dire que le progrès technique est neutre du point de vue de Harrod. Enfin, les pays sont dotés d'une offre de travail infinie, ce qui est une hypothèse simplificatrice qui correspond néanmoins largement à ce qui est observé dans les pays moins développés.

3.1. Chronologie des événements

À chaque pas de temps t , les événements se déroulent comme suit :

1. Les entreprises des industries de biens de consommation effectuent des travaux de R et D afin de découvrir de nouvelles techniques et d'imiter des concurrents plus proches de la frontière technologique. Les entreprises qui réussissent sont en mesure d'améliorer la productivité de leur travail.
2. Des décisions de production, d'investissement et d'emploi sont prises. Compte tenu de leurs prévisions, les entreprises de biens de consommation fixent leur production souhaitée, embauchent des travailleurs en conséquence et, si nécessaire, augmentent leur capacité de production.
3. Le secteur des biens d'équipement de chaque pays réel reçoit des commandes des entreprises des industries des biens de consommation, embauche des travailleurs et lance la production.
4. Les salaires monétaires et les taux de change sont fixés au niveau national.
5. Ouverture de marchés internationaux de biens de consommation imparfaitement concurrentiels. Les travailleurs dépensent leur revenu pour acheter des biens nationaux et importés. Les parts de marché des entreprises évoluent en fonction de leur compétitivité-prix.
6. L'entrée et la sortie ont lieu. Les entreprises dont la part de marché est quasi nulle quittent le marché et sont remplacées par de nouvelles.
7. Les machines commandées en début de période sont livrées et entrent dans le capital social pour la période suivante.

À la fin de chaque pas de temps, les variables globales (par exemple, le PIB, les investissements, la consommation, les exportations, les importations, etc.) sont calculées en additionnant les variables micro-économiques correspondantes.

3.2. Innovation, imitation et production

Le secteur des biens de consommation dans chaque pays est composé de M industries et de S entreprises par industrie. Les entreprises investissent en R et D (RD) une proportion fixe de leurs ventes passées (SS)⁹ :

$$RD_{j,h}^i(t) = \rho SS_{j,h}^i(t-1), \quad (1)$$

avec $\rho \in (0,1)$. Les dépenses totales de R et D sont alors réparties entre les efforts d'innovation (IN) et d'imitation (IM) :

$$IN_{j,h}^i(t) = \lambda RD_{j,h}^i(t), \quad (2)$$

$$IM_{j,h}^i(t) = (1 - \lambda) RD_{j,h}^i(t), \quad (3)$$

avec $0 \leq \lambda \leq 1$.

L'innovation et l'imitation sont modélisées comme un processus stochastique en deux étapes. Dans un premier temps, un tirage d'une distribution de Bernoulli (θ) détermine si les entreprises réussissent dans leurs activités de recherche. Les probabilités de succès (θ_{in} , θ_{im}) sont une fonction croissante des dépenses de R et D et des capacités de recherche des entreprises ($\xi_{1,2} > 0$)¹⁰ :

$$\theta_{in_{j,h}}^i(t) = \min \{ \theta_{max}; 1 - e^{-\xi_1 IN_{j,h}^i(t)} \}, \quad (4)$$

$$\theta_{im_{j,h}}^i(t) = \min \{ \theta_{max}; 1 - e^{-\xi_2 IM_{j,h}^i(t)} \}. \quad (5)$$

Les entreprises qui réussissent à innover découvrent une nouvelle technique de production associée à un coefficient de productivité du travail A_{in} :

$$A_{in_{j,h}}^i(t) = A_{j,h}^i(t-1) \left(1 + x_{j,h}^i(t) \right) \text{ où : } x \sim \text{Beta}(\alpha_1, \beta_1). \quad (6)$$

L'augmentation multiplicative (x) est tirée d'une distribution bêta avec des paramètres (α_1 , β_1) et un support $[\underline{x}_1, \bar{x}_1]$, avec $\underline{x}_1 \in [-0,1]$ et $\bar{x}_1 \in [1,0]$. La forme et le support de la distribution bêta reflètent les opportunités technologiques. Étant donné le degré élevé d'incertitude qui caractérise le processus d'innovation, les techniques nouvellement découvertes peuvent être moins productives que celles que les

9. Comme dans d'autres modèles évolutionnistes (Chiaromonte et Dosi, 1993 ; Dosi *et al.*, 1994a, 2010), les stratégies de R et D sont supposées entièrement routinières et invariantes dans le temps. Il convient de noter que l'hypothèse de coefficients de dépenses de R et D fixes est tout à fait conforme aux comportements réels des entreprises (Nelson et Winter, 1982 ; Dosi, 1988 ; Dosi et Egidi, 1991).

10. Il existe une limite supérieure $\theta_{max} < 1$ pour tenir compte du fait qu'il existe toujours un degré minimum d'incertitude dans les activités de recherche.

entreprises maîtrisent actuellement. Les opportunités technologiques et les capacités de recherche des entreprises sont façonnées par les caractéristiques des *régimes technologiques* (Dosi, 1988 ; Dosi et Nelson, 2010).

Les entreprises capables d'imiter avec succès leurs concurrents copieront au hasard une technique (*Aim*) de ces derniers. La probabilité d'imiter une technologie spécifique est inversement proportionnelle à distance technologique et dépend de la *capacité d'absorption* des entreprises (Cohen et Levinthal, 1990 ; Griffith *et al.*, 2003). Plus précisément, conformément à la version étendue du modèle de Dosi *et al.* (2020b), la probabilité qu'une entreprise j du pays i imite succès un concurrent spécifique l pays k est liée à l'inverse de la distance technologique (euclidienne) (d), rééchelonnée par la variable de capacité d'absorption ϕ^{11} :

$$d_{j,l}(t) = \frac{1}{1 + \phi_{j,h}^i(t) [\hat{A}_{l,h}^k(t-1) - \hat{A}_{j,h}^i(t-1)]} \quad (7)$$

L'évolution de $\phi_{j,h}^i$ est spécifique à l'entreprise et dépend des dépenses de R et D cumulées dans le passé (*RDcum*) :

$$\phi_{j,h}^i(t) = \phi_0 \exp[-\phi_1 RDcum_{j,h}^i(t-1)], \text{ où : } \phi_0 = \begin{cases} 1 & \text{if } i = k \\ \epsilon & \text{if } i \neq k \end{cases} \quad (8)$$

avec $\phi_1 > 0$ et $\epsilon \geq 1$. Le paramètre ϕ_1 reflète les aptitudes et les compétences de l'entreprise, tandis que ϵ représente les barrières structurelles à l'imitation étrangère (par exemple, une législation restrictive en matière de droits de propriété intellectuelle). Par conséquent, à mesure que les entreprises accumulent de l'expérience en R et D, la variable ϕ diminue, ce qui accroît leur accès à des techniques technologiquement éloignées. À la suite de ce processus, les entreprises recevront de leurs concurrents un coefficient de productivité ($\hat{A}$), qui représente un potentiel nécessitant un apprentissage et une adaptation supplémentaires afin d'être pleinement exploité. La vitesse d'apprentissage à laquelle le nouveau coefficient sera internalisé par l'entreprise est, là encore, fonction de sa capacité d'absorption (ω) :

$$A[im]_{j,h}^i(t) = (1 - \omega_{j,h}^i(t))A[im]_{j,h}^i(t-1) + \omega_{j,h}^i(t)\hat{A}_{j,h}^i(t), \quad (9)$$

11. Pour obtenir des probabilités définies dans $[0, 1]$, nous normalisons par la somme sur l de $d_{j,l}$. Ce mécanisme est fondé empiriquement. En effet, la littérature sur les écarts technologiques soutient l'idée que de fortes capacités d'absorption peuvent aider à surmonter les contraintes d'imitation posées par la distance technologique et par d'autres barrières institutionnelles à l'adoption de la technologie (voir par exemple Abramovitz, 1986 ; Dosi *et al.*, 1990 ; Fagerberg *et al.*, 2005).

où $A[im]$ est le coefficient de productivité réel issu du processus d'imitation. La variable de capacité d'absorption (ω) évolue en fonction de la R et D cumulée spécifique à l'entreprise :

$$\omega_{j,h}^i(t) = \omega_0 - \omega_0 \exp[-\omega_1 RDcum_{j,h}^i(t-1)], \quad (10)$$

avec $\omega_0 \in (0,1)$ et $\omega_1 > 0$.

Enfin, une fois les processus d'innovation et d'imitation achevés, chaque entreprise sélectionne la technique de production la plus efficace parmi celles qu'elle peut maîtriser, c'est-à-dire celle qui entraîne une réduction des coûts de production avec l'augmentation de la productivité du travail :

$$A_{j,h}^i(t) = \max\{A_{j,h}^i(t-1); Ain_{j,h}^i(t); Aim_{j,h}^i(t)\}. \quad (11)$$

Étant donné le niveau du salaire nominal (W) fixé au niveau national (voir l'équation 26 ci-dessous), les entreprises fixent le prix (p) sous la forme d'une marge (m) par rapport au coût unitaire du travail de production :

$$p_{j,h}^i(t) = (1 + m_{j,h}^i(t)) \frac{w_{j,h}^i(t)}{A_{j,h}^i(t)}. \quad (12)$$

Le taux de marge évolue en fonction de la dynamique des parts de marché antérieures (f) :

$$m_{j,h}^i(t) = m_{j,h}^i(t-1) \left(1 + v \frac{f_{j,h}^i(t-1) - f_{j,h}^i(t-2)}{f_{j,h}^i(t-2)}\right), \quad (13)$$

avec $u > 0$.

Les entreprises de biens de consommation produisent en utilisant à la fois du travail et du capital. Alors que la productivité du travail augmente avec le temps en raison du changement technique, le ratio capital-production (B) reste constant (conformément à Kaldor, 1957 et Dosi *et al.*, 1990). Les entreprises fixent la production souhaitée (Qd) en fonction des anticipations de la demande adaptative (D)¹² :

$$Qd_{j,h}^i(t) = f(D_{j,h}^i(t-1), D_{j,h}^i(t-2), \dots, D_{j,h}^i(t-k)). \quad (14)$$

La production souhaitée est limitée par la capacité de production. Ainsi, la production réelle (Q) est calculée comme suit :

$$Q_{j,h}^i(t) = \min\left\{Qd_{j,h}^i(t), \frac{K_{j,h}^i(t)}{B}\right\}, \quad (15)$$

où K est le stock de capital.

12. Nous supposons que les attentes sont myopes, c'est-à-dire $Qd_{j,h}^i(t) = Dd_{j,h}^i(t-1)$. Conformément à Dosi *et al.* (2006, 2020a), les résultats du modèle sont robustes lorsque des règles d'espérance plus complexes sont utilisées.

Les entreprises soumises à des contraintes de capacité investissent pour accroître leur stock de capital. Plus précisément, les investissements d'expansion (Ie) se produisent chaque fois que le stock de capital souhaité (Kd) dépasse le stock réel :

$$Ie_{j,h}^i(t) = Kd_{j,h}^i(t) - K_{j,h}^i(t), \quad (16)$$

avec $Kd_{j,h}^i(t) = BQd_{j,h}^i(t)$. Les entreprises investissent également pour couvrir la dépréciation (constante) du capital (δ). Les investissements de remplacement (Ir) sont donc simplement :

$$Ir_{j,h}^i(t) = \delta K_{j,h}^i(t), \quad (17)$$

avec $\delta \in (0,1)$. La loi du mouvement des stocks de capital est alors égale à :

$$K_{j,h}^i(t+1) = K_{j,h}^i(t) + Ie_{j,h}^i(t). \quad (18)$$

Dans chaque pays, les entreprises nationales acquièrent leurs machines auprès d'un secteur de biens d'équipement agrégé (c'est-à-dire non modélisé par une seule entreprise). La production totale (Q_k) est égale à la somme des commandes des entreprises nationales (I^i), c'est-à-dire $Q^i(t) = I^i(t)$. La productivité du travail dans les secteurs du capital est supposée suivre la productivité moyenne au niveau du pays $A^i(t)$, de sorte que les prix suivent le coût unitaire du travail de la production.

3.3. Dynamique du marché et sélection

La sélection du marché régit la répartition de la demande internationale de différents biens de consommation entre les entreprises. Dans chaque pays, la consommation totale correspond à la masse salariale. Pour simplifier, nous supposons que les travailleurs dépensent une proportion égale $d_h = 1/M$ de leur revenu dans chaque industrie de biens de consommation¹³.

Chaque entreprise est en concurrence sur N marchés nationaux, tous caractérisés par une information imparfaite. Les biens étant homogènes au sein de chaque secteur, la compétitivité des entreprises dépend du prix qu'elles pratiquent. Naturellement, sur les marchés

13. Cette hypothèse implique que les élasticités sectorielles de la demande par rapport au revenu sont constantes et égales à 1. Il s'agit évidemment d'une simplification : dans la tradition évolutionniste, le rôle des changements structurels induits par des modifications des modèles de consommation est analysé en détail dans Verspagen (1992), Montobbio (2002), Ciarli *et al.* (2010) et Lorentz (2015).

étrangers, les prix des entreprises sont affectés par les taux de change et les coûts commerciaux (Anderson et Van Wincoop, 2004). Plus précisément, pour une entreprise j , opérant dans l'industrie h et basée dans le pays i , sa compétitivité dans le pays k est donnée par :

$$E_{j,h}^{i,k}(t) = \frac{1}{p_{j,h}^i(t)e^{i,k}(t)(1+\tau)}, \quad (19)$$

où $e^{i,k}$ représente le taux de change nominal entre les pays i et k , et le paramètre τ capture les coûts supplémentaires liés à la concurrence sur les marchés étrangers (égal à zéro si $i = k$ et strictement positif si $i \neq k$). La compétitivité moyenne ($\bar{E}$) de l'industrie h dans le pays k est calculée en additionnant la compétitivité des entreprises sur les pays pondérés par leurs parts de marché :

$$\bar{E}_h^k(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^S E_{j,h}^{i,k}(t) f_{j,h}^{i,k}(t-1). \quad (20)$$

Enfin, la sélection du marché affecte les parts de marché des entreprises (f) au moyen d'une dynamique de quasi-réplication¹⁴ :

$$f_{j,h}^{i,k}(t) = f_{j,h}^{i,k}(t-1) \left(1 + \chi \frac{E_{j,h}^{i,k}(t) - \bar{E}_h^k(t)}{\bar{E}_h^k(t)} \right), \quad (21)$$

avec $\chi > 0$. En résumé, les parts de marché des entreprises plus compétitives sur chaque marché augmenteront, tandis que celles des entreprises moins efficaces (pratiquant des prix plus élevés) diminueront. Le paramètre χ représente la force de la concurrence sur le marché. La part de marché sur le marché mondial de l'entreprise j en concurrence dans l'industrie h est :

$$f_{j,h}^i(t) = \sum_{k=1}^N f_{j,h}^{i,k}(t) / N. \quad (22)$$

Compte tenu du salaire (W) et de l'emploi national agrégé (L), la demande intérieure ($Dint$) de chaque entreprise correspond à :

$$Dint_{j,h}^i(t) = W^i(t) L^i(t) d_h f_{j,h}^{i,k}(t), \text{ avec : } i = k \quad (23)$$

Symétriquement, la demande d'exportations ($Dexp$) est :

$$Dexp_{j,h}^i(t) = \sum_{k \neq i}^N W^k(t) L^k(t) e^{k,i}(t) d_h f_{j,h}^{i,k}(t). \quad (24)$$

14. La dynamique du quasi-réplicateur diffère de la dynamique canonique en autorisant des parts de marché négatives. La dynamique standard du réplicateur évolue au contraire sur le simplexe unitaire. Inversement, le « quasi-réplicateur » dissuade également la mort des entreprises : par l'entrée et la sortie, les entreprises dont les parts de marché sont proches de zéro ou négatives sont remplacées par de nouvelles entités. Pour une discussion plus approfondie du modèle de la dynamique du réplicateur, voir Silverberg *et al.* (1988), Dosi *et al.* (1995, 2016b).

Enfin, la demande individuelle totale est donnée par :

$$D_{j,h}^i(t) = Dint_{j,h}^i(t) + Dexp_{j,h}^i(t). \quad (25)$$

La concurrence internationale est également caractérisée par une dynamique schumpétérienne de sortie et d'entrée. À chaque pas de temps, les entreprises dont les parts de marché sont quasi nulles quittent le marché et sont remplacées par des entrants. Le nombre d'entreprises est donc constant dans chaque secteur¹⁵. La technologie des nouveaux entrants évolue en fonction de la productivité moyenne du secteur¹⁶. Conformément aux données empiriques, nous supposons également que les nouveaux entrants sont en moyenne plus petits que les entreprises en place (Caves, 1998 ; Bartelsman *et al.*, 2005) et que leur stock initial de capital est égal au niveau minimum dans le secteur.

3.4. Le cadre macroéconomique

Dans chaque pays, l'offre de travail est infiniment élastique aux variations de la demande (conformément à Lewis, 1954 et Cornwall, 1977). Par conséquent, l'emploi total est déterminé sur les marchés des biens par la demande totale de travail des entreprises de biens de consommation et de biens d'équipement et par la distribution des productivités du travail. Les salaires monétaires sont déterminés par des facteurs institutionnels comme dans Dosi *et al.* (2010) :

$$W^i(t) = W^i(t-1)[1 + \psi g_{prod}^i(t-1)], \quad (26)$$

où g_{prod} est la croissance retardée de la productivité et $\psi \geq 0$.

Les taux de change (e) évoluent en fonction des conditions passées de la balance courante et de bruit stochastique :

$$e^i(t) = e^i(t-1)(1 + \gamma \frac{TB^i(t-1)}{\bar{Y}(t-1)} + u_i(t)) \quad u_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_e), \quad (27)$$

où TB représente la balance commerciale, $\bar{Y}$ est le PIB mondial, u est un bruit blanc, et le paramètre γ régule la sensibilité de l'ajustement définissant le régime de change¹⁷. La formulation est également en

15. Les données empiriques confirment en effet l'idée que les nouveaux entrants sont grosso modo proportionnels au nombre de titulaires (Geroski, 1995).

16. Plus précisément, les techniques initiales des entreprises sont obtenues en appliquant à la productivité moyenne domestique de l'industrie un choc multiplicatif tiré d'une distribution bêta (α_2, β_2) avec support $[\underline{x}_2, \bar{x}_2]$ (où : $\underline{x}_2 \in [-1, 0]$ et $\bar{x}_2 \in [0, 1]$). Cette hypothèse est cohérente avec les évaluations théoriques et empiriques récentes soulignant le caractère cumulatif et la spécificité des modèles d'apprentissage nationaux (Fagerberg, 1994 ; Cimoli et Dosi, 1995 ; Fagerberg et Verspagen, 2002 ; Cimoli *et al.*, 2009).

accord avec celles utilisées dans les modèles de croissance contrainte par la balance des paiements (voir par exemple McCombie et Thirlwall, 1994 ; Thirlwall, 1979).

À la fin de chaque pas de temps, les agrégats nationaux sont déterminés en additionnant les microvariables correspondantes. Ainsi, la consommation nationale (C), les exportations totales (EXP) et les importations (IMP) sont calculées comme suit :

$$C^i(t) = W^i(t)L^i(t); \quad (28)$$

$$EXP^i(t) = \sum_{h=1}^M \sum_{j=1}^S Dexp_{j,h}^i(t); \quad (29)$$

$$IMP^i(t) = C^i(t) - \sum_{h=1}^M \sum_{j=1}^S Dint_{j,h}^i(t). \quad (30)$$

Bien entendu, la balance commerciale est $TB^i(t) = EXP^i(t) - IMP^i(t)$. Le PIB (Y) du pays i est alors égal à :

$$Y^i(t) = C^i(t) + I^i(t) + EXP^i(t) - IMP^i(t). \quad (31)$$

Il va sans dire que la somme des balances commerciales de tous les pays est égale à zéro au mondial :

$$\sum_{i=1}^N TB^i(t)e^i(t) = 0. \quad (32)$$

4. Prise en compte de la croissance, des changements structurels et des régularités empiriques à plusieurs échelles

Comment le modèle parvient-il à reproduire les régularités empiriques présentées dans la section 1¹⁸ ? Il impose des conditions initiales et des paramètres structurels identiques (voir tableau A1 de l'annexe) pour tous les pays, toutes les industries et toutes les entreprises. Cette stratégie d'introduction de pays « miroir » nous permet d'observer de manière transparente l'émergence de l'hétérogénéité entre les entreprises et les industries, et d'étudier son effet sur les modèles de croissance internationale, en isolant les principaux mécanismes sous-jacents. En effet, les résultats des simulations montreront qu'en présence d'avantages/désavantages technologiques absolus émergents, la divergence peut se produire sans différences exogènes dans

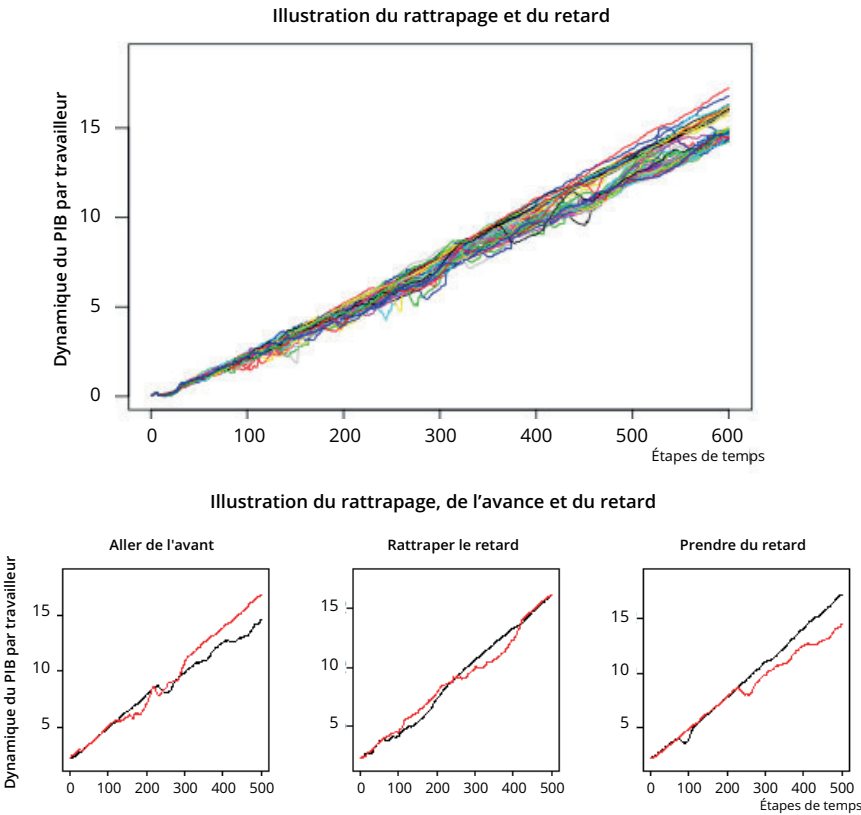
17. Le taux de change entre deux pays i et j peut être calculé comme suit : $e^{jk} = e^i/e^k$.

18. Cette section s'appuie en partie sur Dosi, Roventini et Russo (2019 ; 2020). Seul un sous-ensemble des résultats est présenté ici. Nous renvoyons aux deux articles pour une présentation plus détaillée des résultats de la simulation.

les caractéristiques structurelles des pays (par exemple, dotations en facteurs, capital humain, géographie, etc.).

Les résultats générés par le modèle sont analysés au moyen de simulations numériques Monte-Carlo (50 exécutions). Pour une explication détaillée de la validation empirique des modèles basés sur les agents, voir Fagiolo et Roventini (2017) et Fagiolo *et al.* (2019).

Graphique 1. Émergence de schémas de croissance divergents



Note : En haut, dynamique du PIB par travailleur ; en bas, illustration du rattrapage, de l'avance et du retard.
Source : Dosi, Roventini et Russo (2019).

4.1. Croissance endogène et modèles divergents

Commençons par examiner la dynamique du PIB par travailleur dans les 60 pays qui composent notre économie mondiale¹⁹ (voir graphique 1). Tout d'abord, le modèle génère de manière endogène une croissance exponentielle séculaire des revenus par travailleur (FS 1) et des schémas divergents entre les pays. Le graphique 1 (graphes du bas) présente quelques exemples archétypaux d'épisodes émergents d'avance, de rattrapage et de retard (FS 2).

Les séries de PIB simulées ne révèlent aucune tendance à la σ -convergence (FS 3) ou à la β -convergence (FS 4), ce qui suggère qu'à mesure que la distance technologique entre les pays augmente, l'imitation et le rattrapage deviennent plus difficiles. Les résultats précédents sont également corroborés par les différents tests de convergence proposés par Bernard et Durlauf (1991).

Cependant, comme les moments de la distribution des revenus ne rendent pas entièrement compte de sa dynamique temporelle (Quah, 1996), nous montrons dans le graphique 2 l'évolution de l'ensemble de la densité empirique des revenus internationaux, qui passe clairement d'une forme unimodale à une forme bimodale à la fin de la période de référence (FS 5)²⁰. Le modèle génère de manière endogène deux clubs de convergence pour les pays pauvres et les pays avancés, le second étant relativement plus petit que le premier. Ces résultats sont corroborés par les tests de bimodalité couramment utilisés dans la littérature sur la croissance (Bianchi, 1997 ; Henderson, Parmeter et Russell, 2008).

De même, la matrice de probabilité de transition estimée pour cinq classes différentes de revenus nationaux (voir tableau 1) révèle un manque général de mobilité au sein de la distribution²¹. En effet, les valeurs de probabilité élevées le long de la diagonale principale suggèrent que les classements relatifs des pays sont rigides (FS 6). En outre, la distribution ergodique associée montre que la masse de

19. Les variables de revenu et de productivité sont toujours exprimées à prix et taux de change constants.

20. Les données relatives au revenu (et à la productivité) sont normalisées en prenant les logarithmes et en soustrayant la moyenne inter-pays afin d'éliminer les tendances communes : $y_{it} = \log Y_{it} - \log \bar{Y}_t$, où Y est la variable originale et $\bar{Y}$ est une moyenne sur l'ensemble des pays. En conséquence, les densités de taux de croissance correspondantes sont centrées sur zéro. La même normalisation est effectuée pour les données au niveau de l'industrie et de l'entreprise, lors de l'étude des propriétés de distribution.

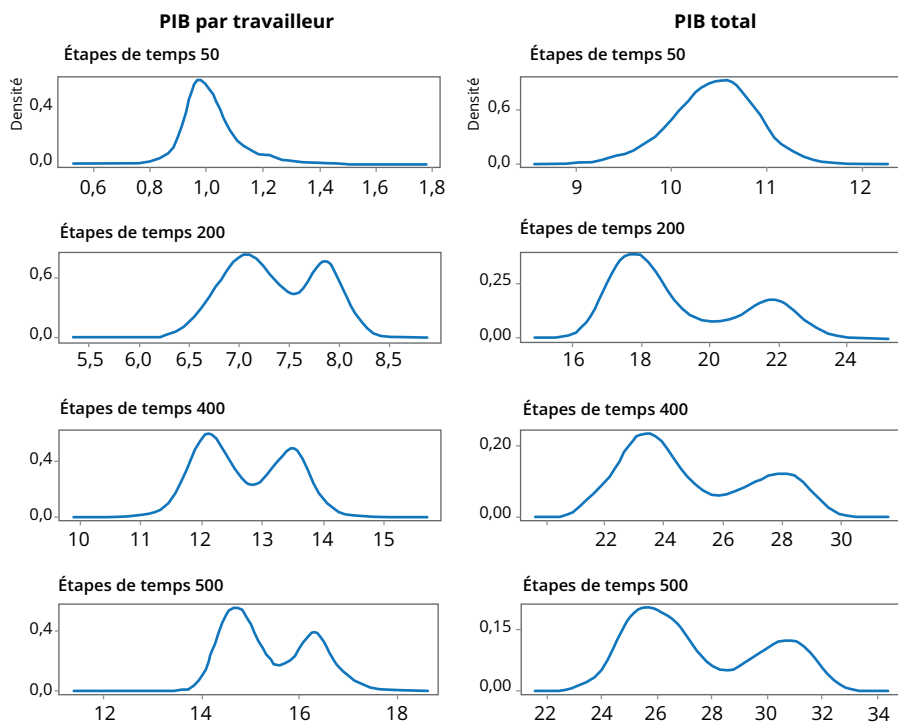
21. Les probabilités sont calculées comme suit : $\hat{p}_{ij} = n_{ij}/n_i$ où n_i est le nombre d'observations dans l'état i et n_{ij} est le nombre de transitions observées de i à j . Cela correspond aux estimateurs du maximum de vraisemblance des probabilités réelles (Norris, 1998).

probabilité tend à se concentrer (asymptotiquement) sur les queues, ce qui indique, une fois de plus, un processus de polarisation en cours.

Examinons maintenant le comportement d'échelle des taux de croissance de la production. En accord avec Castaldi et Dosi (2009), nous trouvons que la volatilité de g (en logs) s'échelonne négativement avec les niveaux de revenu (FS 9), suggérant que les pays pauvres sont sujets à des fluctuations agrégées plus sévères que les pays avancés. La relation positive trouvée entre les taux de croissance et les niveaux de revenu indique plutôt l'existence de rendements croissants dynamiques dans la production (Castaldi et Dosi, 2009).

Les pays ne semblent pas suivre une trajectoire de croissance régulière. Conformément à l'évidence empirique, la corrélation moyenne entre les périodes des taux de croissance des pays est plutôt faible, ce qui suggère que ces taux sont relativement instables (FS 7).

Graphique 2. Évolution de la distribution transversale (regroupement Monte-Carlo)



Source : Dosi, Roventini et Russo (2019).

Tableau 1. Matrice de probabilité de transition en trois étapes et distribution ergodique implicite

N ^{bre} obs.	1	2	3	4	5
5751,28 (213,2393)	0,9325 (0,0033)	0,0663 (0,0032)	0,0011 (0,0001)	0,0001 (0,0000)	0
6601,52 (160,1320)	0,0682 (0,0013)	0,8528 (0,0022)	0,0777 (0,0018)	0,0013 (0,0001)	0
4979,2 (132,6577)	0,0008 (0,0001)	0,1222 (0,0019)	0,7763 (0,0020)	0,0988 (0,0016)	0,0019 (0,0001)
4161,98 (124,6708)	0	0,0022 (0,0002)	0,1252 (0,0024)	0,7689 (0,0029)	0,1037 (0,0017)
8326,02 (83,2227)	0	0,0001 (0,0000)	0,0014 (0,0001)	0,0458 (0,0015)	0,9528 (0,0014)
Ergodique	0,2495 (0,0099)	0,2281 (0,0057)	0,1468 (0,0044)	0,1166 (0,0041)	0,2591 (0,0028)

Notes : Les variables sont normalisées en les divisant par la somme mondiale. Les classes de revenus sont définies comme suit : (1) : $y < 0,5$; (2) : $0,5 < y < 0,75$; (3) : $0,75 < y < 1$; (4) : $1 < y < 1,25$; (5) : $y > 1,25$.

Variable : PIB par travailleur. Les erreurs standards de Monte-Carlo sont entre parenthèses.

Nous étudions ensuite les propriétés statistiques des distributions des taux de croissance de la production. Plus précisément, nous ajustons la famille de densités exponentielles sur la distribution simulée des taux de croissance inter-pays (Bottazzi et Secchi, 2003). Conformément à la preuve empirique (FS 8), le paramètre b estimé est proche de l'unité (voir tableau 2), c'est-à-dire qu'une forme laplacienne, avec des queues beaucoup plus larges que la référence gaussienne, fournit un bon ajustement de la distribution simulée. Des résultats similaires sont également obtenus lorsque l'on considère la distribution des séries temporelles des taux de croissance de la production pour un pays donné. Cela implique à son tour que le processus de croissance de tout pays est caractérisé par des fluctuations endogènes et (plus rarement) des crises profondes (FS 10-11, voir Fagiolo, Napoletano et Roventini, 2008).

Enfin, nous examinons les propriétés de cycle économique des séries temporelles macroéconomiques. Conformément à la preuve empirique (Stock et Watson, 1999), la série tendancielle de l'investissement global est plus volatile que le PIB, tandis que ce dernier fluctue moins que la consommation globale (FS 12). En outre, les corrélations croisées entre les variables macroéconomiques aux fréquences du cycle économique suggèrent que la consommation, l'investissement, l'emploi et la productivité sont procycliques puisqu'ils suivent les fluctuations du PIB (FS 13).

4.2. Changement structurel émergent et hétérogénéité des entreprises

Les modèles macroéconomiques décrits ci-dessus résultent d'une riche dynamique au niveau de l'industrie, façonnée par les activités d'innovation des entreprises et par les processus de sélection du marché.

Tout d'abord, l'évolution des parts de production des industries pour quatre pays choisis au hasard (voir graphique 3a) révèle que le modèle est capable de générer des changements structurels endogènes (FS 14). Il convient de noter qu'au début de la simulation, les économies sont identiques en termes de spécialisation. Cependant, les poids relatifs des industries évoluent au fil du temps en fonction de la spécialisation relative des pays.

La compétitivité dans des secteurs spécifiques repose à son tour sur la compétitivité de leurs entreprises. Il est intéressant de noter que dans certaines économies, les secteurs semblent émerger et décliner rapidement, tandis que d'autres semblent connaître une dynamique plus stable. Cela implique évidemment que les modèles de changement structurel diffèrent également d'un pays à l'autre (McMillan, Rodrik et Verduzco-Gallo, 2014). En outre, tout au long de la simulation, le groupe émergent des pays leaders tend à accumuler des avantages absolus dans la plupart des secteurs (FS 15). Pour souligner ce point, nous présentons dans le graphique 3b l'écart de productivité (à la fin de la simulation) ventilé par industrie entre le sous-ensemble de pays du décile de revenu supérieur et ceux du décile inférieur. L'écart semble significatif dans presque tous les secteurs. Conformément aux conclusions empiriques (Dosi, Pavitt et Soete, 1990), les économies à croissance rapide sont celles qui, au fil du temps, parviennent à développer une avance technologique dans la plupart des activités.

L'hétérogénéité entre les secteurs est également révélée par la distribution des taux de croissance de la production industrielle à l'intérieur des pays. Une fois de plus, on observe un écart important par rapport à la normalité, avec l'apparition de queues épaisses (voir les paramètres estimés de la distribution de Subbotin dans le tableau 2) : différentes industries connaissent des épisodes de croissance soutenue et des contractions brutales (FS 16).

Tableau 2. Estimation des paramètres de la puissance exponentielle à différents niveaux d'agrégation

	b	a	m
PIB par travailleur	1,0171 (0,0056)	0,0248 (0,0002)	-0,0028 (0,0001)
Production	0,9776 (0,0061)	0,0476 (0,0005)	-0,0015 (0,0001)
PIB par travailleur (séries chronologiques)	1,1423 (0,0378)	0,0252 (0,0007)	0,0234 (0,0004)
Production (série chronologique)	1,1102 (0,0307)	0,0513 (0,0011)	0,0276 (0,0007)
Production de l'industrie	0,5791 (0,0026)	0,0135 (0,0002)	-0,0073 (0,0002)
Production des entreprises (regroupement des pays)	1,1435 (0,0151)	0,0926 (0,0013)	-0,0105 (0,0005)
Production des entreprises (mono-industrie)	1,1495 (0,0153)	0,0926 (0,0012)	-0,0105 (0,0005)

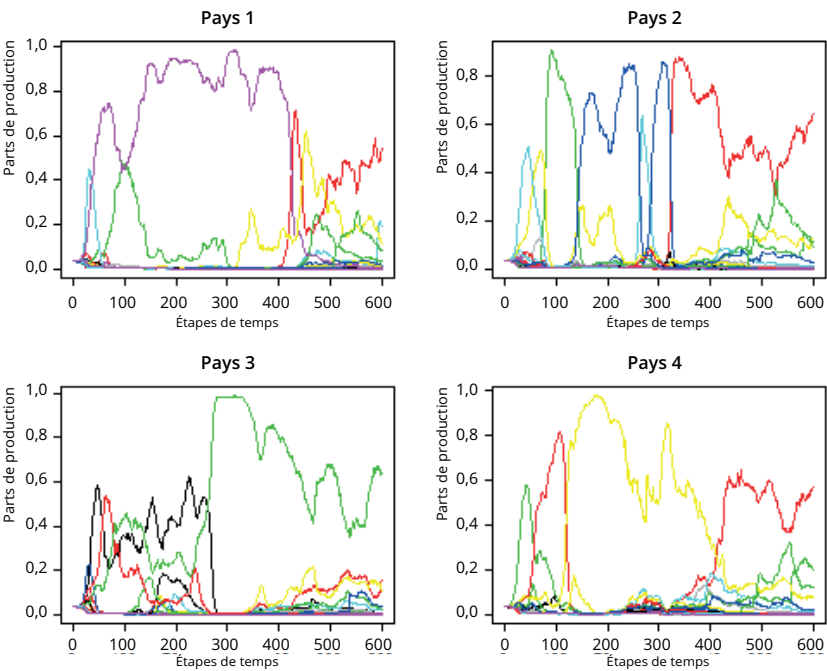
Note : Les erreurs standards de Monte-Carlo sont entre parenthèses.

Comme dans d'autres modèles évolutionnistes, les faits stylisés de la dynamique industrielle résultent des interactions d'entreprises innovantes hétérogènes. Conformément aux données microéconomiques (FS 17), il existe une hétérogénéité persistante de la productivité entre les entreprises. Les écarts de productivité se traduisent par des dynamiques de parts de marché différentes et, finalement, par des tailles d'entreprises très différentes. La distribution de la taille des entreprises est en effet asymétrique (FS 18), ce qui suggère la coexistence d'un petit nombre de grandes entités prospères et de nombreuses petites entreprises. Les distributions des taux de croissance des entreprises présentent une forme de « tente » à queue épaisse (FS 10), semblable à celles observées au niveau de l'industrie et du pays (voir tableau 2). Les processus de croissance en dents de scie au niveau microéconomique ne semblent pas être éliminés par l'agrégation, ce qui suggère l'existence possible d'un mécanisme de croissance « universel » pour les entreprises, les secteurs d'activité et les pays.

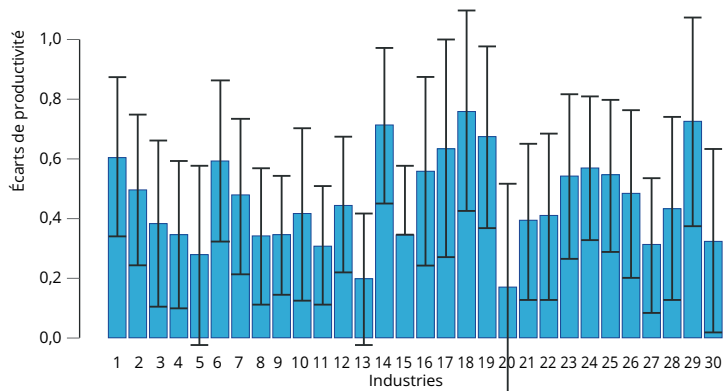
Enfin, le modèle reproduit également certains éléments de preuve empirique sur la dynamique des entreprises et le commerce international. Dans le tableau 3, nous présentons des statistiques de Monte-Carlo sur les parts et les primes des exportateurs.

Graphique 3. Changement structurel et écarts de productivité

a) Évolution des parts de production par industrie



b) Écarts de productivité par industrie entre les leaders et les retardataires



Notes : En haut : évolution des parts de production par industrie (quatre pays sélectionnés de manière aléatoire) ; en bas : écarts de productivité par industrie entre les leaders et les retardataires (les intervalles de confiance de Monte-Carlo à 5 % sont indiqués par des bandes noires ; les leaders et les retardataires sont sélectionnés comme étant respectivement les 10 % de pays les mieux classés et les 10 % de pays les moins bien classés en termes de revenu moyen au cours des 100 dernières étapes).

Source : Dosi, Roventini et Russo (2019).

Les mécanismes de sélection du marché ne permettent qu'à une petite fraction de l'ensemble des entreprises nationales (environ 6,5 %) de pénétrer les marchés étrangers (FS 20). Comme observé dans les données réelles, il existe des primes associées au statut d'exportateur (FS 21), car les exportateurs sont plus productifs, ils sont plus grands en termes de taille et, comme le montre la deuxième ligne du tableau 3, ces caractéristiques persistent également au sein des industries individuelles.

Tableau 3. Parts et primes des exportateurs

	Part des exp. (en %)	Primes à l'exportation		
		Productivité	Emploi	Ventes totales
Au niveau national	6,5975 (0,0775)	1,0834 (0,0015)	1,1890 (0,0061)	1,1698 (0,0039)
Au niveau de l'industrie		1,0262 (0,0003)	1,4135 (0,0127)	1,1621 (0,0039)

Note : Les erreurs standards de Monte-Carlo sont entre parenthèses.

4.3. Les moteurs schumpétériens et kaldoriens de la croissance et de la divergence

Nous avons démontré que le modèle évolutionnaire multi-pays peut rendre compte de la croissance endogène ainsi que d'un riche ensemble de régularités empiriques à différents niveaux d'agrégation. Du côté de l'offre, un moteur endogène de changement technique est ancré dans les activités d'innovation et d'imitation propres à l'entreprise. Du côté de la demande, des mécanismes keynésiens/kaldoriens déterminent endogéniquement la demande globale et sa distribution entre les pays par le biais des écarts/avancées technologiques et des multiplicateurs du commerce extérieur. Il convient de noter que les résultats sont générés sans s'appuyer sur des variables explicatives telles que le « capital humain » ou la « qualité des institutions », ni sur des dotations factorielles différentes, ni sur des conditions d'offre et de demande entre les pays et les secteurs d'activité. Il ne s'agit pas de minimiser ces facteurs, mais de remarquer que les facteurs keynésiens et schumpétériens, souvent négligés dans le débat économique, peuvent fournir des explications convaincantes pour les dynamiques divergentes omniprésentes²².

22. Par exemple, une longue tradition d'études hétérodoxes a souligné que les asymétries technologiques entre les pays représentent la plus grande partie des spécialisations commerciales par rapport à d'autres facteurs généralement cités dans la littérature (Posner, 1961 ; Vernon, 1966 ; Cimoli, 1988 ; Dosi, Pavitt et Soete, 1990 ; Storper, 1992).

L'accumulation et la propagation asymétriques des chocs de productivité et de demande idiosyncrasiques (endogènes) au niveau de l'entreprise produisent en effet la divergence macroéconomique émergente. Au niveau microéconomique, un cycle vertueux dans notre modèle est alimenté par des augmentations idiosyncrasiques de la productivité via l'innovation ou l'imitation qui, si elles ne sont pas compensées par des augmentations de salaires ou par une appréciation du taux de change (deux variables au niveau du système dans notre modèle), augmentent la compétitivité des prix de l'entreprise sur les marchés nationaux et étrangers, ce qui stimule les ventes, les exportations et la production. À son tour, l'augmentation des ventes entraîne une augmentation des dépenses de recherche, ce qui accroît la probabilité de réaliser de nouvelles augmentations de la productivité, et ainsi de suite.

La séquence précédente de rétroaction cumulative se propage au niveau macroéconomique à la fois sur le plan de l'offre et de la demande. Premièrement, la distribution émergente de type Zipf de la taille des entreprises implique que les chocs subis par les plus grandes entreprises ne se dissiperaient pas par agrégation, même si les entreprises étaient caractérisées par des processus stochastiques indépendants, c'est-à-dire l'hypothèse granulaire soutenue par Gabaix (2011)²³. Cependant, dans notre modèle, comme dans la réalité, le processus concurrentiel crée un mécanisme de corrélation puissant dans la dynamique des micro-demandes et des parts de marché (plus d'informations dans Dosi, Pereira et Virgillito, 2016b). La compétitivité différentielle entre les entreprises amplifie son effet via la dynamique du réplicateur, produisant des taux de croissance et de survie différentiels entre les entreprises. Un résultat important de notre exercice de modélisation est que ce processus de réplique s'étend à des pays entiers, car ils sont corrélés par le biais du commerce international et de l'imitation. Il existe toutefois une différence fondamentale entre les entreprises et les pays. Les premières peuvent mourir alors que les seconds ne le peuvent pas, mais comme les pays survivent toujours, ils se développeront selon des trajectoires corrélées (ou anticorrélées). C'est pourquoi nous observons dans notre modèle, caractérisé par des rendements croissants dynamiques et des interdépendances, une tendance à la bimodalité et à la polarisation entre les pays qui

23. En effet, dans Dosi *et al.* (2019a), nous montrons qu'une telle granularité s'applique beaucoup plus aux impulsions de la demande qu'à la relation entre les micro-chocs de productivité et la dynamique du PIB agrégé.

deviennent, relativement parlant, plus pauvres et ceux qui deviennent plus riches (ce qui confirme les modèles discutés par Reinert, 2007).

En général, les interdépendances tendent à générer des co-mouvements entre les unités au niveau microéconomique qui ne seront pas compensés par une moyenne lorsque l'on augmente l'échelle d'observation. Dans le modèle, les interdépendances nationales en matière de productivité sont renforcées par le processus d'entrée des entreprises, car la productivité initiale des nouveaux arrivants est liée à la productivité moyenne du pays. Du côté de la demande, les exportations se traduisent par des impulsions de demande pour l'économie nationale, de sorte qu'un choc de demande externe s'amplifie par le biais d'une augmentation de la production, de l'emploi, des salaires, de la demande, etc. Les chocs de la demande extérieure jouent donc un rôle fondamental dans le renforcement de la réussite technologique des industries nationales. En raison de ces mécanismes de transmission, des divergences auto-renforcées dans les niveaux de productivité et de revenu seront également constatées dans les données agrégées. En outre, conformément à une perspective kaldorienne, une forte croissance de la productivité relative sera également associée à des performances positives en matière d'exportation et à des excédents commerciaux. Les fondements microéconomiques évolutionnistes peuvent en effet produire des cycles kaldoriens de causalité cumulative (voir Kurz et Salvadori, 2010, ainsi que Dosi *et al.*, 1994, et Llerena et Lorentz, 2004).

4.4. Politiques de rattrapage

Les résultats de la simulation montrent l'émergence d'un monde polarisé entre pays leaders et pays retardataires. Dans cette section, nous étudions ce que les pays retardataires peuvent faire pour rattraper les économies développées en évaluant l'impact de différentes politiques comme dans Dosi, Roventini et Russo (2020).

Nous plantons le décor en initialisant le modèle avec la distribution du PIB des pays à deux pics résultant de la dernière étape des simulations analysées dans les sections précédentes²⁴. Notons que les pays en retard présentent un écart de productivité prononcé dans presque

24. Plus précisément, suivant la procédure proposée par Bianchi (1997), nous divisons les pays en fixant un seuil au minimum local du noyau estimé de la densité de croissance entre pays (voir le graphe le plus bas du graphique 2). Par conséquent, tous les pays dont les niveaux de revenus sont supérieurs à ce seuil sont classés comme leaders et *vice-versa*. Pour plus de détails, voir Dosi, Roventini et Russo (2020).

toutes les industries (voir graphique 3). Dans le scénario de référence « business-as-usual » (BAS), dans lequel les pays en développement ont des capacités et des investissements en R et D relativement plus faibles que les leaders et ne mettent en œuvre aucune forme de politique industrielle (voir la paramétrisation dans le tableau A2 en annexe), la polarisation initiale est renforcée, comme le montre la distance croissante entre les deux modes de distribution des revenus (graphique 4). C'est la trajectoire suivie par de nombreux pays en développement qui adhèrent à la doctrine politique de libre marché du « consensus de Washington »²⁵.

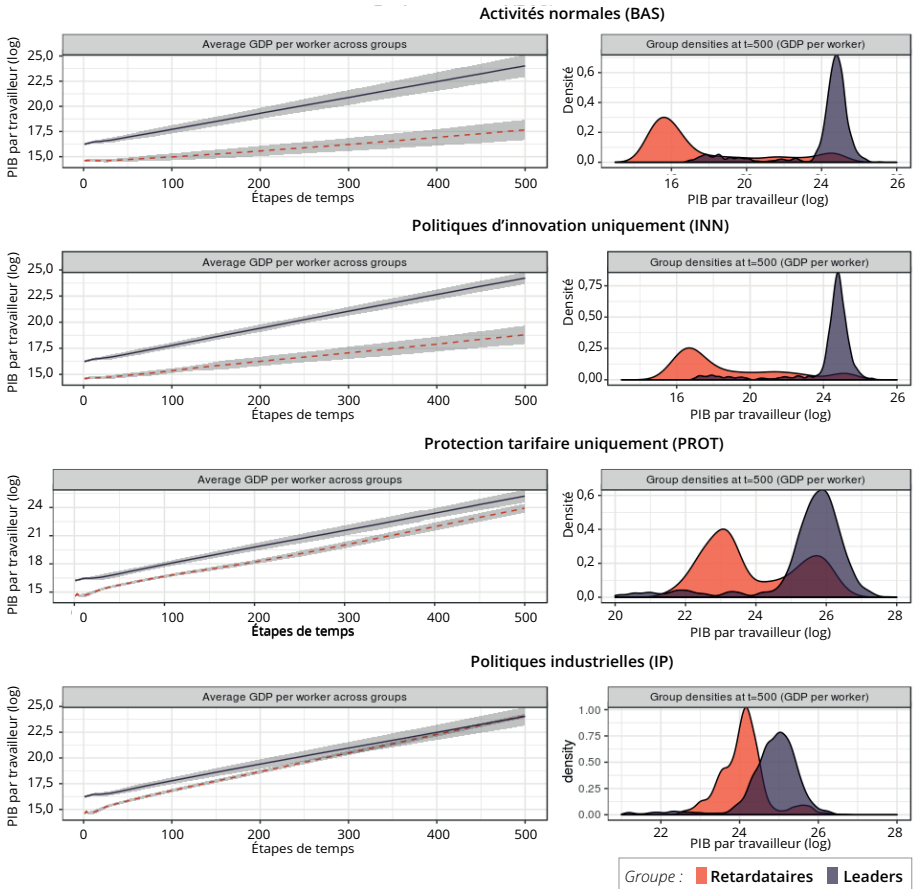
Que peuvent faire les retardataires pour rompre avec ce modèle de divergence ? Trois régimes politiques archétypaux sont présentés, à savoir les politiques industrielles (PI), les politiques d'innovation sans protection tarifaire (INN) et la protection tarifaire uniquement (PROT). Chaque politique est caractérisée par des changements permanents dans les paramètres structurels présentés dans le tableau A2. Le régime de PI vise à imiter l'expérience des pays d'Asie de l'Est qui ont réussi ou, plus tôt, de l'Allemagne et du Japon. Dans ce scénario, l'écart entre les capacités nationales et les investissements en R et D par rapport aux pays leaders a été comblé grâce aux efforts politiques visant à encourager l'accumulation de connaissances, tandis qu'un tarif général est introduit pour permettre aux entreprises locales d'apprendre et de développer leurs propres capacités. Par souci de simplicité, nous supposons que les capacités et les parts d'investissement en R et D augmentent exactement jusqu'au niveau des pays leaders. Dans le cadre INN, les retardataires ne mettent en œuvre que des politiques d'innovation et sont supposés avoir les mêmes capacités que les leaders. Dans le cadre PROT, les retardataires imposent uniquement des droits de douane sans stimuler l'amélioration parallèle des capacités technologiques et des dépenses de R et D.

Les résultats des scénarios IP, INN et PROT sont comparés au scénario BAS, comme le montre le graphique 4. La mise en œuvre de politiques industrielles (IP) entraîne un processus de convergence des économies en retard et un renversement des forces de polarisation. Dans ce scénario, notre modèle est capable de reproduire une dynamique de croissance similaire à celles suivies par les tigres d'Asie de l'Est à partir des années 1970 et, plus tard, par la Chine.

25. À l'inverse, dans un monde de type Solow où la connaissance est un bien public pur (Solow, 1956 ; Arrow, 1962) et peut être librement adoptée par les retardataires, une convergence inconditionnelle entre les pays se produit. Plus de détails dans Dosi, Roventini et Russo (2020).

Graphique 4. Principales expériences politiques

Évolution du PIB moyen par travailleur dans les différents groupes



Note : Évolution du PIB moyen par travailleur dans les différents groupes (graphes de gauche) ; densités de noyau du PIB par travailleur à $t = 500$ (graphes de droite).

Source : Dosi, Roventini et Russo (2020).

Le scénario INN montre que même si les pays ont des paramètres de capacité identiques à l'échelle de l'économie, les mécanismes cumulatifs du modèle permettent aux grands opérateurs historiques des pays leaders de conserver leur avantage concurrentiel sur les petits entrants situés ailleurs. Cela suggère que la protection des industries naissantes est une condition nécessaire au rattrapage.

Lorsque les retardataires se concentrent uniquement sur les politiques protectionnistes (PROT), le processus de convergence est également beaucoup plus faible et, à la fin de la simulation, il existe toujours un écart de revenu positif et significatif entre les deux groupes de pays. Cela rappelle la trajectoire suivie par certains pays d'Amérique latine dans la période d'après-guerre, où les politiques de substitution des importations ont été mises en œuvre avec une forte orientation vers l'intérieur et sans efforts substantiels pour améliorer leurs systèmes d'innovation. Comme le montre notre modèle, une telle focalisation exclusive sur les restrictions commerciales pousse les pays retardataires dans un piège du revenu moyen, dont ils ne parviennent pas à sortir pour atteindre les niveaux de revenu des économies développées. Dans Dosi, Roventini et Russo (2020), nous considérons également un régime de « guerre commerciale » dans lequel les leaders introduisent un tarif de rétorsion identique à celui adopté par les retardataires. Les résultats suggèrent que dans un tel scénario, les leaders comme les retardataires sont moins bien lotis en termes de croissance du PIB par travailleur, car les niveaux inférieurs de la demande mondiale associés à l'adoption de droits de douane par les leaders se traduisent par une baisse des dépenses de R et D et par un ralentissement général de la croissance de la productivité. Nos résultats mettent en évidence les effets négatifs généralisés des politiques protectionnistes généralisées et suggèrent que les pays leaders seraient mieux lotis s'ils ne réagissaient pas aux droits de douane introduits par les retardataires. Cela est cohérent avec l'expérience historique et suggère un impact négatif sur l'économie mondiale des récentes tendances protectionnistes (voir le Royaume-Uni et les États-Unis).

Enfin, nous étudions si les différents degrés de flexibilité du taux de change (voir γ dans l'équation 27) peuvent ou non interagir avec les politiques industrielles (scénario IP). Les résultats de Dosi, Roventini et Russo (2020) montrent que des taux de change plus flexibles n'exercent que des effets positifs négligeables sur l'écart de productivité finale entre les groupes. Dans le même temps, des ajustements plus rapides des taux de change ne semblent pas réduire la dispersion des revenus finaux. Ces résultats suggèrent que, dans l'ensemble, la dynamique des taux de change joue un rôle très limité dans le processus de rattrapage.

5. Conclusions

Cet article a montré que la théorie de la croissance évolutionnaire (Nelson et Winter, 1982 ; Metcalfe et Foster, 2010) peut rendre compte avec succès de la croissance endogène, de la polarisation émergente entre les pays, du changement structurel incessant dans les industries, ainsi que d'un riche ensemble de régularités empiriques observées aux niveaux macro, méso et micro d'agrégation.

La remarquable capacité explicative de la théorie de la croissance évolutionniste repose sur la reconnaissance du fait que l'économie est un système complexe en évolution (voir Kirman, 2010, 2016 ; Rosser, 2011 ; Dosi et Roventini, 2019 ; Dosi, 2023), c'est-à-dire une écologie peuplée d'entreprises, de travailleurs, etc., hétérogènes dont les interactions de marché loin de l'équilibre conduisent à un certain ordre émergent au niveau de l'industrie et du pays, tandis que la structure du système change continuellement. Cela implique que des niveaux d'agrégation plus élevés peuvent conduire à l'émergence de nouveaux phénomènes (par exemple, une croissance auto-entretenu), de nouvelles régularités statistiques (par exemple, des distributions de croissance à deux pics entre pays) et de nouvelles structures (c'est-à-dire des marchés, des industries). Comme *plus, c'est différent* (Anderson, 1972), il est trompeur de réduire le niveau macroéconomique au niveau microéconomique, comme le fait généralement la théorie néoclassique. En même temps, en se concentrant uniquement sur le niveau macroéconomique, on perd de nombreux détails importants sur la manière dont la croissance et le changement structurel sont générés par des processus se produisant à des niveaux d'agrégation inférieurs. C'est pourquoi les théories de la croissance évolutionnaire sont fondées sur des *microfondations génératives*, qui font croître l'économie à partir de la base (Tsfatsion, 2002) en développant des modèles basés sur des agents (Tsfatsion, 2006 ; LeBaron et Tsfatsion, 2008 ; Fagiolo et Roventini, 2017).

En conséquence, le modèle évolutionnaire basé sur les agents (Dosi, Roventini et Russo, 2019 ; 2020) présenté dans cet article rend bien compte de l'émergence de modèles de croissance complexes présentant une forte tendance à la formation de clubs entre les pays. En outre, chaque pays connaît une transformation endogène de sa structure productive au cours du processus de développement. Ces deux aspects sont des résultats émergents de la coévolution des fondements microéconomiques schumpétériens et des mécanismes de propagation de la

croissance agrégée en accord avec la théorie du développement de Kaldor. En effet, au niveau microéconomique, les performances innovantes des entreprises conduisent à l'accumulation de connaissances, à l'augmentation de la production et des exportations qui, à leur tour, déclenchent une transformation structurelle et modifient les modèles de spécialisation. Globalement, cette dynamique conduit à l'émergence de trajectoires de développement vertueuses et vicieuses au niveau de pays entiers. La robustesse du modèle est corroborée par le fait qu'il tient compte d'une longue liste de faits stylisés à différents niveaux d'agrégation.

Les modèles évolutionnaires basés sur les agents peuvent également être utilisés pour fournir des recommandations politiques robustes. Les résultats des simulations montrent que les politiques industrielles (Cimoli, Dosi et Stiglitz, 2009) sont un instrument fondamental pour les pays à revenu faible et intermédiaire afin de stimuler la croissance économique et de rattraper les économies de pointe, ce qui correspond bien à la littérature sur les écarts technologiques (voir par exemple Fagerberg et Verspagen, 2002 ; Cimoli et Porcile, 2013 ; McMillan, Rodrik et Verduzco-Gallo, 2014 ; Lavopa et Szirmai, 2018). À l'opposé, un scénario de libre marché de type « consensus de Washington » présente un processus de croissance divergente implacable avec des écarts de productivité croissants pour les retardataires. Ces résultats découlent de l'incapacité des entreprises des économies en développement à absorber les connaissances technologiques générées à l'étranger et de l'absence de protection des industries locales naissantes. Les politiques industrielles – semblables à celles mises en œuvre par les économies d'Asie de l'Est et la Chine – favorisent le développement des capacités technologiques nationales. Les droits de douane seuls sont insuffisants et les retardataires restent enfermés dans un piège de revenu moyen, comme cela s'est produit historiquement pour de nombreux pays d'Amérique du Sud. Toujours selon les données historiques, un terrain de jeu inégal avec des capacités asymétriques pour les pays en développement de nourrir leurs industries locales semble être un scénario gagnant-gagnant pour l'économie mondiale dans son ensemble, comme cela a été le cas pendant la longue phase de « convergence conditionnelle » avant la Première Guerre mondiale.

En raison de contraintes d'espace, cet article n'a pas suffisamment exploré les connexions multiformes entre les cycles économiques, les crises et la croissance économique résultant de la coévolution des

moteurs et des modèles schumpétériens de changement technologique et de croissance, et des mécanismes keynésiens de coordination entre une multitude d'agents économiques égoïstes au sein et entre les marchés²⁶. Cela est pertinent car un nombre croissant d'études empiriques (Cerra, Fatás et Saxena, 2023) ont montré que l'hystérésis est un phénomène omniprésent et que les récessions peuvent laisser des traces durables dans l'économie. Le modèle évolutionnaire croisant Schumpeter et Keynes (Dosi, Fagiolo et Roventini, 2010 ; Dosi *et al.*, 2016 ; 2017) nous permet d'aborder cette question en couplant l'innovation endogène et les processus de diffusion technologique avec les cycles économiques émergents et les crises dues aux défaillances de coordination découlant des décisions d'investissement des entreprises. Le modèle montre que les politiques budgétaires keynésiennes sont une condition nécessaire à la croissance, même pendant les périodes de changement technologique rapide (Dosi, Fagiolo et Roventini, 2010), et qu'elles sont surtout nécessaires lorsque les inégalités de revenus sont élevées (Dosi *et al.*, 2013 ; 2015). Les politiques keynésiennes et schumpétériennes interagissent également avec les institutions du marché du travail : l'hystérésis est plus susceptible d'émerger dans les régimes de marché du travail flexibles (Dosi *et al.*, 2018) et lorsque des politiques d'austérité budgétaire sont en place (Dosi *et al.*, 2019b).

Compte tenu des résultats remarquables obtenus par l'économie évolutionniste, comment se situe-t-elle par rapport à d'autres théories alternatives de la croissance ? Il existe certainement des complémentarités fructueuses (voir la discussion dans Dosi et Roventini, 2017 ; 2019) à partir du rejet des fondements de la théorie néoclassique de la croissance, à savoir la maximisation de l'utilité et du profit, la rationalité olympique, la compensation des marchés, l'équilibre, ainsi que la fiction de l'agent représentatif. De plus, ces paradigmes théoriques sont véritablement enracinés dans les travaux des économistes classiques – Smith, Marx, Ricardo, Keynes, Schumpeter – et ils partagent une vision interdisciplinaire du processus de croissance économique, s'inspirant d'autres disciplines telles que l'histoire économique et les sciences politiques, au lieu de réduire de manière hégémonique les phénomènes sociaux à des modèles dont les mathématiques fantai-

26. Un autre sujet de recherche exploratoire concerne l'étude de la dynamique couplée du climat et de l'économie. En effet, un changement climatique non atténué entraîne des impacts catastrophiques qui peuvent stopper le processus même de la croissance économique, comme le montrent les modèles évolutifs d'évaluation intégrée de Lamperti *et al.* (2018 ; 2020).

sistes sont souvent inversement proportionnelles à leur contenu original. Sur le plan politique, à partir de perspectives différentes, les théories alternatives de la croissance aboutissent à des conclusions politiques similaires, qui attribuent au gouvernement et aux politiques industrielles un rôle fondamental dans la promotion de la croissance et de la convergence technologique des pays en retard.

La différence la plus pertinente entre l'économie évolutionniste et les autres théories alternatives de la croissance concerne les *fondements microéconomiques*, que ces théories écartent souvent par leur rejet de l'individualisme méthodologique. Cela est certainement souhaitable lorsqu'il s'agit des microfondations pathétiques des modèles néoclassiques, qui compriment la richesse de la macroéconomie dans le comportement optimal d'un agent représentatif fictif. Mais une telle « anthropomorphisation » ne se produit pas dans les modèles évolutionnistes basés sur les agents, dans lesquels les fondements microéconomiques sont nécessaires pour étudier comment les interactions d'une multitude d'agents hétérogènes peuvent conduire à l'émergence d'une croissance économique, d'un changement structurel et d'autres phénomènes macroéconomiques. En fait, il n'y a pas d'isomorphisme entre le micro et le macro dans les théories de la croissance évolutionnaire, mais les modèles peuvent être macrofondés (Kirman, 2016 ; Dosi et Roventini, 2019) : les comportements micro des entreprises peuvent être contraints par des variables d'état au niveau du système, telles que le PIB ou la balance des paiements. La *macro-fondation du micro* est en effet une voie prometteuse de recherche commune entre l'économie évolutionniste et d'autres théories alternatives de la croissance.

Références

- Abramovitz M., 1986, « Catching up, forging ahead, and falling behind », *The Journal of Economic History*, vol. 46, n° 2, pp. 385-406.
- Aghion P. et P. Howitt, 1992, « A model of growth through creative destruction », *Econometrica*, vol. 117, pp. 323-351.
- Albert R. et A. L. Barabási, 2002, « Statistical mechanics of complex networks », *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, pp. 47-97.
- Allen R. C., 2001, « The great divergence in European wages and prices from the Middle Ages to the First World War », *Explorations in Economic History*, vol. 38, n° 4, pp. 411-447.

- Anderson J. E. et E. Van Wincoop, 2004, « Trade costs », *Journal of Economic Literature*, vol. 42, n° 3, pp. 691-751.
- Anderson P. W., 1972, « More is different », *Science*, vol. 177, n° 4047, pp. 393-396.
- Arrow K., 1962, « Economic welfare and the allocation of resources for invention », in : National Bureau of Economic Research (ed.), *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*, Princeton, Princeton University Press, pp. 609-626.
- Bairoch P., 1981, « The main trends in national economic disparities since the Industrial Revolution », in : P. Bairoch et M. Lévy-Leboyer (eds), *Disparities in Economic Development since the Industrial Revolution*, Berlin, Springer, pp. 3-17.
- Bartelsman E. J. et M. Doms, 2000, « Understanding productivity: Lessons from longitudinal micro data », *Journal of Economic Literature*, vol. 38, n° 3, pp. 569-594.
- Bartelsman E. J., S. Scarpetta et F. Schivardi, 2005, « Comparative analysis of firm demographics and survival: Evidence from micro-level sources in OECD countries », *Industrial and Corporate Change*, vol. 14, n° 3, pp. 365-391.
- Bernard A. B. et S. N. Durlauf, 1991, *Convergence of International Output Movements*, Washington D.C., National Bureau of Economic Research.
- Bernard A. B. et J. B. Jensen, 1999, « Exceptional exporter performance: Cause, effect, or both? », *Journal of International Economics*, vol. 47, n° 1, pp. 1-25.
- Bernard A. B., J. B. Jensen, S. J. Redding et P. K. Schott, 2012, « The empirics of firm heterogeneity and international trade », *Annual Review of Economics*, vol. 4, n° 1, pp. 283-313.
- Bianchi M., 1997, « Testing for convergence: Evidence from non-parametric multimodality tests », *Journal of Applied Econometrics*, vol. 12, n° 4, pp. 393-409.
- Bordo M. D., A. M. Taylor et J. G. Williamson (eds), 2007, *Globalization in Historical Perspectives*, Chicago, The University of Chicago Press.
- Bottazzi G. et A. Secchi, 2003, « Common properties and sectoral specificities in the dynamics of US manufacturing companies », *Review of Industrial Organization*, vol. 23, n° 3-4, pp. 217-232.
- Bottazzi G. et A. Secchi, 2006, « Explaining the distribution of firm growth rates », *The RAND Journal of Economics*, vol. 37, n° 2, pp. 235-256.
- Brock W. A. et S. N. Durlauf, 2001, « Interactions-based models », in : J. J. Heckman et E. Leamer (eds), *Handbook of Econometrics. Volume 5*, Amsterdam, North-Holland, pp. 3297-3380.
- Burns A. F. et W. C. Mitchell, 1946, *Measuring Business Cycles*, Washington D.C., National Bureau of Economic Research.

- Caiani A., E. Catullo et M. Gallegati, 2019, « The effects of alternative wage regimes in a monetary union: A multi-country agent based-stock flow consistent model », *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 162, pp. 389-416.
- Caiani A., A. Russo et M. Gallegati, 2019, « Does inequality hamper innovation and growth? An AB-SFC analysis », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 29, pp. 177-228.
- Canning D., L. A. N. Amaral, Y. Lee, M. Meyer et H. E. Stanley, 1998, « Scaling the volatility of GDP growth rates », *Economics Letters*, vol. 60, n° 3, pp. 335-341.
- Castaldi C. et G. Dosi, 2009, « The patterns of output growth of firms and countries: Scale invariances and scale specificities », *Empirical Economics*, vol. 37, n° 3, pp. 475-495.
- Castaldi C. et S. Sapio, 2008, « Growing like mushrooms? Sectoral evidence from four large European economies », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 18, n° 3-4, pp. 509-527.
- Caves R. E., 1998, « Industrial organization and new findings on the turnover and mobility of firms », *Journal of Economic Literature*, vol. 36, n° 4, pp. 1947-1982.
- Cerra V., A. Fatás et S. C. Saxena, 2023, « Hysteresis and business cycles », *Journal of Economic Literature*, vol. 61, n° 1, pp. 181-225.
- Chiaromonte F. et G. Dosi, 1993, « Heterogeneity, competition, and macroeconomic dynamics », *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 4, n° 1, pp. 39-63.
- Ciarli T., A. Lorentz, M. Savona et M. Valente, 2010, « The effect of consumption and production structure on growth and distribution: A micro to macro model », *Metroeconomica*, vol. 61, n° 1, pp. 180-218.
- Ciarli T., A. Lorentz, M. Valente et M. Savona, 2018, « Structural changes and growth regimes », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 29, pp. 1-58.
- Cimoli M., 1988, « Technological gaps and institutional asymmetries in a north-south model with a continuum of goods », *Metroeconomica*, vol. 39, n° 3, pp. 245-274.
- Cimoli M. et G. Dosi, 1995, « Technological paradigms, patterns of learning and development: An introductory roadmap », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 5, n° 3, pp. 243-268.
- Cimoli M., G. Dosi et J. Stiglitz, 2009, *Industrial Policy and Development: The Political Economy of Capabilities Accumulation*, Oxford, Oxford University Press.
- Cimoli M. et G. Porcile, 2013, « Technology, structural change and BOP-constrained growth: A structuralist toolbox », *Cambridge Journal of Economics*, vol. 38, n° 1, pp. 215-237.

- Cipolla C. M., 1994, *Before the Industrial Revolution: European Society and Economy, 1000-1700*, New York, W. W. Norton & Company.
- Cohen W. M. et D. A. Levinthal, 1990, « Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation », *Administrative Science Quarterly*, vol. 35, n° 1, pp. 128-152.
- Cornwall J., 1977, *Modern Capitalism: Its Growth and Transformation*, Londres, Martin Robertson.
- Cyert R. M. et J. G. March, 1992, *A Behavioral Theory of the Firm*, Oxford, Blackwell Business, 2^e éd.
- Dosi G., 1988, « Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation », *Journal of Economic Literature*, vol. 26, n° 3, pp. 1120-1171.
- Dosi G., 2007, « Statistical regularities in the evolution of industries: A guide through some evidence and challenges for the theory », in : F. Malerba et S. Brusoni (eds), *Perspectives on Innovation*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 153-186.
- Dosi G., 2023, *The Foundations of Complex Evolving Economies*, Oxford, Oxford University Press.
- Dosi G. et M. Egidi, 1991, « Substantive and procedural uncertainty », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 1, n° 2, pp. 145-168.
- Dosi G., S. Fabiani, R. Aversi et M. Meacci, 1994, « The dynamics of international differentiation: A multi-country evolutionary model », *Industrial and Corporate Change*, vol. 3, n° 1, pp. 225-242.
- Dosi G., G. Fagiolo, M. Napoletano et A. Roventini, 2013, « Income distribution, credit and fiscal policies in an agent-based Keynesian model », *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 37, n° 8, pp. 1598-1625.
- Dosi G., G. Fagiolo, M. Napoletano, A. Roventini et T. Treibich, 2015, « Fiscal and monetary policies in complex evolving economies », *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 52, pp. 166-189.
- Dosi G., G. Fagiolo et A. Roventini, 2006, « An evolutionary model of endogenous business cycles », *Computational Economics*, vol. 27, n° 1, pp. 3-34.
- Dosi G., G. Fagiolo et A. Roventini, 2010, « Schumpeter meeting Keynes: A policy-friendly model of endogenous growth and business cycles », *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 34, n° 9, pp. 1748-1767.
- Dosi G., C. Freeman et S. Fabiani, 1994, « The process of economic development: Introducing some stylized facts and theories on technologies, firms and institutions », *Industrial and Corporate Change*, vol. 3, n° 1, pp. 1-45.
- Dosi G., C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg et L. Soete (eds), 1988, *Technical Change and Economic Theory*, Londres, Pinter.

- Dosi G., O. Marsili, L. Orsenigo et R. Salvatore, 1995, « Learning, market selection and the evolution of industrial structures », *Small Business Economics*, vol. 7, n° 6, pp. 411-436.
- Dosi G., M. Napoletano, A. Roventini, J. E. Stiglitz et T. Treibich, 2020, « Rational heuristics? Expectations and behaviors in evolving economies with heterogenous interacting agents », *Economic Inquiry*, vol. 58, n° 3, pp. 1487-1516.
- Dosi G., M. Napoletano, A. Roventini et T. Treibich, 2016, « Micro and macro policies in Keynes+Schumpeter evolutionary models », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 27, pp. 63-90.
- Dosi G., M. Napoletano, A. Roventini et T. Treibich, 2019a, « Debunking the granular origins of aggregate fluctuations: From real business cycles back to Keynes », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 29, pp. 67-90.
- Dosi G. et R. R. Nelson, 2010, « Technical change and industrial dynamics as evolutionary processes », in : B. H. Hall et N. Rosenberg (eds), *Handbook of the Economics of Innovation. Volume 1*, Amsterdam, North-Holland, pp. 51-127.
- Dosi G., R. R. Nelson et S. Winter, 2001, *The Nature and Dynamics of Organizational Capabilities*, Oxford, Oxford University Press.
- Dosi G., K. Pavitt et L. Soete, 1990, *The Economics of Technical Change and International Trade*, Pise, LEM Book Series.
- Dosi G., M. C. Pereira, A. Roventini et M. E. Virgillito, 2017, « When more flexibility yields more fragility: The microfoundations of Keynesian aggregate unemployment », *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 81, pp. 162-186.
- Dosi G., M. C. Pereira, A. Roventini et M. E. Virgillito, 2018, « Causes and consequences of hysteresis: Aggregate demand, productivity and employment », *Industrial and Corporate Change*, vol. 27, n° 6, pp. 1015-1044.
- Dosi G., M. C. Pereira, M. C., A. Roventini et M. E. Virgillito, 2019b, « What if supply-side policies are not enough? The perverse interaction of flexibility and austerity », *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 162, pp. 360-388.
- Dosi G., M. C. Pereira, A. Roventini et M. E. Virgillito, 2022, « Technological paradigms, labour creation and destruction in a multi-sector agent-based model », *Research Policy*, vol. 51, n° 10, art. 104565.
- Dosi G., M. C. Pereira et M. E. Virgillito, 2016, « The footprint of evolutionary processes of learning and selection upon the statistical properties of industrial dynamics », *Industrial and Corporate Change*, vol. 26, n° 2, pp. 187-210.
- Dosi G. et A. Roventini, 2017, « Agent-based macroeconomics and classical political economy: Some Italian roots », *Italian Economic Journal*, vol. 3, n° 1, pp. 261-283.

- Dosi G. et A. Roventini, 2019, « More is different... and complex! The case for agent-based macroeconomics », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 29, n° 1, pp. 1-37.
- Dosi G., A. Roventini et E. Russo, 2019, « Endogenous growth and global divergence in a multicountry agent-based model », *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 101, pp. 101-129.
- Dosi G., A. Roventini et E. Russo, 2020, « Public policies and the art of catching up: Matching the historical evidence with a multicountry agent-based model », *Industrial and Corporate Change*, vol. 30, n° 4, pp. 1011-1036.
- Dosi G. et M. E. Virgillito, 2021, « In order to stand up you must keep cycling: Change and coordination in complex evolving economies », *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 56, pp. 353-364.
- Dosi G. et S. G. Winter, 2002, « Interpreting economic change: Evolution, structures and games », in : M. Augier et J. March (eds), *The Economics of Choice, Change, and Organizations: Essays in Memory of Richard M. Cyert*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing.
- Durlauf S. N. et P. A. Johnson, 1995, « Multiple regimes and cross-country growth behaviour », *Journal of Applied Econometrics*, vol. 10, n° 4, pp. 365-384.
- Durlauf S. N., P. A. Johnson et J. R. W. Temple, 2005, « Growth econometrics », in : P. Aghion et S. N. Durlauf (eds), *Handbook of Economic Growth. Volume 1A*, Amsterdam, North-Holland, pp. 555-677.
- Easterly W., M. Kremer, L. Pritchett et L. H. Summers, 1993, « Good policy or good luck? », *Journal of Monetary Economics*, vol. 32, n° 3, pp. 459-483.
- Fagerberg J., 1994, « Technology and international differences in growth rates », *Journal of Economic Literature*, vol. 32, n° 3, pp. 1147-1175.
- Fagerberg J. et M. M. Godinho, 2005, « Innovation and catching-up », in : J. Fagerberg et D. C. Mowery (eds), *The Oxford Handbook of Innovation*, New York, Oxford University Press, pp. 514-543.
- Fagerberg J. et B. Verspagen, 2002, « Technology-gaps, innovation-diffusion and transformation: An evolutionary interpretation », *Research Policy*, vol. 31, n° 8, pp. 1291-1304.
- Fagiolo G. et G. Dosi, 2003, « Exploitation, exploration and innovation in a model of endogenous growth with locally interacting agents », *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 14, pp. 237-273.
- Fagiolo G., M. Guerini, F. Lamperti, A. Moneta et A. Roventini, 2019, « Validation of agent-based models in economics and finance », in : C. Beisbart et N. J. Saam (eds), *Computer Simulation Validation: Fundamental Concepts, Methodological Frameworks, and Philosophical Perspectives*, Berlin, Springer, pp. 763-787.

- Fagiolo G., M. Napoletano et A. Roventini, 2008, « Are output growth-rate distributions fat-tailed? Some evidence from OECD countries », *Journal of Applied Econometrics*, vol. 23, n° 5, pp. 639-669.
- Fagiolo G. et A. Roventini, 2017, « Macroeconomic policy in DSGE and agent-based models redux: New developments and challenges ahead », *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, vol. 20, n° 1.
- Freeman C. et L. Soete, 1997, *The Economics of Industrial Innovation*, Cambridge (Mass.), The MIT Press.
- Gabaix X., 2011, « The granular origins of aggregate fluctuations », *Econometrica*, vol. 79, n° 3, pp. 733-772.
- Geroski P. A., 1995, « What do we know about entry? », *International Journal of Industrial Organization*, vol. 13, n° 4, pp. 421-440.
- Gigerenzer G., 2007, *Gut Feelings: The Intelligence of the Unconscious*, New York, Viking.
- Gigerenzer G. et H. Brighton, 2009, « Homo heuristicus: Why biased minds make better inferences », *Topics in Cognitive Science*, vol. 1, n° 1, pp. 107-143.
- Griffith R., S. Redding et J. Van Reenen, 2003, « R&D and absorptive capacity: Theory and empirical evidence », *Scandinavian Journal of Economics*, vol. 105, n° 1, pp. 99-118.
- Hausmann R., L. Pritchett et D. Rodrik, 2005, « Growth accelerations », *Journal of Economic Growth*, vol. 10, n° 4, pp. 303-329.
- Hausmann R. et D. Rodrik, 2003, « Economic development as self-discovery », *Journal of Development Economics*, vol. 72, n° 2, pp. 603-633.
- Henderson D. J., C. F. Parmeter et R. R. Russell, 2008, « Modes, weighted modes, and calibrated modes: Evidence of clustering using modality tests », *Journal of Applied Econometrics*, vol. 23, n° 5, pp. 607-638.
- Jones C. I., 2016, « The facts of economic growth », in : J. B. Taylor et H. Uhlig (eds), *Handbook of Macroeconomics. Volume 2*, Amsterdam, Elsevier, pp. 3-69.
- Kaldor N., 1957, « A model of economic growth », *The Economic Journal*, vol. 67, n° 268, pp. 591-624.
- Kaldor N., 1967, *Strategic Factors in Economic Development*, Ithaca, New York State School of Industrial and Labor Relations.
- Keynes J. M., 1936, *The General Theory of Employment, Interest, and Money*, New York, Prometheus Books.
- Kirman A. P., 1992, « Whom or what does the representative individual represent? », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 6, n° 2, pp. 117-136.
- Kirman A. P., 2010, *Complex Economics: Individual and Collective Rationality*, Londres, Routledge.
- Kirman A. P., 2014, « Is it rational to have rational expectations? », *Mind and Society*, vol. 13, pp. 29-48.

- Kirman A. P., 2016, « Ants and nonoptimal self-organization: Lessons for macroeconomics », *Macroeconomic Dynamics*, vol. 20, pp. 601-621.
- Kirman A. P. et Dosi G., 2023, « Markets and their organization », in : G. Dosi (ed.), *The Foundations of Complex Evolving Economies. Part One: Innovation, Organization, and Industrial Dynamics*, Oxford, Oxford University Press, pp. 443-511.
- Knight F., 1921, *Risk, Uncertainty, and Profits*, Chicago, The Chicago University Press.
- Kurz H. D. et N. Salvadori, 2010, « The post-Keynesian theories of growth and distribution: A survey », in : M. Setterfield (ed.), *Handbook of Alternative Theories of Economic Growth*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing, chap. 4.
- Kuznets S., 1966, *Modern Economic Growth: Rate, Structure, and Spread*, New Haven, Yale University Press.
- Lamperti F., G. Dosi, M. Napoletano, A. Roventini et A. Sapio, 2018, « Faraway, so close: Coupled climate and economic dynamics in an agent-based integrated assessment model », *Ecological Economics*, vol. 150, pp. 315-339.
- Lamperti F., G. Dosi, M. Napoletano, A. Roventini et A. Sapio, 2020, « Climate change and green transitions in an agent-based integrated assessment model », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 153, art. 119806.
- Lamperti F. et C. E. Mattei, 2018, « Going up and down: Rethinking the empirics of growth in the developing and newly industrialized world », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 28, pp. 749-784.
- Landes D. S., 1969, *The Unbound Prometheus: Technological Change and Development in Western Europe from 1750 to the Present*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Lavopa A. et A. Szirmai, 2018, « Structural modernisation and development traps: An empirical approach », *World Development*, vol. 112, pp. 59-73.
- LeBaron B. et L. Tesfatsion, 2008, « Modeling macroeconomies as open-ended dynamic systems of interacting agents », *The American Economic Review*, vol. 98, n° 2, pp. 246-250.
- Lewis W. A., 1954, « Economic development with unlimited supplies of labour », *The Manchester School*, vol. 22, n° 2, pp. 139-191.
- Llerena P. et A. Lorentz, 2004, « Cumulative causation and evolutionary micro-founded technical change », *Revue économique*, vol. 55, n° 6, pp. 1191-1214.
- Lorentz A., 2015, « Structural change, sectoral specialisation and growth rate differences in an evolutionary growth model with demand shocks », *Journal of Innovation Economics & Management*, n° 16, pp. 217-248.

- Lorentz A., T. Ciarli, M. Savona et M. Valente, 2016, « The effect of demand-driven structural transformations on growth and technological change », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 26, n° 1, pp. 219-246.
- McCombie J. S. L. et A. P. Thirlwall, 1994, *Economic Growth and the Balance-of-Payments Constraint*, Basingstoke, Palgrave Macmillan.
- McMillan M., D. Rodrik et Í. Verduzco-Gallo, 2014, « Globalization, structural change, and productivity growth, with an update on Africa », *World Development*, vol. 63, n° 1, pp. 11-32.
- Maddison A., 2010, « Statistics on world population, GDP and per capita GDP, 1-2008 AD », Groningue, Groningen Growth and Development Centre, University of Groningen.
- Metcalfe J. S., 1998, *Evolutionary Economics and Creative Destruction*, Londres, Routledge.
- Metcalfe J. S. et J. Foster, 2010, « Evolutionary growth theory », in : M. Setterfield (ed.), *Handbook of Alternative Theories of Economic Growth*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing, chap. 3.
- Metcalfe J. S. et R. Ramlogan, 2006, « Restless capitalism: A complexity perspective on modern capitalist economies », in : E. Garnsey et J. McGlade (eds), *Complexity and Evolution*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing.
- Montobbio F., 2002, « Un modèle évolutionnaire de croissance industrielle et de changement structurel », *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 13, n° 4, pp. 387-414.
- Myrdal G., 1957, *Economic Theory and Under-Developed Regions*, Londres, Duckworth Books.
- Napoletano M., A. Roventini et S. Sapio, 2006, « Are business cycles all alike? A bandpass filter analysis of the Italian and US cycles », *Rivista Italiana degli Economisti*, vol. 11, n° 1, pp. 87-118.
- Nelson R. et S. Winter, 1982, *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press.
- Norris J. R., 1998, *Markov Chains*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Posner M. V., 1961, « International trade and technical change », *Oxford Economic Papers*, vol. 13, n° 3, pp. 323-341.
- Pritchett L., 2000, « Understanding patterns of economic growth: Searching for hills among plateaus, mountains, and plains », *The World Bank Economic Review*, vol. 14, n° 2, pp. 221-250.
- Quah D. T., 1993, « Empirical cross-section dynamics in economic growth », *European Economic Review*, vol. 37, n° 2-3, pp. 426-434.
- Quah D. T., 1996, « Twin peaks: Growth and convergence in models of distribution dynamics », *The Economic Journal*, vol. 106, n° 437, pp. 1045-1055.

- Quah D. T., 1997, « Empirics for growth and distribution: Stratification, polarization, and convergence clubs », *Journal of Economic Growth*, vol. 2, n° 1, pp. 27-59.
- Reinert E. S., 2007, *How Rich Countries Got Rich... and Why Poor Countries Stay Poor*, New York, PublicAffairs.
- Reinert E. S., 2009, « Emulation vs. comparative advantage: Competing and complementary principles in the history of economic policy », in : M. Cimoli, G. Dosi et J. E. Stiglitz (eds), *Industrial Policy and Development: The Political Economy of Capabilities Accumulation*, Oxford, Oxford University Press, pp. 79-106.
- Rodrik D., 1999, « Where did all the growth go? External shocks, social conflict, and growth collapses », *Journal of Economic Growth*, vol. 4, n° 4, pp. 385-412.
- Romer P. M., 1990, « Endogenous technological change », *Journal of Political Economy*, vol. 98, n° 5, pp. S71-102.
- Rosser B. J., 2011, *Complex Evolutionary Dynamics in Urban-Regional and Ecologic-Economic Systems: From Catastrophe to Chaos and Beyond*, New York, Springer.
- Sala-i Martin X. X., 1996, « The classical approach to convergence analysis », *The Economic Journal*, vol. 106, n° 437, pp. 1019-1036.
- Saviotti P. P. et A. Pyka, 2004, « Economic development by the creation of new sectors », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 14, pp. 1-35.
- Saviotti P. P. et A. Pyka, 2008, « Product variety, competition and economic growth », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 18, p. 323-347.
- Silverberg G., G. Dosi et L. Orsenigo, 1988, « Innovation, diversity and diffusion: A self-organisation model », *The Economic Journal*, vol. 98, n° 393, pp. 1032-1054.
- Silverberg G. et D. Lehnert, 1994, « Growth fluctuations in an evolutionary model of creative destruction », in : G. Silverberg et L. Soete (eds), *The Economics of Growth and Technical Change: Technologies, Nations, Agents*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing, pp. 74-116.
- Silverberg G. et B. Verspagen, 1994, « Collective learning, innovation and growth in a boundedly rational, evolutionary world », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 4, n° 3, pp. 207-226.
- Silverberg G. et B. Verspagen, 1995, « An evolutionary model of long term cyclical variations of catching up and falling behind », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 5, n° 3, pp. 209-227.
- Simon H. A., 1955, « A behavioral model of rational choice », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 69, pp. 99-118.
- Simon H. A., 1959, « Theories of decision-making in economics and behavioral science », *The American Economic Review*, vol. 49, pp. 253-283.

- Simon H. A., 1977, *An Empirically Based Microeconomics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Smith A., 1776, *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, Londres, W. Strahan and T. Cadell.
- Solow R. M., 1956, « A contribution to the theory of economic growth », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, n° 1, pp. 65-94.
- Solow R. M., 2005, « Reflections on growth theory », in : P. Aghion et S. N. Durlauf (eds), *Handbook of Economic Growth. Volume 1A*, Amsterdam, North-Holland, pp. 3-10.
- Stiglitz J. E., 2011, « Rethinking macroeconomics: What failed, and how to repair it », *Journal of the European Economic Association*, vol. 9, n° 4, pp. 591-645.
- Stiglitz J. E., 2015, « Reconstructing macroeconomic theory to manage economic policy », in : J. Le Cacheux et É. Laurent (eds), *Fruitful Economics: Papers in Honor of and by Jean-Paul Fitoussi*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, pp. 20-56.
- Stock J. et M. Watson, 1999, *Business Cycle Fluctuations in US Macroeconomic Time Series*, Amsterdam, Elsevier, pp. 3-64.
- Storper M., 1992, « The limits to globalization: Technology districts and international trade », *Economic Geography*, vol. 68, n° 1, pp. 60-93.
- Syversen C., 2011, « What determines productivity? », *Journal of Economic Literature*, vol. 49, n° 2, pp. 326-365.
- Tesfatsion L., 2002, « Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up », *Artificial Life*, vol. 8, n° 1, pp. 55-82.
- Tesfatsion L., 2006, « Ace: A constructive approach to economic theory », in : L. Tesfatsion et K. Judd (eds), *Handbook of Computational Economics II: Agent-Based Computational Economics*, Amsterdam, North-Holland.
- Thirlwall A. P., 1979, « The balance of payments constraint as an explanation of the international growth rate differences », *PSL Quarterly Review*, vol. 32, n° 128, pp. 429-438.
- Vernon R., 1966, « International investment and international trade in the product cycle », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 80, n° 2, pp. 190-207.
- Verspagen B., 1992, *Uneven Growth between Interdependent Economies: An Evolutionary View on Technology Gaps, Trade and Growth*, thèse de doctorat, Université de Maastricht.

ANNEXE

Valeurs des paramètres

Tableau A1. Paramétrage de l'indice de référence

Description	Symbole	Valeur
Nombre de pays	N	60
Nombre d'industries	M	30
Nombre d'entreprises (par branche)	S	20
Parts de la demande sectorielle	d_h	1/30
Ratio capital-production	B	3
Paramètre d'ajustement de la majoration	ν	0,04
Propension à investir dans la R et D	ρ	0,04
Paramètre d'affectation de la R et D	λ	0,5
Capacités de recherche des entreprises	$\xi_{1,2}$	0,08
Limite supérieure des probabilités de la première étape	θ_{max}	0,75
Paramètre de la distribution bêta	(α_1, β_1)	(1,5)
Prise en charge de la distribution bêta	$[\underline{x}_1, \bar{x}_1]$	[-0,05 ; 0,25]
Paramètre de la distribution bêta (ent.)	(α_2, β_2)	(1,5)
Support de distribution bêta (ent.)	$[\underline{x}_2, \bar{x}_2]$	[-0,03 ; 0,15]
Pénalité pour imitation étrangère	ϵ	5
Pénalité pour concurrence étrangère	τ	0,05
Paramètre de dynamique du réplicateur	χ	1
Paramètre de sensibilité aux salaires	ψ	1
Flexibilité des taux de change	γ	0,1
Écart-type de chocs de taux de change	σ_e	0,002
Taux de dépréciation	δ	0,02
Réplifications de Monte-Carlo		50

Source : Auteurs.

Tableau A2. Scénarios politiques : valeurs des paramètres

Description des paramètres	Paramètre	Leaders	Retardataires			
			Le statu quo (BAS)	Politiques d'innovation uniquement (INN)	Protection de l'industrie uniquement (PROT)	Politiques industrielles (PI)
Part des investissements en R et D	ρ	0,04	0,01	0,04	0,01	0,04
Capacités de recherche (innovation)	ξ_1	0,08	0,02	0,08	0,02	0,08
Capacités de recherche (imitation)	ξ_2	0,08	0,02	0,08	0,02	0,08
Capacité d'absorption (distance tech.)	ϕ_1	0,08	0,02	0,08	0,02	0,08
Capacité d'absorption (vitesse d'apprentissage)	ω_1	0,2	0,05	0,2	0,05	0,2
Taux tarifaire	f	0	0	0	100	100

Source : Auteurs.