



HAL
open science

Modélisation multi-agents d'une économie monétaire de production : un système dynamique et complexe d'interactions réelles et monétaires entre des agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents

Pascal Seppecher

► **To cite this version:**

Pascal Seppecher. Modélisation multi-agents d'une économie monétaire de production : un système dynamique et complexe d'interactions réelles et monétaires entre des agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents. Economies et finances. Université Nice Sophia Antipolis, 2011. Français. NNT: . tel-00693151

HAL Id: tel-00693151

<https://theses.hal.science/tel-00693151>

Submitted on 1 May 2012

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

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

I.S.E.M. Université de Nice Sophia Antipolis
Groupe de recherche C.E.M.A.F.I

MODELISATION MULTI-AGENTS D'UNE ECONOMIE MONETAIRE DE PRODUCTION

Un système dynamique et complexe d'interactions réelles
et monétaires entre des agents multiples, hétérogènes,
autonomes et concurrents

Thèse pour le doctorat ès Sciences Economiques

Présentée et soutenue par

Pascal Seppecher

JURY

Monsieur le Professeur Richard Arena
Université de Nice Sophia Antipolis, France

Monsieur le Professeur Mauro Gallegati
Rapporteur
Université Polytechnique des Marches, Ancône, Italie

Madame le Professeur Sandye Gloria Palermo
Directeur de recherches
Université de Nice Sophia Antipolis, France

Monsieur le Professeur Marc Lavoie
Université d'Ottawa, Ontario, Canada

Monsieur le Professeur Jacques Mazier
Rapporteur
Université de Paris Nord, France

Décembre 2011

A mon père

Mes remerciements vont d'abord au professeur Sandye Gloria Palermo. Elle a accepté de prendre la direction de ce projet — qui me tenait tellement à coeur et dans lequel j'avais déjà tant investi. Elle a dirigé mes recherches avec attention et gentillesse et le regard qu'elle a porté sur mes travaux a beaucoup compté. Sous son impulsion, j'ai trouvé l'énergie nécessaire pour mener à bien mon projet. Je lui en suis reconnaissant et j'espère que nous aurons bientôt l'occasion de travailler ensemble à de nouveaux modèles.

Je remercie affectueusement mon professeur et ami Jean-Pierre Mockers. C'est lui qui, il y a déjà sept ans, a dirigé mes premiers pas dans la recherche en économie. C'est lui aussi qui m'a donné les bases d'une approche systémique, essentielles au développement ultérieur de mes travaux.

Je remercie sincèrement le professeur Claude Berthomieu qui par deux fois, à plusieurs années d'intervalle, s'est intéressé à mes projets et m'a permis de les développer.

Je veux remercier aussi deux professeurs d'outre-Atlantique qui ont joué un rôle important dans cette aventure. D'abord le professeur Marc Lavoie (Université d'Ottawa) dont les ouvrages m'ont éveillé à la science économique et dont l'apport théorique a été essentiel ; il a aussi montré une extraordinaire disponibilité pour un étudiant inconnu et lointain ; je lui reste redevable de ses conseils de lectures, de ses corrections avisées, de ses questions stimulantes. Ensuite le professeur Leigh Tesfatsion (Université d'Etat de l'Iowa) grâce à qui j'ai découvert l'existence des « agent-based computational economics », et qui est, elle aussi, toujours prête à répondre à une question ou donner un conseil.

Je remercie Katia, ma compagne, Manon et Lisa, mes filles, dont l'affection m'est si précieuse. Elles ont compris l'importance que ce projet revêtait pour moi et m'ont pardonné d'avoir ainsi détourné le temps, l'attention que je leur devais.

Je remercie affectueusement mon frère Pierre pour son aide.

Pendant toutes ces années, j'ai eu un autre projet à conduire à l'école élémentaire du Chalet des Roses. Je remercie chaleureusement mes collègues, mes amis, qui se sont engagés avec moi pour cette école. Rien de ce que nous avons construit ensemble pour nos élèves n'aurait été possible si l'équipe n'avait été aussi professionnelle, généreuse et soudée — et jamais je n'aurais pu trouver la disponibilité d'esprit et l'énergie nécessaires pour conduire chaque soir après la classe mes recherches jusqu'à cet aboutissement.

Je remercie mes amis Johanna Niaba et Jean-Marc Messina : chacun à sa manière m'a apporté une aide décisive alors que j'étais en difficulté. Je remercie aussi Ian Frazer, pour un fameux coup de main.

Je remercie les économistes et chercheurs qui ont montré leur intérêt pour mes

recherches, m'ont apporté leurs conseils et m'ont aidé à diffuser mes travaux; en particulier Dany Lang (Centre d'Economie de Paris Nord), Jacques Mazier (Centre d'Economie de Paris Nord), Cyrille Piatecki (Laboratoire d'Economie d'Orléans), Nicolas Grozhenny (Reserve Bank of New Zealand), Alexandru Minea (Université d'Auvergne), Edwin Le Héron (Institut d'Etudes Politiques de Bordeaux), Steve Keen (University of Western Sydney).

Je remercie enfin ceux qui, d'un mot ou d'un geste, ont manifesté de la sympathie pour mon entreprise et qui, par là, m'ont donné le courage d'aller jusqu'au bout.

Table des matières

1	Introduction	13
2	L'économie comme un système complexe	20
2.1	Des modèles peuplés d'agents multiples	21
2.1.1	Complexité des économies de marché	21
	Homéostasie	22
	Complexité	22
	Emergence	23
	Modéliser les économies complexes	24
	Modélisation réductionniste :	24
	Modélisation constructiviste :	25
2.1.2	L'origine des modèles peuplés d'agents multiples	27
	Le groupe de l'université de Carnegie Mellon	27
	Thomas C. Schelling	29
	John H. Holland	29
	Robert Axelrod et William D. Hamilton	30
	Christopher Langton	30
2.1.3	Macroéconomie et modèles multi-agents	31
	Un courant critique	31
	L'agent représentatif :	31
	L'« équilibre » macroéconomique :	32
	Les crises :	33
	Pour une macroéconomie multi-agents	33
	Des modèles peuplés de modèles	34
2.2	Des agents autonomes dans un environnement complexe	35
2.2.1	Des anticipations rationnelles à la rationalité limitée	35
2.2.2	De la rationalité limitée à la rationalité procédurale	36
2.2.3	L'ajustement comme principe directeur	37

2.2.4	Agrégation ou désagrégation ?	39
2.3	L'ordinateur émancipateur	40
2.3.1	La question matérielle	41
2.3.2	La question logicielle	41
	Un langage théorique naturel	42
	La programmation orientée objet	43
	Un laboratoire virtuel	44
2.3.3	Questions d'implémentation	46
	Agents	46
	Types :	46
	Multiplicité :	47
	Hétérogénéité :	48
	Autonomie :	49
	Echelle	52
	Nombre d'agents :	52
	Echelle de temps :	53
	Structure	53
	Accessibilité	54
2.4	Conclusion	54
3	L'économie comme un circuit	57
3.1	Eléments d'économie monétaire	58
3.1.1	Une théorie monétaire de la production	58
	Une pensée complexe	58
	Complexité des économies monétaires	59
3.1.2	Trois notions essentielles	59
	Une économie monétaire de production	60
	Une économie avec monnaie endogène	60
	Une économie d'entrepreneurs	61
3.1.3	Compatibilité des approches	62
3.2	Le circuit de la monnaie	64
3.2.1	La structure du circuit	64
	L'algorithme du circuit	64
	Micro, méso, macro	65
	Désagrégation et complexification	66
3.2.2	Le paradoxe des profits	68
3.2.3	Une solution interne	70
	Le modèle	70

	Vitesses de circulation	73
3.3	Pour un circuit dynamique et complexe	74
3.3.1	Du temps logique au temps historique	74
3.3.2	Un circuit dynamique	74
3.3.3	Un circuit complexe	77
3.4	Conclusion	79
4	Construction du modèle	82
4.1	Caractéristiques générales	83
4.1.1	Un modèle d'économie monétaire de production	83
	Une économie fermée	83
	La monnaie	83
	Les marchandises	84
	Le capital productif	84
	Le temps	84
4.1.2	Un modèle décentralisé	86
	Multiplicité	86
	Les ménages :	86
	Les entreprises :	86
	La banque :	86
	Echelle du modèle :	87
	Hétérogénéité	87
	Autonomie	87
	Concurrence	87
4.1.3	Un modèle informatique	88
	Un langage de haut niveau	88
	Un langage multi-plateformes	88
	Interface graphique	88
	Application web	89
4.1.4	Notations	89
4.2	Les objets des sphères réelle et monétaire	89
4.2.1	Les objets de la sphère réelle	89
	La force de travail	91
	L'usine	91
	Machines et processus de production	92
	Les marchandises	93
4.2.2	Les objets de la sphère monétaire	94
	Compte courant	94

	Dépôt monétaire	94
	Crédit bancaire	95
	Chèques	96
4.3	Les marchés	97
4.3.1	Le marché abstrait	98
4.3.2	Le marché des biens	98
4.3.3	Le marché du travail	99
4.4	Les agents	101
4.4.1	Un schéma général de comportement	101
4.4.2	La banque	103
	Variables et paramètres	103
	Capital de la banque	105
	Paiement des dividendes	106
	Etape 1 : Observation	106
	Etape 2 : Décision	106
	Etape 3 : Mise en oeuvre	106
	Financement de la production	107
	Gestion des moyens de paiements	108
	Paiement de l'intérêt	109
	Recouvrement des créances	109
4.4.3	Les entreprises	111
	Paiement des dividendes	111
	Etape 1 : Observation	114
	Etape 2 : Proposition	114
	Etape 3 : Décision	115
	Etape 4 : Paiement	115
	Détermination de la production et de l'emploi	115
	Etape 1 : Observation	117
	Etape 2 : Proposition	117
	Etape 3 : Décision	118
	Etape 4 : Ajustement de l'objectif	118
	Etape 5 : Mise en oeuvre	118
	Détermination du prix	118
	Etape 1 : Observation	119
	Etape 2 : Proposition	119
	Etape 3 : Décision	120
	Etape 4 : Ajustement du prix	120
	Détermination du salaire d'embauche	120

	Etape 1 : Observation	120
	Etape 2 : Proposition	120
	Etape 3 : Décision	121
	Etape 4 : Ajustement du salaire	121
	Financement de la production	121
	Recrutement de la main d'oeuvre	122
	Mise en oeuvre de la production	123
	Ecoulement de la production	125
	Paiement de l'intérêt	127
	Remboursement des crédits et faillites	128
4.4.4	Les ménages	129
	Paiement des dividendes	129
	Salaire de réservation et recherche d'un emploi	131
	Etape 1 : Observation	131
	Etape 2 : Décision	131
	Etape 3 : Ajustement du salaire de réservation	132
	Etape 4 : Recherche d'emploi	132
	Dépense de la force de travail	132
	Epargne et consommation	133
	Etape 1 : Observation	133
	Etape 2 : Décision	133
	Etape 3 : Mise en oeuvre	134
4.5	Conclusion	134
5	Cohérence macroéconomique	136
5.1	Le circuit	137
5.1.1	La structure hiérarchique du circuit	137
5.1.2	La structure séquentielle du circuit	137
5.1.3	Le problème du parallélisme	137
5.1.4	Représenter le circuit	138
5.2	Cohérence des stocks et des flux	139
5.2.1	La matrice des bilans sectoriels	139
5.2.2	La matrice des flux de transactions	141
5.3	Déroulement d'une période	142
5.3.1	Dividendes des entreprises	142
5.3.2	Dividendes de la banque	143
5.3.3	Financement de la production	144
5.3.4	Mise en oeuvre de la production	146

5.3.5	Ecoulement de la production	146
5.3.6	Paiement de l'intérêt	148
5.3.7	Remboursement des crédits	150
5.3.8	Faillites	150
5.3.9	Clôture de la période	151
5.4	Cohérence macroéconomique et complexité	151
5.5	Conclusion	156
6	Première exploration	158
6.1	Une méthode d'exploration	159
6.1.1	Analyse individuelle	159
6.1.2	Analyse matricielle	159
6.1.3	Etudes dynamiques, chocs, expériences	160
6.1.4	Exploration extensive	160
6.1.5	Analyses de sensibilité	161
6.2	Définition du scénario de base	162
6.2.1	Le problème de l'estimation	162
6.2.2	Choix des paramètres	164
6.2.3	Etat initial du modèle	164
6.3	Première simulation	167
6.3.1	Conjectures	167
6.3.2	Analyse matricielle	168
	Premiers crédits (janvier 2000 – mai 2000)	168
	Premières recettes (juin 2000 – décembre 2000)	168
	Premières échéances (janvier 2001 – juin 2001)	169
	Stabilisation (juillet 2001 – décembre 2005)	169
6.3.3	Etude dynamique	170
	Marché des biens	170
	Marché du travail	171
	Banque	171
6.3.4	Interpretation	171
	Une émergence	172
6.4	Conclusion	173
7	Vitesses de circulation	178
7.1	Durée du processus de production	179
7.1.1	Analyse de sensibilité	180
	Paramètres	180

	Conjectures	180
	Variables observées	182
	Résultats	182
	Phases :	183
	Part des profits :	183
	Vitesse de la monnaie :	183
	Activité :	184
	Faillites et crise :	184
	Corrélations :	185
7.2	Niveau des stocks	185
7.2.1	Analyse de sensibilité	186
	Paramètres	186
	Conjectures	187
	Résultats	187
	Phases :	187
	Part des profits :	188
	Vitesse de la monnaie :	188
	Demande et activité :	188
	Difficulté des entreprises et crise :	189
	Corrélations :	189
	Durée normale d'immobilisation du capital circulant :	190
7.3	Durée du crédit	191
7.3.1	Analyse de sensibilité	191
	Paramètres	191
	Conjecture	191
	Résultats	192
	Phases :	193
	Part des profits :	193
	Vitesse de la monnaie :	193
	Demande et activité :	194
	Difficultés des entreprises et crise :	194
	Durée normale d'immobilisation du capital circulant :	194
	Corrélations :	195
7.4	Conclusion	195
8	L'épargne	203
8.1	Fonds propres de la banque	204
8.1.1	Analyse de sensibilité	205

	Paramètres	205
	Conjectures	205
	Résultats	207
	Phases :	207
	Corrélations :	207
8.2	Autofinancement des entreprises	208
8.2.1	Analyse de sensibilité	209
	Paramètres	209
	Conjectures	209
	Résultats	210
	Phases :	210
	Part des profits, demande et activité :	211
	Difficultés des entreprises, crise :	211
	Corrélations :	212
8.3	Epargne des ménages	212
8.3.1	Analyse de sensibilité	213
	Paramètres	213
	Conjectures	213
	Résultats	214
	Phases :	215
	Corrélations :	215
8.3.2	Etude dynamique : choc négatif de la dépense	215
	Paramètres	216
	Conjectures	216
	Résultats	217
8.4	Conclusion	218
9	La productivité	229
9.1	Niveau moyen de la productivité	230
9.1.1	Etude de sensibilité	230
	Paramètres	231
	Conjectures	231
	Résultats	232
9.1.2	Etude dynamique : choc de productivité	233
	Paramètres	233
	Conjectures	234
	Résultats	235
	Effets immédiats :	235

	Contre choc :	235
	Correction :	236
	Stabilisation :	236
9.2	Hétérogénéité de la productivité des machines au sein des entreprises	236
9.2.1	Etude de sensibilité	237
	Paramètres	237
	Conjectures	237
	Résultats	238
9.3	Hétérogénéité de la productivité des entreprises	239
9.3.1	Analyse de sensibilité	239
	Paramètres	239
	Conjectures	240
	Résultats	241
	Phases :	241
	Part des profits :	242
9.3.2	Etude dynamique : dysfonctionnement bancaire	242
	Paramètres	243
	Conjectures	243
	Résultats	244
	Le choc :	245
	Une bulle du crédit :	245
	La surchauffe :	245
	Et la crise ?	246
9.4	Conclusion	246
10	Les salaires	260
10.1	La résistance des ménages	261
10.1.1	Analyse de sensibilité	261
	Paramètres	261
	Conjectures	262
	Résultats	263
	Phases :	263
	Salaires et prix :	263
	Part des profits :	263
	Difficultés des entreprises et crise :	264
10.1.2	Etude dynamique : choc de flexibilité	264
	Paramètres	264
	Conjectures	265

Résultats	265
10.2 Introduction d'un salaire minimum	267
10.2.1 Etude dynamique (1)	267
Paramètres	268
Conjectures	268
Résultats	268
Le choc :	269
Un mouvement contradictoire :	269
La crise :	270
Le rebond :	270
Le chômage :	270
10.2.2 Etude dynamique (2)	270
Paramètres	271
Conjectures	272
Résultats	272
10.3 Conclusion	273
11 Le motif de profit	286
11.1 Prix et profits dans un contexte d'incertitude radicale	288
11.1.1 Le markup, une heuristique post-keynésienne	288
L'apport de la microéconomie post-keynésienne	288
Markup et modèles multi-agents	290
Le modèle de Howitt (2008) :	290
Le modèle <i>Eurace</i> (2009) :	291
Le modèle de Dosi, Fagiolo, et Roventini (2008)	292
Le modèle <i>Eurace@Unibi</i> (2011) :	292
11.1.2 De l'agent réactif à l'agent cognitif	293
L'approche évolutionnaire	294
Les méta-heuristiques	295
Les algorithmes génétiques	296
11.2 Un modèle évolutionniste de fixation des prix	297
11.2.1 Modélisation des stratégies	298
Procédure du <i>demand-based-pricing</i>	298
Procédure du <i>cost-plus-pricing</i>	298
Etape 1 : Observation	299
Etape 2 : Proposition	299
Etape 3 : Décision	299
Etape 4 : Ajustement	299

Choix de la procédure utilisée	300
Codage des stratégies	301
11.2.2 Evaluation	302
11.2.3 Sélection	303
Opérateur de sélection	303
Implémentation	304
11.2.4 Imitation	304
Opérateur de croisement	305
Implémentation	305
11.2.5 Innovation	306
Opérateur de mutation	307
La méthode du simplexe de Nelder-Mead	309
Implémentation	310
Gestion des contraintes	310
11.2.6 Taux d'adaptation	312
11.2.7 Cas des faillites et des créations d'entreprises	313
11.3 Conclusion	314
12 Le markup	315
12.1 Adaptativité partielle	316
12.1.1 Etude dynamique	316
Paramètres	316
Conjectures	316
Résultats	317
Stratégies concurrentes	318
12.2 Adaptativité étendue	319
12.2.1 Etude dynamique (1)	319
Paramètres	319
Conjectures	320
Résultats	320
12.2.2 Etude dynamique (2) : choc de main d'oeuvre	322
Paramètres	322
Conjectures	323
Résultats	324
12.3 Niveau du markup	325
12.3.1 Analyse de sensibilité	325
Conjectures	326
Paramètres	327

Résultats	327
Phases :	327
Part des profits :	328
Niveau de l'activité, difficultés des entreprises :	328
Crises :	329
12.4 Conclusion	329
13 Conclusion	346
A Ressources	351
A.1 Application web	351
A.2 Code source	351
B Scénario de base – Matrices de bilans sectoriels (1999–2005)	352

Chapitre 1

Introduction

If you didn't grow it, you didn't explain it.

Epstein (2006)

La crise économique et financière actuelle est aussi une crise de la science économique. Pour Solow, l'approche dominante en macroéconomie semble n'avoir vraiment rien à dire d'utile face à la récession prolongée et au chômage massif.

« Here we are, still near the bottom of a deep and prolonged recession, with the immediate future uncertain, desperately short of jobs, and the approach to macroeconomics that dominates serious thinking, certainly in our elite universities and in many central banks and other influential policy circles, seems to have absolutely nothing to say about the problem. Not only does it offer no guidance or insight, it really seems to have nothing useful to say. » (Solow 2010, p. 1)

Solow concentre alors sa critique sur les modèles dynamiques stochastiques d'équilibre général (« dynamic stochastic general equilibrium models » ou modèles DSGE) utilisés en particulier dans les banques centrales comme modèles de décision et de prévision. Dans ces modèles, l'économie est considérée comme une personne unique, poursuivant rationnellement un objectif de long terme, occasionnellement perturbée par des chocs inattendus mais capable de s'y adapter de façon rationnelle et cohérente. Pour Solow, des modèles bâtis sur de telles hypothèses ne peuvent être pris au sérieux.

« [...] a mainstream economist like me insists that every proposition must pass the smell test: does this really make sense? I do not think that

the currently popular DSGE models pass the smell test. » (Solow 2010, p. 2)

Nous présentons dans cette thèse un modèle numérique d'économie de marché construit sur de toutes autres bases. Notre démarche est originale dans la mesure où nous n'introduisons pas le moindre rapport causal entre variables macroéconomiques dans le modèle. Plutôt que de postuler de tels rapports, nous voulons tenter de les comprendre par la reconstruction méthodique des conditions de leur formation, en partant des causes les plus élémentaires. De façon classique, nous situons les causes économiques élémentaires au niveau des interactions entre agents individuels.

« To build up a causal model, we must start not from equilibrium relations but from the rules and motives governing human behavior. We therefore have to specify to what kind of economy the model applies, for various kinds of economies have different rules [...] Our present purpose is to find the simplest kind of model that will reflect conditions in the modern capitalist world. [...] Our model, therefore, depicts a system in which production is organized by individual firms and consumption by individual households, interacting with each other without any overriding control. » (Robinson 1962, p. 34)

Prenant Robinson au pied de la lettre, nous pouvons donner une description plus précise du modèle que nous devons construire : c'est le modèle d'une économie dynamique (hors de l'équilibre) composée de deux grands groupes d'agents (entreprises et ménages) auxquels sont respectivement associées deux fonctions économiques principales (production et consommation) ; ces fonctions s'exercent dans le cadre imposé par les règles des économies capitalistes (propriété privée des moyens de production, échanges monétaires, salariat) ; les agents sont des individus autonomes en interaction directe et indirecte (et non des agents représentatifs ou des agrégats), chacun poursuivant son propre but, agissant en fonction de son état individuel et de l'environnement proche, sans se préoccuper du tout de l'équilibre général du système et sans contrôle supérieur (ni de la part d'un planificateur, ni d'un commissaire-priseur).

Parce qu'elle est la caractéristique première des économies de marché, cette *décentralisation radicale* est la caractéristique première du modèle que nous voulons construire. Or, il n'y a pas de façon triviale d'expliquer comment le comportement macroéconomique apparemment coordonné d'une économie de marché décentralisée résulte des activités désordonnées et concurrentes des agents multiples qui la peuplent.

« Il s'agit d'abord de décrire les comportements d'agents décentralisés, en déséquilibre, possédant une information limitée, ne connaissant ni le vrai

modèle de l'économie, ni les lois de distribution des variables aléatoires, ni les caractéristiques des autres agents, dans un environnement en perpétuelle mutation et largement imprévisible, c'est à dire placés dans une situation qu'il est convenu d'appeler d'*incertitude radicale*. Il faut ensuite comprendre sur cette base les mécanismes qui assurent la *coordination* des actions de ces agents, *en dépit* de ces limites (à moins que ce ne soit grâce à elles). » (Duménil et Lévy 1996, p. 122)

Si nous voulons reproduire dans un modèle les mécanismes assurant la coordination macroscopique d'interactions économiques élémentaires, l'utilisation des abstractions habituellement mobilisées pour construire des modèles macroéconomiques — un agent représentatif à la place de la multitude d'agents hétérogènes et autonomes, un commissaire-priseur à la place des marchés décentralisés, un équilibre général à la place de l'enchevêtrement de processus réels et monétaires, un avenir probabilisable à la place de l'incertitude radicale, *etc* — doit être écartée. Suivant Delli Gatti, Gaffeo, Gallegati, Giulioni, et Palestrini (2008, p. iv), nous pensons que « l'interaction directe et/ou indirecte entre des agents hétérogènes est une condition suffisante à l'émergence de régularités macroéconomiques » et que par conséquent, il doit être possible de construire des modèles macroéconomiques sur ce principe. Selon cette approche, que l'on peut qualifier de « générative » (Epstein 1999) ou de « constructiviste » (Tsfatsion 2006), la compréhension des phénomènes macroéconomiques émergents passe par leur reconstruction à partir des interactions élémentaires qui en sont à l'origine. Cette approche, en tirant parti des capacités de calcul croissantes des ordinateurs et de la puissance des langages de programmation les plus récents, est à l'origine d'une nouvelle classe de modèles : les modèles multi-agents.

Cependant, même dans une économie radicalement décentralisée, l'activité des agents s'inscrit nécessairement dans une structure d'interactions qui leur est extérieure et qui caractérise l'économie modélisée. Dans une économie de marché, la structure des interactions entre les agents est à la fois *réelle* et *monétaire*. Dans la sphère réelle, les interactions entre agents ne se limitent pas à l'échange des marchandises mais intègrent la production et la consommation de ces marchandises. De même dans la sphère monétaire, les interactions ne peuvent être réduites à la circulation de la monnaie mais doivent intégrer aussi la création et la destruction de cette monnaie. L'enjeu est de construire un modèle macroéconomique capable de rendre compte de ce dualisme du réel et du monétaire. Pour cela nous nous tournons vers l'approche post-keynésienne qui a développé, avec la théorie monétaire de la production, une pensée articulée centrée sur les interactions monétaires entre secteurs économiques. C'est cette théorie qui va nous fournir les éléments dont nous avons besoin pour la construction de la structure réelle et monétaire du modèle.

Notre projet associe donc intimement l'approche constructiviste et l'approche post-keynésienne dans la construction d'un modèle multi-agents d'économie monétaire de production.

Les deux premiers chapitres sont consacrés à rassembler les matériaux théoriques nécessaires à la construction du modèle.

Dans le chapitre 2, nous montrons la portée des notions de système complexe, d'homéostasie et d'émergence pour l'étude des économies de marché décentralisées. De là, nous nous intéressons aux techniques de modélisation multi-agents qui permettent de construire des sociétés artificielles dans l'espace virtuel de la mémoire d'un ordinateur. Les agents — multiples, hétérogènes et même concurrents — sont au coeur de ces modèles. Ces agents sont des automates dotés de procédures plus ou moins évoluées qui leur confèrent une certaine autonomie. Ils sont eux-mêmes les modèles des agents réels qui peuplent le système réel; les règles et les motifs qui gouvernent leur comportement s'inspirent de façon réaliste des règles et des motifs qui gouvernent les agents réels.

Dans le chapitre 3, nous nous tournons vers les auteurs du courant postkeynésien et de la théorie monétaire de la production. Nous retenons de cette pensée trois notions essentielles à partir desquelles nous décidons de construire la structure des interactions entre les agents qui peupleront le modèle : dans notre modèle la production prendra du temps, de telle sorte que les entreprises devront faire l'avance des coûts de production (*économie monétaire de production*); toute la monnaie qui circulera dans le modèle trouvera son origine dans les crédits bancaires à la production (*monnaie endogène*); les entreprises chercheront à retirer de la vente de leur produit plus de monnaie qu'elles n'ont dû en avancer dans sa production (*économie d'entrepreneurs*). Cependant, les modèles classiques du circuit de la monnaie peinent à rendre compte du profit et de l'intérêt. Nous montrons alors qu'il est possible de construire un modèle d'économie monétaire de production plus réaliste à condition de le construire comme un système dynamique et complexe formé d'un grand nombre de boucles réelles et monétaires entrelacées.

Les deux chapitres suivants sont consacrés à la construction du modèle.

Dans le chapitre 4, nous mettons en place les uns à côté des autres, selon une démarche ascendante et constructiviste, tous les éléments logiciels dont nous avons besoin pour notre projet. Nous commençons par construire les objets les plus simples — forces de travail et marchandises, crédits et dépôts — représentations des objets réels et monétaires du monde réel, puis nous construisons les marchés — marché des biens et marché du travail — non comme des agents particuliers chargés d'assurer l'équilibre du système, mais comme des institutions passives, de simples lieux de

rencontres et d'échanges directs et décentralisés entre les agents. Enfin nous développons les trois types d'agents — banque, entreprises, ménages — qui vont peupler le système. Nous les concevons comme des automates dotés de procédures d'ajustement simples.

Dans le chapitre 5, nous retraçons pas à pas les interactions entre les groupes d'agents — entre les secteurs — au moyen de matrices comptables inspirées de l'approche « stock flux » de Godley et Lavoie (2007). Nous avons alors la surprise de constater que notre modèle, bien que construit selon une approche ascendante, s'inscrit de façon cohérente dans ces matrices. Cependant, la question de la coordination macroscopique du comportement de la multitude d'agents autonomes et concurrents demeure, même si l'on commence à percevoir plus clairement que l'existence d'une structure monétaire superposée à la structure réelle va jouer un rôle important dans cette coordination.

Les chapitres 6 à 10 sont consacrées à l'exploration du modèle au moyen de simulations.

Dans le chapitre 6, nous définissons un scénario de base choisi pour devenir le point de fonctionnement de référence du modèle. Dès la première simulation, nous obtenons certains résultats importants, qui viennent nous encourager dans notre démarche :

- il est possible de construire un modèle macroéconomique d'économie de marché radicalement décentralisé, peuplé d'agents multiples, autonomes, hétérogènes et concurrents, capable de se reproduire de période en période en respectant la cohérence des stocks et des flux ;
- il est possible de construire un modèle de circuit monétaire dynamique et complexe, respectant les principes de base de la théorie monétaire de la production, et dans lequel les entreprises réalisent des profits, distribuent des dividendes, paient l'intérêt sur les prêts ;
- il est possible d'observer, dans le comportement d'un tel modèle, des manifestations de mécanismes homéostatiques émergents, c'est-à-dire des phénomènes de stabilisation macroscopique non directement déductibles du comportement individuel des agents.

A partir de cette première simulation, nous explorons le modèle en faisant varier l'un après l'autre les principaux paramètres. Dans le chapitre 7, nous nous intéressons aux paramètres qui définissent la structure temporelle du système. La durée du cycle de production et le niveau normal des stocks, en définissant la vitesse de rotation du capital circulant, jouent un rôle déterminant dans la répartition du revenu entre salaires et profits : les simulations montrent que plus la durée normale d'immobilisation du capital circulant est longue, plus le niveau moyen des profits est élevé.

Ces premières explorations viennent valider notre démarche dans la mesure où elles démontrent l'importance de la structure monétaire dans la dynamique du système.

Dans le chapitre 8, nous décidons de faire varier la vitesse à laquelle les agents dépensent leurs revenus en modifiant les paramètres qui définissent leur comportement d'épargne. Les résultats montrent que les stocks d'épargne des agents — en l'absence de sphère financière et avec un stock de capital productif donné — constituent autant de bassins de rétention qui viennent ralentir la circulation monétaire, affaiblir la demande, réduire la part des profits. A la limite, si les agents entretiennent des stocks d'épargne tels que la vitesse du circuit *revenu-consommation* tombe sous la vitesse du circuit *force de travail-marchandise*, alors le circuit n'est plus bouclé et la crise est systémique.

Le chapitre 9 est consacré à l'étude des paramètres fixant la productivité des unités de production. Si le niveau moyen de la productivité n'a pas d'effet sur la dynamique de long terme du modèle, en revanche, nous observons qu'une brusque variation de la productivité moyenne peut entraîner une déstabilisation de l'économie modélisée. C'est seulement par l'émergence progressive d'un nouveau rapport des salaires et des prix permettant le rétablissement de la répartition du revenu à son niveau d'avant la crise que l'économie parvient finalement à retrouver la stabilité. Les expériences suivantes, qui portent sur l'hétérogénéité de la productivité, viennent complexifier les résultats précédents sans les remettre en cause : au-dessus d'un certain seuil, la présence d'entreprises peu productives modifie les conditions moyennes d'autofinancement du secteur, l'accroissement des difficultés de quelques unes se révélant profitable à l'ensemble. Cependant, tant que le système bancaire reste vigilant, sanctionnant les entreprises moins rentables et limitant la croissance des créances douteuses, le lien entre monnaie et production est maintenu et l'équilibre macroéconomique du modèle est préservé. En revanche, si la banque ne mesure pas les risques encourus et accorde sans cesse de nouveaux crédits qui ne pourront être remboursés, alors les règles de fonctionnement de la sphère monétaire sont profondément altérées et on observe une déstabilisation des rapports économiques et sociaux.

Dans le chapitre 10, nous examinons le rôle des procédures définissant le comportement des agents sur le marché du travail. Nous modifions ce comportement en imposant aux ménages sans emploi d'accepter plus facilement une baisse des salaires nominaux. Nous constatons alors une baisse générale des salaires qui entraîne un affaiblissement de la demande. Cet affaiblissement de la demande conduit les entreprises à baisser le prix des marchandises mais aussi le niveau de la production, avec pour conséquence l'augmentation du chômage. En dessous d'un certain seuil, l'affaiblissement de la résistance des ménages débouche sur la formation d'un pro-

cessus déflationniste qui s'entretient et s'amplifie et que seule la faillite du système bancaire vient interrompre. Le scénario suivant, avec instauration d'un salaire minimum, confirme l'importance de la rigidité des salaires dans l'émergence de la stabilité économique constatée dans le scénario de référence. Nous montrons enfin comment, sous certaines conditions, l'existence de deux états du marché du travail — l'un flexible et l'autre non — permet de faire émerger des comportements périodiques inattendus.

Les deux derniers chapitres sont consacrées à l'introduction de capacités d'adaptations supérieures dans le comportement des entreprises pour l'ajustement des prix et à ses conséquences sur la dynamique du modèle.

Dans le chapitre 11, nous décidons de doter les entreprises d'un comportement explicitement orienté vers la réalisation d'un profit, sinon maximal, du moins égal ou supérieur à celui de leurs concurrentes. Pour cela, nous dotons les entreprises de capacités renforcées d'autonomie et d'adaptation en développant un algorithme évolutionnaire hybride associant le principe des algorithmes génétiques à celui de l'algorithme du simplexe de Nelder-Mead. Selon cet algorithme original, les entreprises développent elles-mêmes des stratégies individuelles et concurrentes d'ajustement des prix, combinant deux procédures, l'une basée sur l'observation des stocks, l'autre basée sur la technique du markup. Par un processus associant sélection, imitation et innovation, les entreprises abandonnent les stratégies les moins profitables, et s'inspirent des stratégies les plus profitables pour en élaborer de nouvelles qu'elles espèrent supérieures.

Dans le chapitre 12, nous explorons les nouvelles dynamiques macroéconomiques résultant de cette modification du modèle. Les études dynamiques avec des entreprises adaptatives montrent que les entreprises, poussées par le motif de profit, ont tendance à adopter des stratégies d'ajustement des prix dans laquelle la procédure basée sur le markup prend une part essentielle. Paradoxalement, on observe que l'adoption de telles stratégies conduit à des répartitions du revenu global moins favorables aux profits. Même si l'on essaie de faire abstraction des effets de la concurrence en fixant de façon exogène et uniforme le niveau du markup visé par les entreprises, on constate qu'il existe un niveau de profit maximal au-delà duquel le modèle n'est plus viable.

Le chapitre 13 vient conclure mais ne peut, puisque notre projet s'inscrit résolument dans une démarche constructiviste, prétendre aboutir. Nous décrivons alors nos projets : les extensions du modèle que nous imaginons, les nouvelles recherches et explorations que nous sommes prêts à entreprendre.

Chapitre 2

L'économie comme un système complexe

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

Cohen (1960)

Nous avons pour projet la construction d'un modèle d'économie de marché, dans lequel nous ne souhaitons introduire aucun rapport causal entre variables macro-économiques. Nous voulons au contraire placer les rapports de causalité au niveau des agents eux-mêmes : chaque agent n'obéissant qu'aux règles définissant son comportement poursuivrait son but propre, en fonction de son état individuel et de sa perception de son environnement proche, sans se préoccuper le moins du monde de l'équilibre général du système. La caractéristique première du modèle que nous voulons construire est donc une *décentralisation radicale*.

Dans la section 2.1, nous montrons que notre façon d'aborder la modélisation des économies de marché nous renvoie aux notions de *système complexe* et de *comportement émergent*. Nous nous intéressons alors aux *modèles à base d'agents multiples*, technique venue de la recherche en intelligence artificielle. Nous montrons que ces modèles sont conçus pour rendre compte de la dynamique de systèmes complexes formés de grands nombres d'agents autonomes et hétérogènes et que leur application

à la macroéconomie paraît prometteuse même si elle n'en est qu'à ses débuts.

Dans la section 2.2, nous nous intéressons à la question de la modélisation du comportement des agents économiques dans des modèles dynamiques complexes. Dans un système complexe, l'incertitude est telle que les calculs d'optimisation propres à la microéconomie néoclassique sont inopérants. Nous devons donc nous tourner vers une autre représentation du comportement des agents économiques, basée sur la notion de *rationalité procédurale*.

Dans la section 2.3, nous nous interrogeons sur le rôle de l'outil informatique dans le développement des modèles à base d'agents multiples. Si l'accroissement toujours plus rapide de la puissance de calcul des ordinateurs a joué un rôle essentiel, le développement de tels modèles n'aurait pas été possible sans l'apparition d'une nouvelle classe de langages de programmation, spécialement conçus pour la modélisation, la simulation et la gestion des systèmes dynamiques complexes. Nous montrons alors que les questions de développement logiciel qui se posent lors de la phase de développement du modèle ne sont pas seulement techniques, mais s'adressent directement à l'économiste.

2.1 Des modèles peuplés d'agents multiples

La complexité des économies de marché est une évidence, cependant la notion même de système complexe nécessite d'être explicitée. Un système complexe peut difficilement être simplifié sans qu'on lui fasse perdre certaines de ses propriétés émergentes ; c'est le principal reproche que l'on peut adresser à l'approche réductionniste sur laquelle sont construits les modèles macroéconomiques couramment utilisés aujourd'hui. Dans cette section, nous verrons comment le développement de l'approche multi-agents permet d'envisager la construction d'une nouvelle classe de modèles macroéconomiques, respectueux de la complexité des systèmes observés, et orientés vers la prévision et l'aide à la décision.

2.1.1 Complexité des économies de marché

La décentralisation de l'activité des agents économiques est un des caractères essentiels des économies de marché. Depuis Adam Smith¹, on s'étonne de voir l'activité

1. « Contrary to what is usually thought, the very idea that the economy is a (complex) self-organizing system is not a new entry in the toolbox of economists got mixed up in complexity, but it is the key message conveyed in 1776 by the founding father of the discipline, the Scottish moral philosopher Adam Smith [...] » (Gaffeo, Catalano, Clementi, Delli Gatti, Gallegati, et Russo 2008, p. 3)

désordonnée d'une multitude d'agents poursuivant chacun ses buts propres déboucher sur un système capable de se reproduire dans le temps en présentant certaines régularités fortes, comme si des forces invisibles intervenaient pour assurer le retour à un certain « équilibre » après chaque perturbation.

Homéostasie

Cependant la notion d'équilibre, si elle est réduite à l'intersection de deux courbes sur un graphe, paraît un peu trop mécanique pour s'appliquer à la complexité des dynamiques des systèmes économiques réels, dont les capacités d'adaptation rappellent plutôt la capacité des organismes vivants à maintenir leur intégrité physique dans un processus dynamique. Cannon (1932) nomme *homéostasie* cette stabilité de l'organisme des êtres vivants, maintenue par des processus physiologiques coordonnés particulièrement complexes, notion qui n'implique pas l'idée d'immobilité et de stagnation propre aux états d'équilibres physico-chimiques dans lesquels un ensemble de forces connues s'équilibrent. Cannon, qui est un physiologiste, pense que toutes sortes d'organisations complexes — y compris de type économique — sont susceptibles d'abriter des mécanismes d'auto-ajustement homéostatiques semblables à ceux des organismes biologiques.

« It seems not impossible that the means employed by the more highly evolved animals for preserving uniform and stable their internal economy (*i.e.*, for preserving homeostasis) may present some general principles for the establishment, regulation and control of steady states, that would be suggestive for other kinds of organization — even social and industrial — which suffer from distressing perturbations. » (Cannon 1932, p. 24–25)

Canon suggère qu'une étude comparative pourrait montrer que toute organisation complexe comporte de tels mécanismes automatiques d'ajustement (« self-righting adjustments ») destinés à préserver son intégrité.

Complexité

Cependant, comme le note Cannon, les éléments qui composent un organisme vivant « travaillent coopérativement » au maintien de son équilibre dynamique. En revanche, les économies de marché se caractérisent par le comportement concurrent des éléments qui les composent et par l'absence de tout mécanisme supérieur de régulation et de contrôle. Comment est-il possible que de tels systèmes économiques parviennent à maintenir leur équilibre dynamique et à se prémunir contre leur propre désintégration ?

« Why have particular global regularities evolved and persisted in real-world decentralized market economies, despite the absence of top-down planning and control? How, specifically, have these global regularities been generated from the bottom up, through the repeated local interactions of autonomous interacting agents? » (Tsfatsion 2003, p. 2)

Les économies de marchés semblent disposer de propriétés permettant la coordination des actions des agents multiples et concurrents qui la composent, sans que l'analyse permette d'identifier d'organe particulier en mesure d'assurer la coordination observée ; comme si l'ensemble était « supérieur » à la somme des parties. Cette description renvoie à la notion de *système complexe* :

« Roughly, by a complex system I mean one made up of a large number of parts that interact in a nonsimple way. In such systems, the whole is more than the sum of the parts, not in an ultimate, metaphysical sense, but in the important pragmatic sense that, given the properties of the parts and the laws of their interaction, it is not a trivial matter to infer the properties of the whole. » (Simon 1962, p. 468)

Une économie de marché est un système complexe, composé d'un grand nombre de parties (ménages, entreprises. . .) en interactions directes et décentralisées. Ni l'individualisme qui caractérise ces composants ni les lois de la concurrence qui gouvernent leurs interactions ne nous permettent d'inférer de façon triviale les capacités de ce système à se reproduire de période en période avec une certaine stabilité.

Emergence

On appelle « propriétés émergentes » les propriétés d'un système qui ne sont pas directement déductibles de l'observation des éléments qui le composent (Tsfatsion 2006, Farmer et Geanakoplos 2009).

« Formally, emergence is a central property of dynamic systems based upon interacting autonomous agents. The knowledge of entities' attributes and rules is not sufficient to predict the behaviour of the whole system. » (Phan 2003, p. 14)

Epstein (1999) nous met cependant en garde contre la notion d'émergence, non seulement parce qu'il la juge comme imprécise, mais surtout parce qu'elle se révèle historiquement et idéologiquement marquée, associée à l'« émergentisme classique » britannique apparu dans les années 1920.

« There is an unmistakably anti-scientific — even deistic — flavor to this movement, which claimed *absolute unexplainability* for emergent phenom-

ena. In view of these authors, emergent phenomena are unexplainable in principle. » (Epstein 1999, p. 53)

Pour Epstein, l'émergentisme classique s'efforce de préserver le « vide mystérieux » qui sépare le niveau microéconomique du niveau macroéconomique, alors qu'il s'agit au contraire de le « démystifier en identifiant les micro-spécifications qui sont suffisantes pour générer — de façon robuste et répliquable — le niveau macro (l'ensemble) » (Epstein 1999, p. 55). Comme nous y invitait Simon à propos de la notion de système complexe, on doit donc se garder de toute interprétation absolue ou métaphysique de la notion de propriété émergente².

« Emergence is not an ontological trait inherent in some phenomena; rather it is indicative of the scope of our knowledge at a given time; thus it has no absolute, but a relative character; and what is emergent with respect to the theories available today may lose its emergent status tomorrow. » (Hempel et Oppenheim 1948, p. 263, cité par Epstein 1999, p. 54)

Modéliser les économies complexes

Résumons-nous : nous voyons l'économie de marché comme un système formé d'un grand nombre d'agents autonomes en interactions. Les propriétés homéostatiques de ce système sont des propriétés émergentes, dans la mesure où nous ne pouvons les déduire simplement ou directement du comportement des agents, caractérisé comme non coopératif. L'économie de marché apparaît donc comme un système complexe. Comment alors modéliser une telle économie ?

Modélisation réductionniste : Une première voie, la plus largement empruntée, consiste à tenter de réduire la complexité du réel — et en particulier le caractère décentralisé des interactions entre les agents — de façon à disposer d'un système simplifié auquel on peut appliquer les outils mathématiques dont on dispose. C'est cette solution qui est utilisée par tous les modèles d'équilibre général.

« The general equilibrium theory of Arrow and Debreu can be regarded as an attempt to cut through the complexity of individual interactions and

2. Gloria-Palermo (2011) rapproche la notion de propriété émergente du concept hayekien d'« ordre spontané ». Elle remarque que l'idée de propriété émergente est plus générale que celle d'ordre spontané car pour Hayek l'ordre spontané — celui qui émerge de la libre concurrence — est supposé efficient. En revanche, les propriétés émergentes d'un système complexe n'ont pas d'orientation particulière : elles peuvent tout aussi bien se manifester comme effets pervers ou vertueux.

reduce the invisible hand to a tractable mathematical form. » (Farmer et Geanakoplos 2009, p. 34)

Les simplifications radicales sur lesquels reposent ces modèles sont présentées comme nécessaires et suffisantes pour permettre de reproduire les régularités macroéconomiques observées, dans l'objectif de pouvoir fournir, sinon des prévisions, du moins des indications de politique économique.

Solow, qui prend garde de se définir lui-même comme un économiste néoclassique assez traditionnel (« a quite traditional mainstream economist »), accepte évidemment le principe de simplification à la base de tout effort théorique.

« Economic theory is always and inevitably too simple; that can not be helped. » (Solow 2010, p. 2)

Néanmoins, il met en garde contre le caractère abusif des simplifications sur lesquelles reposent les modèles d'équilibre général les plus avancés, les modèles dynamiques stochastiques d'équilibre général (modèles DSGE) utilisés notamment par les banques centrales comme modèles de décision et de prévision. En particulier, il fait remarquer que ces modèles reposent sur un agent représentatif unique, à la fois « travailleur–propriétaire–consommateur–et ainsi de suite », ce qui conduit nécessairement à représenter l'économie comme un système dans lequel il n'y a pas de conflits d'intérêts, pas d'incompatibilité des anticipations, pas de déceptions. Toute l'économie est traitée comme un individu unique qui essaie consciencieusement et rationnellement de servir au mieux les intérêts de l'agent représentatif, en fonction des circonstances. Pour Solow, des modèles construits sur de telles bases ne peuvent constituer une description satisfaisante d'une économie dont il est évident qu'elle ne poursuit aucun but cohérent ; il est donc parfaitement déraisonnable de suivre les préconisations de politique économique issues de ces modèles.

« A thoughtful person, faced with the thought that economic policy was being pursued on this basis, might reasonably wonder what planet he or she is on. » (Solow 2010, p. 2)

Modélisation constructiviste : Il existe une autre voie qui s'attache d'abord à la compréhension des mécanismes qui relient les comportements individuels au comportement macroéconomique. Parce que ces mécanismes sont complexes, il est très difficile de les réduire à des mécanismes simples sans les fausser. Il s'agit alors, plutôt que de chercher à simplifier ces mécanismes, de tenter de les reconstruire selon ce qu'Epstein appelle une approche « générative »³.

3. Epstein (1999, p. 55) souligne qu'en un sens, cette approche est aussi une forme de réductionnisme, puisqu'elle se propose de rechercher des explications à des phénomènes supposés inexplicables.

« To the generativist — concerned with formation dynamics — it does not suffice to establish that, if deposited in some macroconfiguration, the system will stay there. Rather, the generativist wants an account of the configuration’s *attainment by a decentralized system of heterogeneous autonomous agents*. Thus, the motto of *generative social science*, if you will, is: If you didn’t grow it, you didn’t explain its emergence. » (Epstein 1999, p. 42–43)

Cette recherche d’explications par la reconstruction constitue le premier objectif des *modèles multi-agents*⁴ (Tsfatsion 2003, p. 2). Les modèles multi-agents se distinguent radicalement des modèles classiques. Ce sont par nature des modèles informatiques décentralisés. Ils ne sont pas constitués d’un système d’équations reliant des grandeurs macroéconomiques, système qu’il s’agirait de résoudre pour atteindre le bouclage du modèle. Ils sont constitués d’un grand nombre d’agents en interactions directes et décentralisées, sortes d’automates logiciels relativement simples représentant chacun un acteur du système modélisé, et poursuivant chacun leur but propre.

« An agent-based model is a computerized simulation of a number of decision-makers (agents) and institutions, which interact through prescribed rules. The agents can be as diverse as needed [...] Such models do not rely on the assumption that the economy will move towards a predetermined equilibrium state, as other models do. Instead, at any given time, each agent acts according to its current situation, the state of the world around it and the rules governing its behaviour. » (Farmer et Foley 2009, p. 685)

Rapprochons la définition des modèles multi-agents donnée par Farmer et Foley du projet de « modèle causal » de Robinson⁵. Les deux approches se correspondent étroitement, presque mot pour mot :

- les règles de comportement des agents constituent le point de départ ;
- les agents sont considérés au niveau individuel ;

cables. Pour Colander (2008, p. 4), l’approche de la complexité met aussi en oeuvre des processus de simplification, tout en affirmant qu’il y a des situations où l’on ne peut atteindre la « simplicité structurelle » mais où la science a néanmoins « quelque chose à dire » ; cette approche a ainsi valeur heuristique.

4. En anglais « agent-based models ». Nous verrons (page 53) que ces modèles ne sont en fin de compte pas tant « basés » sur les agents qu’ils en ont l’air. Aussi, nous pensons qu’il vaudrait mieux parler de *modèles peuplés d’agents multiples*. On parle aussi d’« agent-based computational economics », ou *ACE*, pour désigner le mouvement des chercheurs qui développent ce type de modèles dans le champ des sciences économiques.

5. Voir Robinson (1962), citée en introduction, page 14.

- il existe différents types d’agents ;
- les agents sont en interactions directes et décentralisées ;
- les actions des agents ne sont pas soumises à des objectifs supérieurs ;
- il n’y a pas d’équilibre prédéterminé du système.

Si l’on se refuse à considérer les économies de marché comme nécessairement et naturellement équilibrées, on doit s’interroger sur les conditions qui permettent l’apparition éventuelle de l’équilibre, de son maintien et de sa disparition. Les techniques de modélisation à base d’agents multiples apparaissent dès lors indispensables.

« Agent-based computational methods provide the only way in which the self-regulatory capabilities of complex dynamic models can be explored so as to advance our understanding of the adaptive dynamics of actual economies. » (Leijonhufvud 2006, p. 1626)

2.1.2 L’origine des modèles peuplés d’agents multiples

A l’origine, les systèmes multi-agents apparaissent dans le domaine des sciences informatiques, comme un objet de recherche dans le champ de l’intelligence artificielle distribuée. Leur application à la modélisation économique se développe progressivement depuis les années 1980 à partir d’initiatives individuelles et dispersées mais qui gagnent progressivement en force et cohésion, jusqu’à se constituer en « mouvement ».

« Over the last twenty years a different way of doing economics has been slowly emerging. It goes by several labels: complexity economics, computational modeling, agent-based modeling, adaptive economics, research on artificial economies, generative social science — each of these with its own peculiarities, its own followers, and its own nuances. Whatever the label, what is happening, I believe, is more than just the accumulation of computer-based or agent-based studies. It is a movement in economics. » (Arthur 2006, p. 1553)

Ces premières initiatives s’appuyaient sur une série de travaux précurseurs qui doivent être mentionnés⁶.

Le groupe de l’université de Carnegie Mellon

Quoi qu’en dise Axtell (2006, p. 142), nous voyons dans le groupe des chercheurs de l’université de Carnegie Mellon les véritables précurseurs de l’approche multi-

6. Je remercie Leigh Testfatsion pour ses conseils de lecture qui ont orienté mes recherches pour la rédaction de cette section.

agents (Simon 1961, Simon 1955, Simon 1959, Cohen 1960, Cohen et Cyert 1961, Simon 1962, Cyert et March 1963). Il est vrai que ces chercheurs n'ont construit aucun modèle peuplé d'agents multiples. Cependant, leurs travaux dans le domaine de la *rationalité limitée* et de la *rationalité procédurale* ont conduit à des avancées très importantes à la fois d'un point de vue technique (intelligence artificielle) et sociologique (comportement de l'entreprise). Ils sont toujours d'actualité pour modéliser le comportement des agents qui peuplent les modèles *ACE*⁷.

De plus, ils sont les véritables introducteurs de la programmation informatique en économie, non seulement d'un point de vue technique (pour l'implémentation des modèles et la simulation) mais aussi en tant que « langage théorique naturel » pour la description des processus à l'oeuvre au sein des systèmes économiques complexes⁸.

Enfin, selon nous, c'est un membre de leur groupe (Cohen 1960) qui donne la première description d'un projet de modèle macroéconomique multi-agents⁹ :

« *Implications for Aggregate Economic Models*: Even for those economists who are not fundamentally interested in the internal operations of firms, it is quite possible that a much more intensive study of individual entrepreneurial behavior may furnish a very useful basis on which to formulate aggregate models of the economic system which could provide better forecasts of over-all economic behavior than we are now able to produce. » (Cohen 1960, p. 536)

Cohen envisage explicitement la construction d'un modèle agrégé du système économique, orienté vers la prévision macroéconomique. Ce modèle serait lui-même formé d'un grand nombre de modèles hétérogènes.

« In such an approach to macroeconomic forecasting, we would first have to formulate a variety of models at a microeconomic level which explain the individual actions of specific firms in the economy. In order to obtain adequate descriptions of the behavior of individual firms, it might conceivably be necessary to have as many models as there are firms; i.e., a special model for each firm. We doubt that this will be the case, however. Probably a relatively small number of basic models, perhaps something

7. Nous reviendrons sur cette question dans la section consacrée aux problèmes théoriques posés par la modélisation du comportement d'agents autonomes dans un environnement dynamique et complexe (page 35 et suivantes).

8. Nous reviendrons sur cette idée dans la section consacrée à la question logicielle (page 42).

9. L'article de Cohen est cependant totalement méconnu. Leigh Tesfatsion, à qui nous l'avons signalé, partage notre enthousiasme pour ce lointain précurseur : « What prevision Cohen had! Although he did not himself attempt any actual "agent-based" modeling in this paper, he correctly anticipated many of the challenges that would arise. » (Tesfatsion, correspondance).

in the order of a dozen, will adequately describe the relevant aspects of each individual firm's actions. » (Cohen 1960, p. 536–537)

Le comportement macroéconomique du modèle projeté serait le résultat des interactions entre les entreprises qui le composent, chacune agissant sur une base individuelle.

« All of these basic models of individual firms' behavior can then be incorporated into an over-all computer model. This complete model can simulate the actions of each firm (or at least of a sufficiently large number of firms) and the interactions among firms which comprise the behavior of industry variables. » (Cohen 1960, p. 537)

Si 50 ans plus tard, le projet de Cohen semble enfin à portée de main, c'est en grande partie grâce aux progrès théoriques intervenus entre temps.

Thomas C. Schelling

Bien que Shelling n'ait pas utilisé d'ordinateur pour ses premières simulations, son modèle de ségrégation spatiale (Schelling 1971) tient une place très importante dans la littérature des « agent-based computational economics » en tant que modèle pédagogique. Un effet, ce modèle permet d'illustrer à la fois concrètement (la ségrégation spatiale est un fait social) et théoriquement (le modèle est d'une grande simplicité) les notions de système complexe (ici un espace urbain avec une population hétérogène) et d'émergence (ici la formation de quartiers de population homogène, malgré un comportement individuel peu ségrégationniste).

Avec son modèle, Schelling entend montrer à l'oeuvre des mécanismes qui convertissent le comportement d'individus inorganisés en un résultat collectif qui n'a pas de contrepartie identifiable au niveau individuel. Parmi les autres exemples de tels mécanismes, Schelling cite les « activités libres de marché » dont il souligne que les résultats ne correspondent « à aucun choix collectif conscient » (Schelling 1971, p. 145).

John H. Holland

C'est dans le domaine plus abstrait de l'intelligence artificielle que se situe l'apport de Holland (1975), avec l'invention des *algorithmes génétiques*. Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur la métaphore de la génétique et de l'évolution naturelle. Ils intéressent à double titre les constructeurs de modèles multi-agents :

- Dans leur principe : Un algorithme génétique s’appuie sur une population d’individus répartis dans l’espace de recherche. Cette population, soumise à des opérations répétées de sélection, de croisement et de mutation, va progressivement converger vers une solution du problème modélisé comme une fonction à optimiser (Osman et Kelly 1996, Alliot et Durand 2005, Chinneck 2006). Le principe des algorithmes génétiques est donc proche de celui des systèmes multi-agents.
- Dans leurs applications : Les algorithmes génétiques sont une des principales techniques utilisées pour modéliser les capacités d’apprentissage individuelles et collectives dans les modèles à base d’agents multiples (Arifovic 2000, Vallée et Yildizoglu 2004, Brenner 2006).

Nous reviendrons sur la question des algorithmes génétiques à la fin de notre travail ¹⁰, lorsque nous intégrerons à notre modèle un algorithme évolutionnaire dérivé de ces algorithmes pour renforcer l’autonomie de certains des agents.

Robert Axelrod et William D. Hamilton

Dans un champ voisin, Axelrod et Hamilton se sont intéressés à l’*évolution de la coopération* (Axelrod et Hamilton 1981, Axelrod 1984). Comment est-il possible, puisque les lois de l’évolution sont dominées par le principe de la sélection naturelle des individus, que des stratégies de coopération soient apparues et se soient maintenues ? Pour étudier cette question, les auteurs ont utilisé la situation classique du jeu du prisonnier pour faire s’affronter dans des tournois répétés différentes stratégies coopératives et non coopératives. Les auteurs montrent comment un petit groupe de stratégies bienveillantes peut ainsi progressivement s’imposer comme stratégie dominante et même résister aux tentatives d’invasion de stratégies plus agressives.

Comme dans les algorithmes génétiques de Holland, les travaux d’Axelrod et Hamilton s’appuient sur la compétition entre un grand nombre d’individus en interactions directes et décentralisées. Comme dans le modèle de ségrégation spatiale de Schelling, ils permettent d’observer l’émergence d’un comportement macroscopique non déductible des propriétés microscopiques du système.

Christopher Langton

Enfin, le concept de *vie artificielle* développé par Langton (1986) vient compléter le dispositif théorique. En utilisant la métaphore de la chimie de synthèse, Langton défend l’idée de la possibilité de synthétiser la vie, d’abord (mais pas seulement) sous

10. Voir chapitre 11, page 286.

la forme d'automates cellulaires résidant dans l'espace abstrait de la mémoire d'un ordinateur. Les « automates virtuels » de Langton se rapprochent encore plus de la notion d'agent autonome, par exemple lorsque Langton les utilise pour modéliser des sociétés d'insectes électroniques.

Il est donc possible de « mettre en culture » dans l'espace virtuel de la mémoire de l'ordinateur des sociétés artificielles peuplées d'automates multiples — représentant des cellules ou des insectes — un peu comme on met en culture des colonies de cellules dans une boîte de Pétri. Pourquoi alors ne pas tenter de faire de même avec des sociétés d'agents économiques ? Avec des macroéconomies ?

2.1.3 Macroéconomie et modèles multi-agents

Un courant critique

Les premiers modèles multi-agents développés dans le champ des sciences économiques étaient utilisés pour relâcher une hypothèse isolée des modèles néoclassiques conventionnels. Cependant, on ne peut tirer tous les avantages de la modélisation à base d'agents multiples si on reste respectueux du cadre théorique du *mainstream* (Axtell 2004, p. 3–4). En effet, alors que dans la plupart des disciplines les modèles multi-agents se sont intégrés comme des compléments des formalismes classiques (Phan 2006), dans le domaine économique, et surtout dans le domaine de la macroéconomie, la plupart des auteurs partisans de l'approche multi-agents expriment de sévères critiques vis-à-vis de l'approche dominante et de sa traduction la plus avancée en matière de modèles de prévision et de décision — les modèles DSGE.

« [...] there can be little doubt today that the current generation of models is so badly misspecified and inappropriately solved that they are little more than caricatures of any real economy. » (Axtell 2004, p. 16)

L'agent représentatif : Parmi les hypothèses théoriques sur lesquelles reposent les modèles d'équilibre général, la notion d'*agent représentatif* focalise les critiques des partisans de la complexité (Kirman 1992, Gallegati et Kirman 1999, Colander, Howitt, Kirman, Leijonhufvud, et Mehrling 2008, Stiglitz et Gallegati 2011)¹¹. Cette

11. Leurs critiques sont proches de la critique des robinsonades macroéconomiques par Tobin (1991) :

« Real Business Cycle models concern Robinson Crusoe economies. A single representative individual is making choices for the whole economy. This simplification enables the model-builder to derive behavior explicitly from rational optimization subject only to constraints of resource availabilities and technology » (Tobin 1991, p. 14)

notion, développée pour contourner les infranchissables difficultés posées par la question de l'agrégation des comportements individuels (Colander *et al.* 2008, p. 236), consiste à réduire le comportement du système économique au comportement d'un seul agent.

« In short, the [representative agent] framework of the DSGE models adopts the most extreme form of conceptual reductionism in which macroeconomics and the financial network are reduced to the behavior of an individual agent. The [representative agent] in economics tantamount to saying that “macroeconomics equals microeconomics.” » (Stiglitz et Gallegati 2011)

L'usage de la notion d'agent représentatif permet de faire abstraction des interactions entre les agents. A partir du moment où l'on considère que l'économie n'est plus peuplée que d'un seul agent, la question des conditions de coordination des actions des agents est évacuée ; la coordination est postulée (Axtell 2004, p. 10).

L'« équilibre » macroéconomique : Le « marché » ne peut être invoqué comme organisme permettant la coordination des agents, parce qu'il est lui aussi modélisé de façon très irréaliste. Là encore, la coordination est postulée : après avoir émis les hypothèses nécessaires à l'existence d'un équilibre unique, on calcule les conditions de cet équilibre, et ce n'est qu'à cet instant que les transactions peuvent avoir lieu.

« For if the model does not allow people to act without knowing the equilibrium value of some variable, then someone must have computed that equilibrium value a priori. In such a model there is no way to describe out-of-equilibrium behavior, and the problem of reconciling peoples' independently conceived plans is assumed to be solved by some unspecified mechanism that uses no scarce resources. » (Howitt 2008, p. 158)

Comme le font remarquer Colander *et al.* (2008), les modèles d'équilibre général ne sont pas complexes, mais les calculs pour les résoudre sont très compliqués. Axtell (2005) montre que, malgré les simplifications radicales des hypothèses de comportement des agents sur le marché, la « complexité de l'échange walrasien » est telle que le calcul des prix d'équilibre sera extrêmement difficile pour l'hypothétique commissaire-priseur chargé de coordonner l'offre et la demande.

« Arrow-Debreu equilibria are sufficiently difficult to compute that the Walrasian picture of market behaviour is simply not plausible. » (Axtell 2005, p. 197)

Les crises : Selon Stiglitz et Gallegati (2011), la crise économique actuelle est l'un des nombreux facteurs qui conduisent à s'interroger sur la solidité et sur les limites de l'approche du « mainstream ». Les auteurs favorables à une approche constructive de la macroéconomie remarquent que les modèles construits sur les bases théoriques de l'équilibre général sont incapables de rendre compte des changements brutaux de régimes et des crises qui affectent de façon imprévisible les économies de marché.

« The best models [policy-makers] have are of two types, both with fatal flaws. Type one is econometric: empirical statistical models that are fitted to past data. These successfully forecast a few quarters ahead as long as things stay more or less the same, but fail in the face of great change. Type two goes by the name of “dynamic stochastic general equilibrium”. These models assume a perfect world, and by their very nature rule out crises of the type we are experiencing now. » (Farmer et Foley 2009, p. 685)

Or, ce n'est pas parce que des événements sont imprévisibles qu'ils sont inexplicables. Ainsi, bien que les chercheurs soient incapables de prévoir avec précision les tremblements de terre, la théorie de la tectonique des plaques ne les laisse pas inexplicables (Epstein 1999, p. 55). La crise économique et financière actuelle n'a pas seulement révélé le besoin de repenser fondamentalement la façon de réguler les systèmes financiers ; elle a aussi fait éclater au grand jour la faillite collective des économistes (Colander, Föllmer, Haas, Goldberg, Juselius, Kirman, Lux, et Sloth 2009, p. 2).

Pour une macroéconomie multi-agents

Pour nous, cependant, les partisans d'une approche centrée sur la complexité des économies de marchés ne devraient pas passer trop de temps à critiquer les modèles d'équilibre général, dont les limites sont bien connues, y compris de leurs partisans. L'important est de construire des modèles peuplés d'agents multiples constituant une alternative valable aux modèles existants, en particulier pour la décision et la prévision.

Bien sûr, les plus chauds partisans de l'approche multi-agents se projettent dans l'avenir et voient dans leurs modèles les prémisses d'un grand bouleversement théorique (Axtell 2004, Arthur 2006, Gaffeo, Catalano, Clementi, Delli Gatti, Gallegati, et Russo 2008, Farmer et Foley 2009, Delli Gatti, Gaffeo, et Gallegati 2010).

« [...] this movement is not a minor adjunct to neoclassical economics; it is something more than this. It is a shift from looking at economic problems at equilibrium to looking at such problems out of equilibrium,

a shift to a more general economics — an out-of-equilibrium economics. »
(Arthur 2006, p. 1553)

Sur la base de ce mouvement théorique, on peut imaginer des modèles massivement multi-agents et ultra-réalistes, capables d’explorer quantitativement les réactions probables des systèmes économiques selon différents scénarios. Ces modèles pourraient contester aux modèles DSGE la place de modèles de décision et de prévision auprès des décideurs économiques.

« In principle it might even be possible to create an agent-based economic model capable of making useful forecasts of the real economy, although this is ambitious. » (Farmer et Foley 2009, p. 686)

Nous en sommes encore loin. Malgré des tentatives sans cesse plus nombreuses et plus audacieuses, les modèles macroéconomiques multi-agents restent des modèles de recherche et ne peuvent *pour le moment* aucunement prétendre pouvoir fournir des préconisations de politique économique.

« At present, [agent-based models] are still far too simple to bring directly to policy; they are, at best, suggestive. Thus, researchers must be careful about drawing anything other than suggestive inferences about macro policy from the models. » (Colander, Howitt, Kirman, Leijonhufvud, et Mehrling 2008, p. 239)

Des modèles peuplés de modèles

Mais qu’est-ce qu’un *agent* ? Selon la définition de Franklin et Graesser (1996), un *agent autonome* est « un système situé dans un environnement tout en en faisant partie, qui perçoit cet environnement et qui agit sur lui, dans le temps, en poursuivant ses propres objectifs, afin de modifier ce qu’il percevra dans le futur ».

Un agent n’est donc pas nécessairement un objet informatique : une entreprise, un ménage du monde réel sont des agents. Inversement, un objet informatique peut être un agent informatique, situé dans un environnement informatique. Moins un agent informatique sera capable d’agir de sa propre initiative, moins il pourra être considéré comme autonome et se rapprochera de la notion de simple automate informatique. Par facilité, nous utiliserons généralement le terme d’*agent* pour désigner un agent électronique autonome, c’est-à-dire un automate informatique doué d’une certaine capacité d’agir sur son environnement, de sa propre initiative, et selon des objectifs qui lui sont propres.

Un agent est un système. Pour qu’il soit doué d’une certaine autonomie, il ne peut être tout à fait simple — sans pour autant être nécessairement complexe, puisqu’un thermostat, d’après Franklin et Graesser (1996, p. 5), est un agent autonome. Un

modèle multi-agents est donc un système complexe peuplé d'un grand nombre de systèmes plus ou moins simples. Mais un modèle multi-agents est aussi le modèle d'un système complexe réel, peuplé d'agents réels. Les agents du modèle sont donc aussi des modèles des agents du monde réel. Un modèle macroéconomique multi-agents est donc *un modèle peuplé de modèles*, eux aussi à construire.

2.2 Des agents autonomes dans un environnement complexe

L'autonomie des agents est un élément très important du modèle que nous voulons construire, puisqu'elle est la propriété individuelle qui correspond au caractère décentralisé des économies de marchés. D'après la définition de Franklin et Graesser (1996), un agent autonome doit agir aujourd'hui sur son environnement dans l'objectif d'obtenir certains retours de l'*environnement futur*¹². Or, le modèle que nous voulons construire est celui d'un système dynamique complexe. Il est peuplé d'agents concurrents, agissant en parallèle. Les agents sont placés dans une situation d'*incertitude stratégique*, et cette incertitude est endogène au modèle.

« In a complex economy, since the consequences of individual choices depend on what all the others are autonomously doing, people take actions into an environment characterized by radical or endogenous uncertainty. »
(Delli Gatti, Gaffeo, et Gallegati 2010, p. 15)

La présente section a pour objet de montrer comment le principe de *rationalité procédurale*, développé par les chercheurs de l'université de Carnegie Mellon, est utile pour modéliser le comportement d'agents autonomes dans le contexte d'incertitude propre aux systèmes complexes.

2.2.1 Des anticipations rationnelles à la rationalité limitée

Dans le contexte d'une économie dynamique et complexe, les calculs traditionnels de maximisation sont inopérants et les agents ne peuvent former d'« anticipations rationnelles » au sens néoclassique du terme¹³. La microéconomie néoclassique ne

12. Cette section reprend en grande partie une discussion développée dans Seppecher (2010b).

13. Sargent souligne que la théorie des anticipations rationnelles repose sur l'hypothèse d'une cohérence absolue des représentations des agents : « The idea of rational expectations has two components : first, that each person's behavior can be described as the outcome of maximizing an objective function subject to perceived constraints ; and second, that the constraints perceived by everybody in the system are mutually consistent. The first part restricts individual behavior to

peut être mobilisée pour modéliser le comportement des agents. Simon (1986, p. 223) recommande d'ailleurs de cesser de débattre de la pertinence de la théorie de la « rationalité substantive » et de la notion de maximisation de fonctions d'utilité : pour Simon, il est évident qu'elles ne permettent pas d'expliquer ni de prévoir le comportement économique.

Il faut donc construire un modèle de rationalité alternatif. Selon Farmer et Geanakoplos (2009), l'une des principales difficultés d'une telle construction réside dans la multiplicité des modèles possibles¹⁴.

« While perfect rationality defines a unique or nearly unique model of the world, there are an infinite number of boundedly rational models. To paraphrase Christopher Sims, once we depart from perfect rationality, there are so many possible models it is easy to become lost in the wilderness of bounded rationality. » (Farmer et Geanakoplos 2009, p. 17)

Selon Farmer et Geanakoplos, le modélisateur se trouve alors placé devant l'alternative suivante :

- soit doter les agents d'un ensemble de règles de réaction simples,
- soit doter les agents de capacités d'apprentissage.

2.2.2 De la rationalité limitée à la rationalité procédurale

La première des solutions proposée par Farmer et Geanakoplos — la modélisation du comportement des agents par l'introduction d'un ensemble de règles simples définies par le modélisateur — est la plus facile à mettre en oeuvre, et c'est sur elle que nous allons nous appuyer pour construire le modèle. La seconde des solutions — l'introduction d'un modèle d'apprentissage — sera discutée dans la troisième partie de ce travail¹⁵.

On classe habituellement dans le champ de la « rationalité limitée », l'ensemble des théories de la décision économique qui ne font pas appel au calcul de probabilité

be optimal according to some perceived constraints, while the second imposes consistency of those perceptions across people. In an economic system, the decisions of one person form parts of the constraints upon others, so that consistency, at least implicitly, requires people to be forming beliefs about others' decisions, about their decision processes, and even about their beliefs. » (Sargent 1993, p. 6)

14. Voir aussi Sargent : « The commitment to equilibrium theorizing made many choices for him by requiring that people be modelled as optimal decision-makers within a commonly understood environment. When we withdraw the assumption of a commonly understood environment, we have to replace it with *something*, and there are so many plausible possibilities ». (Sargent 1993, p. 2)

15. Chapitre 11, page 286.

ni à la maximisation d'une fonction d'utilité (Simon 1997, p. 291). Toutefois, la notion de *rationalité limitée* développée par Simon par opposition à ce qu'il appelle la *rationalité substantive* propre à la microéconomie néoclassique semble impliquer une limitation des capacités cognitives des agents, ce qui n'est pas notre sujet. C'est pourquoi nous préférons nous référer à la notion de *rationalité procédurale*, plus précise et qui correspond mieux au comportement d'agents rationnels placé dans un contexte d'incertitude radicale (Simon 1996, pp. 26–27). Cette *rationalité procédurale* consiste à élaborer et mettre en oeuvre des *heuristiques*, c'est-à-dire des méthodes approximatives de recherche de solution à des problèmes complexes¹⁶.

« Heuristic methods provide an especially powerful problem-solving and decision-making tool for humans who are unassisted by any computer other than their own minds, hence must make radical simplifications to find even approximate solutions. [...] In the face of real-world complexity, the business firm turns to procedure that find good enough answers to questions whose best answers are unknowable. » (Simon 1996, p. 28)

D'ailleurs, selon Cyert et March (1963), les entreprises utilisent *effectivement* des procédures routinières qui permettent de réduire la complexité et l'incertitude.

« In most of the firms we have studied, price and output decisions were almost as routinized as production line decisions. Although the procedures changed over time and the rules were frequently contingent on external feedback, price and output were fixed by recourse to a number of simple operating rules. What was apparently a complex decision problem involving considerable uncertainty was reduced to a rather simple problem with a minimum of uncertainty. » (Cyert et March 1963, p. 104–105)

Parce qu'elle est un moyen rationnel d'affronter l'incertitude, l'utilisation de ces procédures simples et efficaces (« rules of thumb ») n'est pas incompatible avec la définition d'agents intelligents (Howitt 2008, p. 160).

2.2.3 L'ajustement comme principe directeur

Puisque dans un environnement dynamique et complexe, les anticipations sont sans cesse déjouées, les agents doivent sans cesse ajuster leur comportement en fonction des résultats obtenus.

16. « A heuristic is a method that is not guaranteed to find the optimum, but usually gives a very good solution, though it cannot guarantee to do even that every time. Heuristics are “quick and dirty” methods, generally relatively fast and relatively good. » (Chinneck 2006, p. 1)

« The organization seeks to avoid uncertainty by following regular procedures and a policy of reacting to feedback rather than forecasting the environment [...] The organization uses standard operating procedures and rules of thumb to make and implement choices. In the short run these procedures dominate the decisions made. » (Cyert et March 1963, p. 113)

Pour gouverner le comportement des agents, le principe cybernétique de rétroaction (« feedback ») constitue une alternative simple à la formation d'anticipations exactes.

« Dans les cas simples, l'incertitude venant d'événements exogènes peut être maîtrisée en estimant les probabilités de ces événements, comme le font les compagnies d'assurance, mais habituellement à un coût plus important en terme de complexité computationnelle et de collecte d'information. Une autre solution est d'utiliser des *feedbacks* pour corriger les effets d'événements inattendus ou incorrectement prévus. Même si l'anticipation des événements est imparfaite et si la réponse qu'on leur fait est imprécise, les systèmes adaptatifs peuvent rester stables face à des secousses importantes : les *feedbacks* les ramenant continuellement sur la trajectoire programmée après chaque choc qui les a déplacé. » (Simon 2004, p. 79)

Selon Simon, les systèmes adaptatifs combinent généralement les mécanismes de *feedback* avec des mécanismes homéostatiques¹⁷ basés sur la maintenance de stocks de ressources destinés à amortir les chocs inattendus :

« Peu de systèmes adaptatifs ayant été forgés par l'évolution ou façonnés par l'homme dépendent de la prédiction comme moyen principal pour faire face au futur. Deux mécanismes complémentaires pour traiter les changements de l'environnement externe sont souvent plus efficaces que la prédiction : les mécanismes homéostatiques qui rendent le système relativement insensible à l'environnement et l'ajustement par *feedback* rétrospectif aux variations de cet environnement. Ainsi un stock de produits finis permet à l'usine de fonctionner sans s'inquiéter des fluctuations à très court terme dans les commandes [...] Les mécanismes homéostatiques sont spécialement utiles pour traiter les fluctuations à court terme dans l'environnement, et de ce fait, rendent la prédiction inutile à courte échéance. Les mécanismes de *feedback*, par ailleurs, en répondant continuellement aux écarts existants entre les états réels et désirés

17. Voir la définition de l'homéostasie par Cannon (1932, cité page 22), noter la proximité du principe de « feedback » des cybernéticiens avec celui de « self-righting adjustment » de Cannon.

d'un système, adaptent sans prévisions celui-ci aux fluctuations à longue échéance de l'environnement : quelles que soient les directions dans lesquelles il change, l'ajustement par *feedback* les suit, avec, bien sûr, un certain délai. » (Simon 2004, p. 265-266)

2.2.4 Agrégation ou désagrégation ?

La complexité place dans la même situation d'incertitude stratégique les agents économiques du monde réel et les agents artificiels des modèles.

« The real economic world almost certainly shares much more in common with computational worlds of boundedly rational agents co-evolving with one another than it does to worlds of fully rational agents in fixed-point-equilibrium configurations. This is so because no agent ever knows enough to figure out how it should behave from here to eternity, whether a human or a software agent. » (Axtell 2007, p. 114)

Face à cette incertitude, les agents du monde réel ne cherchent pas à optimiser, ils utilisent des procédures d'ajustement jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant. Pour modéliser le comportement des agents artificiels qui peuplent les modèles complexes, on est conduit à s'inspirer plus étroitement du comportement des agents du monde réel (Cohen 1960, p. 536).

La question qui se pose alors est : « comment allons-nous agréger tout ça ? » (Simon 1992, p. 20). Pour Simon, la construction d'un modèle agrégé peuplé d'agents réalistes pose des difficultés considérables.

« At the micro level, we already have most of the components we need to substitute a realistic theory of the firm for the fictitious theory that now occupies the textbooks. More work will be needed before these results can be aggregated confidently to the macro level. » (Simon 1992, p. 4)

Cohen, lui, a compris que dans un modèle peuplé d'agents multiples, il n'y a plus aucun problème d'agrégation.

« [...] such an approach would not involve any of the traditional "pitfalls of aggregation", for the aggregation process would consist in a straightforward summation of the values of the variables pertaining to each individual firm [...] » (Cohen 1960, p. 537)

Les problèmes qui se posent sont plutôt des problèmes de « désagrégation » : comment simuler les interactions directes de milliers d'agents autonomes dans un seul modèle ?

Cela n'est possible qu'avec des moyens informatiques beaucoup plus puissants que ceux que Cohen avait à sa disposition dans les années 1960¹⁸.

2.3 L'ordinateur émancipateur

Cohen est sans doute le premier auteur à avoir formulé un projet de modèle macroéconomique peuplé d'agents multiples¹⁹. Il est aussi l'un des tous premiers auteurs à avoir compris le rôle que les ordinateurs pouvaient jouer dans la libération de la pensée économique en dépassant les limitations imposées par le cadre analytique traditionnel.

« The main advantage of using computer simulation as a tool in economics is to provide a concrete procedure for formulating and testing hypotheses. A frequent objection raised against traditional mathematical models of economic systems is that these models are too unrealistic for their intended purposes. This is often true, because adding realism requires adding complexity as well. Since traditional mathematical models are intended for analytical solution, their complexity and realism must be severely limited. Computer models, however, can be made as complex and realistic as our theories permit, for analytical solutions to these models are unnecessary. No matter how complicated the formulation of the model, simulation techniques enable us to trace the consequences inherent in it. Hence, microeconomic theories can be cast into precise models without distortion of the meaning embodied in these theories, and the description of the world implied by such theories can be readily determined. » (Cohen 1960, p. 2)

Si Cohen pouvait déjà percevoir au tout début des années 1960 l'importance des simulations informatiques pour la science économique, pourquoi a-t-il fallu attendre les années 1990 pour voir apparaître les premiers modèles « agent based computational economics » ? Pourquoi aujourd'hui encore l'idée d'utiliser des modèles macroéconomiques peuplés d'agents multiples pour la prévision et la décision paraît-elle relever de la science fiction (Buchanan 2009) ?

18. Cohen en était parfaitement conscient : « This approach to aggregate economic model-building would be hopelessly impractical without the use of electronic digital computers possessing high operating speeds and large memory capacities. » (Cohen 1960, p. 537)

19. Voir page 28.

2.3.1 La question matérielle

On a vu qu'un modèle multi-agents est un modèle composé de modèles nombreux²⁰. Exécuter une simulation dans un modèle multi-agents, c'est donc exécuter simultanément autant de simulations de modèles individuels que le modèle « agrégé » compte d'agents. Plus le modèle est complexe, c'est-à-dire plus il compte d'agents et plus ces agents sont eux mêmes compliqués — parfois même complexes — plus le nombre de calculs à effectuer pour l'exécution d'une simulation est important. De plus, nous verrons dans la deuxième partie de ce travail que l'exploration d'un modèle multi-agents réclame l'exécution d'un grand nombre, voire d'un très grand nombre de simulations.

Les modèles multi-agents sont donc très exigeants en puissance de calcul. Tant que les chercheurs n'ont pu disposer d'ordinateurs suffisamment puissants, les applications de l'approche dite « de la complexité » sont donc restées virtuelles.

« [...] until recently, the high-powered computers and mathematics to explore the alternative complexity simplification path did not exist, so the complexity approach was not viable. » (Colander 2008, p. 9)

Cependant, comme le remarque Axtell, avec la croissance exponentielle de la puissance des machines, les partisans des modèles multi-agents ont « l'histoire dans leur camp ». Axtell nous emporte alors dans son enthousiasme :

« While models having 100 – 1000 agents were state-of-the-art at the end of the 20th Century, models of 10K – 100K agents are relatively easy to create and manipulate today. Over the next few years models on the scale of 1 million – 10 million agents will become commonplace. Such models call out for application to macroeconomics ! » (Axtell 2004, p. 12)

Mais Axtell nous ramène aussitôt au réel : la question de la puissance est secondaire, et la difficulté essentielle est d'ordre logiciel.

« However, the main impediment to fully implementing the [multi-agent systems] macro research program is not hardware but software. » (Axtell 2004, p. 12)

2.3.2 La question logicielle

La puissance d'un ordinateur n'est rien sans les logiciels capables d'en tirer parti. Or, même si on observe de plus en plus de tentatives de développement de plateformes logicielles dédiées à la modélisation multi-agents, il n'existe pas de logiciel universel

20. Section 2.1.3, page 34.

de simulation dans lequel il suffirait de rentrer les spécifications d'un modèle original avant de le laisser s'exécuter. De nos jours — et nous le croyons, pour longtemps encore — construire un modèle multi-agents original réclame nécessairement un effort important de programmation.

Bien sûr, il n'est pas nécessaire qu'un économiste sache programmer pour qu'il puisse se lancer dans la construction d'un modèle basé sur des agents multiples ; il peut très bien s'associer à un programmeur chargé de la réalisation de la partie informatique du modèle — ce qu'on appelle l'*implémentation*. Pourtant, à notre avis, les économistes auraient tort de considérer les questions d'implémentation et de programmation comme purement techniques.

Un langage théorique naturel

Les économies de marché sont des systèmes dynamiques et complexes. Dans la modélisation de ces systèmes, les notions de processus et d'interactions prennent le pas sur celle d'équilibre.

« [...] we are starting to study the economy out of equilibrium. This way of doing economics calls for an algorithmic approach. » (Arthur 2006, p. 1063)

La structure d'un programme informatique est algorithmique, c'est pourquoi l'outil informatique est particulièrement adapté à la modélisation des systèmes dynamiques complexes.

« The basic advantage of computer models is that they provide a language within complex dynamic models can be constructed. » (Cyert et March 1963, p. 234)

Néanmoins, un modèle informatique doit être considéré comme un modèle mathématique, mais d'un genre très différent des modèles habituels.

« A computer program is also literally a system of difference equations — albeit of a rather unorthodox kind. » (Simon 1992, p. 100)

Un programme informatique n'est pas la partie technique d'un modèle, il en est la version complète, la mieux formalisée.

« (...) an ACE model is a model as much as a more traditional mathematical economics model is. That is, the computer program in itself is the (possible) explanation of some real phenomena. » (Vriend 2006, p. 1050)

C'est pour cela que la programmation fait partie entière de la modélisation et que l'on peut trouver dans un langage de programmation le *langage théorique naturel* pour la description et la modélisation des processus économiques et sociaux complexes²¹.

« The quasi resolution of conflict, uncertainty avoidance, problemistic search, and organizational learning are central phenomena with which our models must deal. On our judgment, the natural theoretical language for describing a process involving these phenomena is the language of a computer program. » (Cyert et March 1963, p. 125)

L'économiste intéressé par les phénomènes complexes aurait donc tort de se désintéresser des questions d'implémentation et de programmation qui le conduisent à aborder de façon plus concrète l'objet de son étude, en l'amenant à se poser les bonnes questions et en libérant sa pensée des limites de l'analyse formelle. Pour Tesfatsion, l'enseignement d'un langage de programmation devrait faire partie des cursus économiques.

« [...] programming frees us to adapt the tool to the problem rather than the problem to the tool. Every graduate economics program should incorporate general programming language requirements. It is time. » (Tesfatsion 2006, p. 866)

La programmation orientée objet

Si les chercheurs de l'université de Carnegie Mellon ont très tôt identifié l'importance théorique des langages de programmation informatiques, ils ont aussi ressenti le besoin de langages supérieurs, plus adaptés à leurs projets de modélisation des systèmes complexes.

« The final problem limiting further work with computer models is the need to develop more suitable programming languages. Our ability to work flexibly and rapidly with computer models is currently hampered by the state of the programming art. Once a computer model has been fully specified in flow chart form, the task of programming and running the model should be almost automatic. Some of the various algebraic compilers now available for digital computers are reasonably suitable, but they can be considerably improved to facilitate work with computer models. » (Cohen 1960, p. 540)

21. « In computer programming languages, I found tools that classical mathematical languages had not provided for exploring the processes of human thinking and for attaining accuracy and rigor in the behavioral and social sciences. » (Simon 1991, p. 214)

En effet, le développement de la modélisation de systèmes complexes est resté longtemps limité par les premiers langages de programmation. Ce n'est qu'avec le développement des langages de *programmation orientée objet* dans les années 1980 (*Smalltalk*, *Objective C*, *C++*) et 1990 (*Java*) que les chercheurs ont enfin pu disposer de langages vraiment adaptés à la modélisation des systèmes peuplés d'agents multiples (Axtell 2006, p. 142).

L'histoire de la programmation orientée objet est intimement liée à celle de la simulation informatique des systèmes dynamiques complexes. *Simula*, le premier des langages informatiques qui avança les notions essentielles du paradigme orienté objet dans les années 1960, était conçu pour la *simulation à événements discrets*. Les langages modernes qui en descendent obéissent tous au même principe général, exposé par Wegner (1990), de décomposition des problèmes complexes en un système coopératif de sous-problèmes plus simples.

« Splitting a large task into components is a time-honored method of managing complexity, variously referred to as “divide and conquer” and “separation of concerns”. » (Wegner 1990, p. 13)

La structure d'un programme orienté objet est une structure hiérarchique, à l'image de la plupart des systèmes complexes. Mais cette structure est modulaire, ce qui permet une grande souplesse dans la conception du programme et lors de son évolution ultérieure.

La notion d'*objet* est à la base de la modularité de ces langages de programmation. Au sens informatique, un objet est une unité intégrée de données (les *propriétés*) et de procédures (les *méthodes*) qui permettent d'agir sur ces données. Données et procédures peuvent être *encapsulées* dans l'objet : la structure interne de l'objet est alors cachée aux autres objets, seuls les méthodes de l'objet lui-même peuvent directement manipuler ses propriétés. Comme un objet peut être lui-même composé d'objets, on peut facilement construire des objets complexes à partir d'objets simples, selon une *démarche ascendante* (« bottom up »). Au plus haut niveau de la hiérarchie, le programme lui-même est « une collection d'objets en interactions » (Wegner 1990, p. 21). Enfin, on peut doter un objet des procédures destinées à agir sur le milieu extérieur dans le but de maintenir une certaine stabilité de son milieu intérieur, et l'objet devient *agent autonome*.

Un laboratoire virtuel

Un avantage remarquable des modèles informatiques est leur malléabilité. Avant même l'apparition des premiers langages de programmation orientée objet, Cohen vantait déjà la souplesse des modèles informatiques.

« A further advantage of computer models is the ease of modifying the assumptions of the theory. When suitable programming languages become available, relations can be inserted, deleted, or changed in the model, and only local changes, which can be quickly made, will be required in the computer program. » (Cohen 1960, p. 536)

Le modèle peut facilement être modifié, enrichi ou simplifié, et les conséquences de ces modifications peuvent être immédiatement testées : « Le modélisateur se transforme ainsi progressivement en expérimentateur, réalisant des mesures dans des conditions expérimentales sur un objet virtuel. » (Amblard, Rouchier, et Bommel 2006, p. 85)

On a vu comment Langton, avec le concept de *vie artificielle*, avait ouvert la voie à une « récréation » *in silico* de sociétés d'organismes vivants²². Les modèles multi-agents permettent d'étendre cette idée à n'importe quel système naturel ou artificiel composé d'agents autonomes, y compris aux sociétés humaines.

« Once one has devised a computer program that mimics the desired characteristics of the system in question one can then use the program as a “culture dish” in which to perform experiments. » (Howitt 2008, p. 157)

Le modèle devient alors un véritable « laboratoire virtuel » grâce auquel le chercheur va pouvoir se livrer des expériences qui sont hors de sa portée dans le monde réel.

Ferber (2006, p. 16) distingue deux temps dans la réalisation d'un modèle multi-agents :

- dans un premier temps on réalise un laboratoire virtuel qui reprend en miniature les caractéristiques du « système cible » ;
- dans un deuxième temps, on pratique des expérimentations, déplaçant des individus, changeant leur comportement, modifiant les conditions environnementales.

Dans la pratique, les deux temps distingués par Ferber sont intimement liés et cet aller et retour dialectique entre modélisation et exploration est très fécond. Ferber souligne que la compréhension du système cible s'élabore progressivement, au fur et à mesure de sa reconstruction. Cette vision n'est pas issue d'une « abstraction du monde réel », mais d'une « récréation d'un monde artificiel ». Avec ce type de modèle, le chercheur élabore des hypothèses et peut les tester « *in vitro* » en utilisant les mêmes types d'observation que dans le monde réel, en appliquant aux données obtenues les mêmes traitements statistiques afin de vérifier les hypothèses émises²³.

22. Voir la section consacrée à Christopher Langton, page 30.

23. Cette démarche, peu habituelle en économie, est de plus en plus en répandue dans de nombreux domaines des sciences expérimentales : « [...] agent-based models are the social-science analogue of the computational simulations now routinely used elsewhere in science to explore complex nonlinear processes such as the global climate. » (Buchanan 2009, p. 680)

« Ainsi, à la différence des approches classiques, un [système multi-agents] n'est pas une boîte noire, et la simulation multi-agents ne se réduit pas à l'implémentation d'un modèle et à l'analyse de sa réponse en fonction des paramètres d'entrées, mais participe au processus de recherche de modèles. » (Ferber 2006, p. 16)

2.3.3 Questions d'implémentation

Les questions d'implémentation sont aussi des questions de modélisation, c'est-à-dire des questions qui intéressent l'économiste. Pour le montrer, nous avons dressé une liste organisée des questions qui se sont présentées à nous lors de l'implémentation du modèle. Cette liste n'est pas complète, mais elle permet de se faire une représentation des problèmes concrets qui se posent au programmeur-modélisateur.

Il faudrait en théorie avoir pu répondre à toutes ces questions avant de commencer à programmer le modèle. Dans les faits, c'est en programmant que les questions surgissent et conduisent le modélisateur à retourner à la théorie économique et à l'observation du monde réel pour trouver une réponse. Nous verrons cependant que ni la théorie économique (souvent trop abstraite) ni la réalité (souvent trop complexe) ne permettent de répondre à la question du degré de réalisme et de complexité à donner au modèle. Deux principes permettent au modélisateur de se décider :

- écartier les éléments de complexité qui apportent peu au modèle,
- préserver la possibilité d'étendre le modèle aux éléments de complexité dont on a dû faire dans un premier temps abstraction.

Agents

Les premières questions que doit résoudre le modélisateur multi-agents ont bien sûr trait aux agents qui vont peupler son modèle. Qui sont-ils ? Doivent-ils être multiples ? Si oui, dans quelle mesure doivent-ils être hétérogènes ? Quel doit être leur degré d'autonomie ?

Types : Un modèle multi-agents peut être peuplé d'*agents d'un même type*, ou d'*agents de types différents*. Cette question est très importante, car en typant les agents, on donne au modèle une structure particulière qui sera très difficile à remettre en cause ultérieurement.

Différents types d'agents du monde réel doivent être représentés par différents types d'objets. Par exemple, dans un petit modèle de dynamique des populations *proies-prédateurs*, on pourrait modéliser trois types d'agents *loups*, *chèvres* et *choux*

aux propriétés et aux comportements bien différents. Mais si l'on veut modéliser une société capitaliste, doit-on créer un seul type d'agent pour représenter les ménages, ou bien faut-il créer un type *ménage capitaliste*, et un autre type *ménage travailleur* ? D'un côté, distinguer les deux permet de modéliser différemment les deux agents, ne serait-ce par exemple que pour leur donner des comportements d'épargne différents. D'un autre côté, les distinguer en tant que types d'objets différents interdit *structurellement* de pouvoir développer un modèle de mobilité sociale : un ménage *travailleur* ne pourrait jamais devenir *capitaliste*... Bien sûr on pourrait trouver des solutions, en faisant appel à des techniques de programmation avancées ; ces problèmes sont connus de l'ingénierie logicielle et des modèles de solutions (« design patterns ») ont été développés pour y répondre. Mais se poser ces questions, c'est à la fois s'interroger sur le modèle que l'on veut construire et sur la société que l'on cherche à modéliser : la mobilité sociale est-elle un phénomène suffisamment important, *par rapport à l'objet de mon étude*, pour que je fasse l'effort de la prendre en compte ou puis-je me permettre d'en faire abstraction ? Enfin, même si je choisis pour le moment d'en faire abstraction, n'est-il pas intéressant de réserver la possibilité d'en tenir compte plus tard ?

Multiplicité : Un modèle multi-agents est un modèle peuplé d'*un grand nombre d'agents*. Mais, selon le type d'agents, est-ce toujours nécessaire ?

Supposons par exemple un modèle multi-agents d'une économie virtuelle composée de deux types d'agents, ménages et entreprises, présents en grand nombre. Les ménages travaillent et épargnent, les entreprises produisent et ont des besoins de financement. On décide alors de construire un troisième type d'agent, un agent financier, sorte de caisse d'épargne ou banque d'investissement, qui collecterait l'épargne des ménages pour la mettre à disposition des entreprises. Parce que le modèle est *multi-agents*, faut-il pour autant un grand nombre d'établissements financiers ? Rien ne nous y oblige, un seul agent représentatif du secteur financier peut très bien faire le travail. Evidemment, on fait alors abstraction de toutes les interactions internes au secteur financier, mais si ces interactions ne sont pas l'objet de notre étude, cela n'est pas gênant. Au contraire, en en faisant abstraction, les comportements dynamiques émergeant des interactions entre ménages et entreprises seront plus faciles à interpréter.

Et puis, si l'on prend soin dès la conception de l'agent financier de penser à préserver les possibilités d'une extension future, on pourra plus tard, si l'envie nous en prend ou si le besoin s'en fait sentir, *désagrégier* le secteur financier pour le remplacer par un grand nombre d'agents financiers en interaction — ce qui permettrait, par exemple, d'aborder les questions de fragilité financière. *La complexité est une décision*

(Legay 1997, p. 18), mais cette décision doit être motivée.

Hétérogénéité : Un modèle multi-agents est un modèle peuplé d'agents *hétérogènes*. L'hétérogénéité des agents est un élément très important des modèles multi-agents : à quoi bon peupler un modèle d'un grand nombre d'agents si tous ces agents sont identiques ?

Il doit donc y avoir hétérogénéité au sein même d'une même classe d'agents, c'est-à-dire entre des agents d'un même type. Cette hétérogénéité est une affaire de paramètres (les valeurs des *propriétés* des agents diffèrent) tandis que l'hétérogénéité des types d'agents est une affaire de structure (les *méthodes* des agents diffèrent).

Les propriétés des agents peuvent être classées en trois types :

Les paramètres : variables exogènes, elles sont imposées par le modélisateur généralement au début d'une simulation. Elles peuvent être modifiées d'une simulation à une autre (ces modifications distinguant des *scénarios*) ou au cours de la simulation (ces modifications constituant alors un *choc exogène*). En manipulant les paramètres, le modélisateur peut faire varier l'hétérogénéité des agents à volonté. Par exemple, dans un modèle d'*évolution de coopération*²⁴, on peut attribuer à tous les agents une propension à coopérer identique ou bien des propensions hétérogènes uniformément réparties dans l'espace des paramètres, ou bien encore répartir les agents en deux groupes, l'un tout à fait coopératif et l'autre pas du tout...

Les variables d'état : elles constituent en quelque sorte le *milieu intérieur* de l'agent. Elles sont déterminées de façon endogène par les interactions de l'agent avec son milieu extérieur. Elles sont généralement identifiables à des stocks de ressources que l'agent va chercher à accroître ou à maintenir. On peut citer en exemple les réserves nutritives d'une cellule ou d'un organisme, l'épargne d'un ménage, les stocks d'inventaire d'une entreprise... Parce qu'elle est endogène, l'hétérogénéité des variables d'état est la plus intéressante des sources d'hétérogénéité des agents.

Les variables de contrôle : elles sont directement déterminées par l'agent et vont agir indirectement sur le milieu (intérieur et extérieur) de l'agent. Le changement de la valeur d'une variable de contrôle fait l'objet d'une *décision* : lorsque l'agent constate un déséquilibre entre une variable d'état et son objectif pour cette variable, il ajuste la valeur de la variable de contrôle *dans l'espoir* de rétablir l'équilibre de la variable d'état. Il n'est pas toujours simple de déterminer ce qui est variable de contrôle et ce qui est variable d'état : par exemple, un

24. Voir la section consacrée à Robert Axelrod, page 30.

ménage cherche-t-il à maintenir son épargne en ajustant sa consommation ou à maintenir sa consommation en ajustant son épargne ?

Autonomie : Un modèle multi-agents est peuplé d'*agents autonomes*²⁵. L'autonomie des agents est l'élément décisif qui distingue ces modèles des modèles les plus simples de vie artificielle, des algorithmes génétiques et autres modèles à base d'automates cellulaires. Les modèles multi-agents sont des sociétés artificielles dans lesquelles tous les agents ne marchent pas d'un même pas. Comment modéliser cette autonomie, et jusqu'où étendre cet effort ?

Il faut d'abord remarquer que l'autonomie d'un agent électronique, si grande soit-elle, est toujours simulée. Un modèle multi-agents n'est jamais qu'un programme informatique, c'est-à-dire un algorithme, une suite d'instructions exécutées par l'ordinateur de façon déterministe. Néanmoins, il est possible, par divers moyens que nous allons examiner (hétérogénéité des états, stochasticité, cognitivité), de faire « comme si » les agents disposaient d'une réelle autonomie par rapport au programme, et donc aussi par rapport au modélisateur.

Hétérogénéité des états : c'est la source primaire d'autonomie des agents. Parce que les agents prennent leur décision par rapport à leur propres variables d'état, et non par rapport à l'état macroscopique du système, les décisions des agents sont différentes. Ainsi, dans le modèle de ségrégation spatiale de Schelling, l'autonomie des agents est très réduite, leur hétérogénéité aussi. Toute leur autonomie réside dans le fait qu'ils ne se préoccupent pas de la mixité moyenne réelle du système, ni de la satisfaction moyenne des autres agents. Leur satisfaction dépend de la mixité ressentie individuellement dans leur voisinage immédiat. S'ils se sentent trop minoritaires, ils ne sont plus satisfaits, et déménagent. C'est l'enchaînement de ces petites insatisfactions locales (ou déséquilibres locaux), chacune entraînant un déménagement (un ajustement local), susceptible de créer deux nouveaux foyers d'insatisfaction (à l'endroit d'où l'agent est parti, et à l'endroit où il arrive) qui conduit au bout du compte à l'émergence d'une ségrégation spatiale massive. Si les agents se prononçaient non pas en fonction de leur état mais en fonction de l'état moyen ou général du système, les résultats seraient très différents : rien n'émergerait — le système ne serait pas complexe. Le modélisateur multi-agents doit donc être très attentif, quand il dessine les fonctions de comportement des agents, à ce que les agents prennent réellement leurs décisions en fonction de leur état individuel, et non en fonction d'informations agrégées par un moyen quelconque. Toute exception à ce principe doit être motivée.

25. Voir la section consacrée aux modèles peuplés de modèles, page 34.

Stochasticité : c'est une source éventuelle d'autonomie des agents. Elle consiste à introduire une part de hasard dans leurs fonctions de réaction. Le comportement des agents n'est alors plus déterministe, mais probabiliste. Par exemple, dans les modèles traditionnels de ségrégation spatiale, les agents réagissent de façon automatique à un dépassement du seuil de tolérance : placés dans les mêmes conditions de voisinage tous réagissent de la même façon. On pourrait imaginer au contraire une fonction de réaction telle que la probabilité d'un déménagement dépendrait de l'excès de voisins « différents » par rapport au seuil de tolérance. Cela ne changerait très certainement pas grand chose aux résultats du modèle de Schelling, dans lequel les agents agissent de façon séquentielle (les uns après les autres) ; en revanche, cette façon d'introduire de l'hétérogénéité dans les réactions des agents peut être utile pour éviter les « mouvements de foule » trop brutaux pour des modèles dynamiques dans lesquels les agents sont réputés agir en parallèle (simultanément).

De plus, parce que l'environnement des agents est un système complexe et que par conséquent l'incertitude y est radicale, si les agents savent généralement dans quelle direction réagir quand ils constatent un déséquilibre, ils ne savent pas pour autant quelle ampleur donner à cet ajustement. Ainsi une entreprise qui constate un excès de stocks d'inventaire par rapport à ses objectifs décidera-t-elle de réduire ses prix, sans savoir quelle ampleur donner à cette baisse. Compte tenu de cette incertitude, il n'y a pas de raison que deux agents placés dans les mêmes conditions réagissent exactement de la même façon. Si l'ampleur de l'ajustement est (au moins en partie) aléatoire, une population d'agents soumis au même déséquilibre réagira par des ajustements d'ampleur variée. Les agents qui retrouvent l'équilibre sont « satisfaits », ils ne cherchent plus à ajuster leur comportement. Les autres continuent leur recherche jusqu'à satisfaction, selon le même processus de *tâtonnement* (« trial and error »).

Cognitivité : c'est la source la plus élevée d'autonomie des agents. Plus l'agent a des capacités cognitives développées, plus il est autonome. A l'autre extrémité de l'axe, la forme la plus simple de l'agent autonome est celle de l'*agent réactif*.

« Un agent réactif n'a pas de représentation de son environnement ou des autres agents. Son comportement est décrit par des boucles sensorimotrices simples, c'est-à-dire par des mécanismes directs associant les perceptions aux réactions. Les agents réactifs ne disposent généralement pas de fonctions cognitives et leur fonction conative se borne à mettre simplement les perceptions en relation avec les tâches qui décrivent la suite des actions à entreprendre. » (Ferber 2006, p. 20)

Par exemple, dans un modèle de marché financier artificiel, un agent investisseur très simple pourrait acheter ou vendre un actif en fonction du prix de l'actif rapporté

à sa valeur fondamentale (« investisseur fondamentaliste »). Un agent à peine plus perfectionné pourrait extrapoler les évolutions des prix observées sur le marché pour prendre ses décisions (« investisseur chartiste »). Mais même si on perfectionne ces procédures (calcul de la valeur fondamentale, calcul de la tendance et anticipation des retournements) tant que les paramètres des fonctions de réaction sont fixés de l'extérieur, ces agents restent des *agents réactifs*.

Un pas supplémentaire dans l'autonomie des agents est franchi lorsqu'on permet à l'agent de définir lui-même son comportement selon un processus d'apprentissage. Par exemple, dans le même modèle de marché financier, un *agent cognitif* très simple pourrait partager la gestion de son portefeuille entre deux comportements, l'un chartiste et l'autre fondamentaliste, en fonction des performances passées de chacun des comportements.

Il existe de très nombreuses méthodes qui permettent de doter les agents de capacités d'apprentissage²⁶. On entre ici dans un domaine particulier, lié à l'intelligence artificielle, qui rajoute un niveau de complexité au système étudié²⁷. Même s'il est évidemment très tentant de s'aventurer dans cette direction — nous nous y laisserons entraîner dans les chapitres 11 et 12 — ce n'est en rien un passage obligé de la modélisation multi-agents, et il peut être pertinent de construire des modèles peuplés avec des *agents à intelligence nulle* (« zero intelligence agents », Gode et Sunder 1993, Farmer, Patelli, et Zovko 2005). Sur cette question, le bon sens doit encore une fois être la règle et la voie de la complexité empruntée seulement si c'est nécessaire par rapport aux objectifs que l'on s'est fixés. Nous partageons entièrement la position défendue par Phan :

« [...] on peut concevoir qu'en réalité virtuelle, ou dans une démarche d'*engineering*, on ait besoin d'agents très autonomes. Par contre, pour la recherche académique, les impératifs de la reproductibilité des expériences, de l'explication et de la compréhension présupposent un degré plus fort de contrôle de l'expérimentateur sur l'expérience. La prise en compte de ce rapport problématique entre le désir de "réalisme", qui pousse à concevoir les agents les plus autonomes possibles et la volonté analytique d'expliquer comme de contrôler les expériences réalisées "in silico", obligent les chercheurs à se positionner clairement d'un point de vue méthodologique sur l'axe qui va de l'automate à l'agent autonome.

26. Les algorithmes génétiques développés par Holland (voir page 29) sont l'une des méthodes les plus fréquemment employées.

27. Un système peuplé d'agents doués de capacités d'adaptation supérieures (capacités d'apprentissage) est un « système adaptatif complexe », susceptible d'évoluer en permanence (Holland 1992, Arthur 1999).

La position défendue ici consiste à avancer progressivement par étapes d'abstraction décroissante successives, en maintenant un lien permanent avec le niveau précédent, et en ne relâchant que pas à pas les hypothèses simplificatrices qui ont servi précédemment, pour éviter d'obtenir des résultats incompréhensibles ou incohérents avec la logique générale des comportements postulés des agents. » (Phan 2006, p. 233)

Pour nous, cette approche d'*abstraction décroissante* est intimement liée à la démarche constructiviste de *complexification croissante*. Elle doit donc s'appliquer non seulement à la modélisation du comportement des agents, mais à tous les aspects du modèle.

Echelle

Les questions d'échelle concernent le nombre d'agents peuplant le modèle et l'unité de temps utilisée.

Nombre d'agents : à partir de quel nombre d'agents un système est-il multi-agents? On ne trouve bien sûr aucune réponse absolue à cette question dans la littérature. Plus le nombre d'agents est grand, plus l'hétérogénéité des agents peut-elle être marquée et, par la loi des grands nombres, plus le comportement du modèle est robuste. L'idéal serait évidemment l'échelle 1 : un agent dans le modèle pour chaque agent du système modélisé. Cependant l'augmentation du nombre d'agents est limitée par la capacité de calcul de l'ordinateur : plus on augmente le nombre d'agents, plus les temps de calcul des simulations s'allongent, et donc se réduit notre capacité d'exploration du modèle.

Le nombre d'agents fera donc l'objet d'un arbitrage, qui dépendra essentiellement de l'objectif principal assigné au modèle. Pour un modèle pédagogique de ségrégation spatiale à la Schelling, il est inutile de mobiliser des millions d'agents pour montrer les mécanismes à l'oeuvre. En revanche, un modèle destiné à la prévision et la décision cherchera à se rapprocher des grandeurs du réel.

Un modèle de recherche académique se situera quelque part entre les deux. Le nombre d'agents étant un paramètre, il peut être facilement ajusté en fonction des difficultés rencontrées. L'important est d'estimer le nombre minimum d'agents requis pour éviter que les résultats du modèle soient brouillés par d'éventuels effets d'échelle et de vérifier que ce nombre minimum est compatible avec une durée d'exécution des simulations suffisamment courte pour permettre une exploration intensive du modèle.

Echelle de temps : comment choisir l'unité de temps ? L'unité minimale de temps correspond à l'exécution de la boucle principale du programme, c'est-à-dire à une suite d'instructions dont la répétition constituera le déroulement de la simulation de période en période.

Là encore, le bon sens doit guider le programmeur. On peut imaginer des unités de temps extrêmement courtes pour un modèle de marché financier, tandis que des durées inférieures au mois n'auraient que peu d'intérêt pour un modèle centré sur les dynamiques industrielles et l'innovation.

Structure

Parce que le programme est conçu de façon modulaire grâce aux techniques de programmation orientée objet, l'existence d'une structure rigide du modèle, imposée aux agents qui composent le modèle, peut facilement passer inaperçue. Les modélisateurs multi-agents ont tendance à mettre en avant ce sur quoi ont porté leurs efforts : l'autonomie des agents, les phénomènes émergents. Cependant, tout autonomes qu'ils soient, les agents n'entrent pas spontanément et librement en contact les uns avec les autres : le modélisateur a choisi le type de leurs interactions, leur chronologie au sein de la période, leurs canaux et leurs vecteurs.

« Any meaningful model of the macro economy must analyze not only the characteristics of the individuals but also the structure of their interactions. » (Colander, Howitt, Kirman, Leijonhufvud, et Mehrling 2008, p. 237)

Comme le font remarquer Farmer et Geanakoplos, la nature des institutions économiques et la façon dont vont s'agréger les interactions des agents individuels pour donner le comportement macroscopique sont des éléments essentiels du modèle.

« (...) strategic interactions are not the only important factor in economic models. Other factors can also be important, such as the nature of economic institutions, and how the interactions of agents aggregate to generate economic phenomena at higher levels. We will call the aspects of a problem that do not depend on strategy its structure. In economics this occurs when equilibrium plays a role that is minor compared to other factors, such as interaction dynamics or budgetary constraints. » (Farmer et Geanakoplos 2009, p. 29)

La principale structure du modèle est exogène. Elle est présente à travers l'implémentation de chacun des objets qui composent le programme. Elle est la traduction en langage informatique de ces « règles » qui caractérisent le type d'économie que l'on veut modéliser. Quelle que soit l'autonomie accordée aux agents, un modèle

multi-agents reste un modèle structuré. Le modélisateur doit en être conscient ; il doit énoncer clairement et motiver ses choix structurels.

Accessibilité

Enfin, il faut penser à pouvoir rendre le modèle facilement explorable et réutilisable. La construction d'une interface graphique qui permet de « piloter » aisément le modèle et de délivrer instantanément les résultats des simulations selon une variété de points de vue est un élément important du modèle (Amblard, Rouchier, et Bommel 2006, p. 91). En rendant le modèle plus accessible, que ce soit pour lui-même ou pour d'autres utilisateurs, le modélisateur permet une exploration plus profonde du système modélisé, y compris par des non spécialistes.

« If we are to make parallel simulations of complex adaptive systems accessible, two criteria must be satisfied. First, the parallel simulation must directly mimic the ongoing parallel interactions of the complex adaptive system. Second, there must be a visual, game-like user interface that provides natural controls for experts not used to exploring systems via computers. » (Holland 1992, p. 26)

En mettant en libre accès sur le web l'application et son code source, on peut assurer une plus large diffusion du modèle en vue de sa vérification comme de sa réutilisation et de son extension ²⁸.

2.4 Conclusion

Les économies de marchés sont des économies décentralisées. Elles sont peuplées d'un grand nombre d'agents hétérogènes, autonomes et concurrents, en interactions directes et sans contrôle supérieur. La notion de « main invisible » exprime la contradiction entre d'une part les principes de décentralisation et de concurrence qui gouvernent les interactions entre les agents économiques, et d'autre part la relative sta-

28. « We argue that two ingredients are still missing for a widespread adoption of the new [agent-based] approach inside the [economist] profession : (1) the appearance of a class of manageable benchmark models one can use and re-use interchangeably to address various research questions — for instance, playing the role that the maximization of discounted utility or the principal-agent frameworks have played for mainstream macroeconomics and political economy ; and (2) a clear understanding of how the adaptive complexity approach to economics can be used to design effective policies. The availability of open-code freeware web-based computerized laboratories will help to address point (1). » (Delli Gatti, Gaffeo, et Gallegati 2010, p. 4)

bilité des économies de marché, leur capacité à se reproduire de période en période en préservant leurs équilibres internes.

La coordination macroéconomique apparente de ces économies constitue leur principale propriété émergente. Les économies de marché sont des systèmes complexes, il n’y a pas de façon triviale d’expliquer comment les activités individuelles désordonnées des agents s’agrègent pour donner le comportement macroéconomique observé.

Face à ce « mystère » de l’agrégation, la théorie néoclassique ne propose pas d’explication. Au niveau macroéconomique, la coordination est postulée et prend la forme d’un équilibre unique et général. Au niveau microéconomique, toutes les hypothèses irréalistes nécessaires à la réalisation de cette coordination sont acceptées²⁹.

Nous avons décidé d’emprunter une autre approche, l’approche dite de la complexité. Selon cette approche, la compréhension des phénomènes émergents propres aux systèmes complexes passe par une reconstruction méthodique de ces systèmes. À l’appui de cette approche, les techniques de modélisation multi-agents permettent de construire des sociétés d’agents autonomes dans l’espace virtuel de la mémoire d’un ordinateur. Le chercheur peut alors modifier le modèle à volonté pour tenter d’identifier, selon une véritable démarche expérimentale, les logiques et les mécanismes qui président à l’émergence des dynamiques macroéconomiques du système.

Les agents — multiples, hétérogènes, autonomes, et même concurrents — sont au cœur de ces modèles. Ces agents sont des automates dotés de procédures plus ou moins évoluées qui leur confèrent une certaine autonomie. Ils sont eux-mêmes les modèles des agents réels qui peuplent le système réel ; les règles et les motifs qui gouvernent leur comportement s’inspirent de façon réaliste des règles et des motifs qui gouvernent les agents réels.

Mais l’implémentation des règles et des motifs qui gouvernent le comportement des agents n’est qu’une partie du problème.

« Clearly, the act of computationally constructing a (fully or not) coordinated state — instead of imposing it via the [walrasian auctioner] — for a decentralized economic system requires a complete description of goal-directed economic agents and their interaction structure. » (Gaffeo, Catalano, Clementi, Delli Gatti, Gallegati, et Russo 2008, p. 8)

L’activité des agents s’inscrit nécessairement dans une structure d’interactions qui leur est extérieure et qui caractérise l’économie modélisée. Comme le souligne Joan Robison³⁰, il faut savoir à quelle économie s’applique le modèle, parce que chaque

29. « According to us, mainstream economics by ignoring interaction and emergence, commits what in philosophy is called “fallacy of division”, i.e. to attribute properties to a different level than where the property is observed » (Delli Gatti, Gaffeo, Gallegati, Giulioni, et Palestrini 2008, p. 2)

30. Voir citation en introduction, page 14.

type d'économie à ses propres règles. Or les règles des économies de marchés font que la structure des interactions entre les agents est à la fois *réelle* et *monétaire*.

Chapitre 3

L'économie comme un circuit

In any event, a model of short-run determination of macroeconomic activity must be regarded as referring to a slice of time, whether thick or paper thin, and as embedded in a dynamic process in which flows alter stocks, which in turn condition subsequent flows.

Tobin (1982)

Dans le chapitre précédent, nous avons commencé à définir le modèle que nous voulons construire comme un modèle d'économie de marché dont le comportement macroéconomique ne serait pas postulé, mais découlerait des interactions décentralisées d'un grand nombre d'agents autonomes. Le développement récent des systèmes multi-agents nous encourage dans cette voie. Mais nous avons vu aussi que la modélisation des agents n'est qu'un aspect du problème, et que la modélisation de la structure dans laquelle les agents vont exercer leur autonomie constitue un autre aspect très important qui va permettre de caractériser l'économie modélisée. Or, la structure des économies de marché est à la fois réelle et monétaire.

Selon nous, un modèle macroéconomique peuplé d'agents multiples peut — et doit — rendre compte de la complexité du système formé par les interactions réelles et monétaires. Dans la sphère réelle, les interactions entre agents ne se limitent pas à l'échange des marchandises mais intègrent la production et la consommation de ces marchandises. De même dans la sphère monétaire, les interactions ne peuvent être réduites à la circulation de la monnaie mais doivent intégrer aussi la création et la

destruction de cette monnaie. L'enjeu est de construire un modèle capable de rendre compte de ce dualisme du réel et du monétaire.

Dans la section 3.1, nous montrons que la pensée post-keynésienne peut nous fournir les notions théoriques et les mécanismes de base dont nous avons besoin pour doter le modèle d'une structure réelle et monétaire. Dans la section 3.2, nous examinons certaines difficultés posées par les modèles post-keynésiens du circuit de la monnaie. Dans la section 3.3, nous montrons comment il est possible, selon un processus d'abstraction décroissante, d'intégrer les éléments essentiels de la théorie du circuit monétaire à un modèle macroéconomique multi-agents.

3.1 Éléments d'économie monétaire

Dans son papier de 1999, Bruun souligne l'importance de la théorie monétaire de la production — ébauchée par Keynes, reprise et développée par les postkeynésiens — pour le chercheur qui souhaite construire un modèle macroéconomique multi-agents.

« [...] our choice of using Keynes' theory of monetary production has to do with the role played by money in economic systems. » (Bruun 1999, p. 5)

3.1.1 Une théorie monétaire de la production

Une pensée complexe

Dans la Théorie Générale, Keynes insiste sur la nécessité de prendre en compte « les complexités et les interdépendances du monde réel » (Keynes 1936 [1998]). Il critique sèchement les méthodes qui reposent sur l'hypothèse de « l'indépendance rigoureuse des facteurs dont elles traitent ». Pour Keynes, c'est « la nature du raisonnement économique » que de « tenir compte, autant que possible, des réactions probables de ces facteurs les uns sur les autres ».

« Trop de récentes économies mathématiques ne sont que de pures spéculations ; aussi imprécises que leurs hypothèses initiales, elles permettent aux auteurs d'oublier dans le dédale des symboles vains et prétentieux les complexités et les interdépendances du monde réel. » (Keynes 1936 [1998], p. 301)

Tobin (1991) souligne que Keynes ne suppose pas que les marchés parviennent toujours à coordonner le comportement des agents. Au contraire, selon Tobin, les problèmes de coordination entre des agents divers et multiples sont l'objet essentiel de la macroéconomie de Keynes.

« In Keynes' view, the essential task of economics was to explain how markets do and do not coordinate the behaviors of the diverse agents: households and firms, savers and investors, workers and employers, creditors and debtors, bulls and bears, citizens and governments. To assume away this diversity is to default the responsibilities of the profession to maintain seriousness and relevance. » (Tobin 1991, p. 12)

Complexité des économies monétaires

Pour Keynes, une économie monétaire n'est pas simplement une économie dans laquelle les échanges se font en monnaie. Dans une économie où la monnaie n'est qu'un moyen de faciliter les échanges de biens réels, on peut supposer que la monnaie est neutre, c'est-à-dire que le comportement macroéconomique de cette économie peut être assimilé à celui d'une économie d'échanges réels. Keynes pense au contraire que les règles de fonctionnement d'une véritable économie monétaire sont très différentes, et que par conséquent il y a nécessité de développer une théorie monétaire dans laquelle la monnaie n'est pas neutre.

« The idea that it is comparatively easy to adapt the hypothetical conclusions of a real wage economics to the real world of monetary economics is a mistake. It is extraordinarily difficult to make the adaptation, and perhaps impossible without the aid of a developed theory of monetary economics. » (Keynes 1933 [1963], p. 9)

Pour Legay (1997, p. 18) la perte d'un élément d'un système complexe peut le faire changer de nature, voire lui faire perdre sa nature complexe. C'est pourquoi nous pensons que la monnaie doit d'emblée être intégrée au modèle, comme un élément structurant.

3.1.2 Trois notions essentielles

Pour Keynes, la construction d'une théorie monétaire de la production est restée à l'état de projet. Ce sont les auteurs du courant dit *post-keynesien* qui ont repris ce projet et se sont efforcés de lui donner un contenu fort et cohérent, ancré dans l'observation du monde réel. De leurs travaux, nous retenons trois notions essentielles qui vont nous permettre de donner un contenu plus concret au principe de non-neutralité de la monnaie :

- la notion d'*économie monétaire de production*,
- la notion d'*économie avec monnaie endogène*,
- la notion d'*économie d'entrepreneurs*.

Une économie monétaire de production

Pour Keynes, la monnaie est un élément du processus de production. Elle est présente en amont et en aval du processus.

« During the lengthy process of production the business world is increasing outgoings in terms of money — paying out in money for wages and other expenses of production — in the expectation of recouping the outlay by disposing of the product for money at a later date. » (Keynes 1923 [1971], p. 33, cité par Rochon 1999, p. 7)

A partir de cette observation, les post-keynésiens ont développé la notion d'*économie monétaire de production*. Dans une telle économie, le premier rôle de la monnaie est de permettre le financement de la production.

« Dans une économie monétaire, la monnaie est nécessaire non seulement pour faciliter les échanges des marchandises produites ; mais aussi et, pourrait-on dire en premier lieu pour rendre possible la production. L'entrepreneur doit payer les salaires en monnaie et il doit les payer à l'avance. Il a donc besoin de monnaie *avant* d'avoir réalisé la production [...] La relation la plus importante dans l'économie de marché n'est donc pas la relation monnaie-échanges mais la relation monnaie-production. » (Graziani 2003a, p. 126)

On peut résumer la notion d'*économie monétaire de production* en disant que c'est une économie « dans laquelle la production commence et finit en monnaie » (Wray 2003, p. 58).

Une économie avec monnaie endogène

La notion de *monnaie endogène* vient compléter celle d'*économie monétaire de production*, en précisant la nature et l'origine de la monnaie qui y circule.

« Si la fonction de la monnaie est de rendre possible la production, il est évident que la monnaie doit être employée par un agent qui n'a pas encore la disponibilité des biens ; il s'agit donc nécessairement d'une monnaie de crédit. » (Graziani 2003a, p. 126)

Les entreprises doivent emprunter la monnaie dont elles ont besoin pour lancer le processus de production. Les banques constituent une catégorie particulière d'agents dont la fonction est de prêter aux entreprises les sommes dont elles ont besoin. Mais d'où provient la monnaie que prêtent les banques ? De nulle part, elle est créée à l'occasion du crédit.

« [...] the circulation approach rejects the idea that deposits make loans, an idea that Schumpeter already considered an old prejudice. In the circulation approach the opposite conception is adopted, namely that loans make deposits. » (Graziani 2003b, p. 82)

La création monétaire ne consomme aucune force de travail (Lavoie 1982, p. 212), ce n'est pas une production mais une création *ex nihilo* (Lavoie 2004, p. 73). La monnaie de crédit n'est donc pas une marchandise.

La monnaie est éphémère et sa durée de vie est égale à celle du crédit : elle disparaît dans le remboursement de la dette qui lui a donné naissance. Le Bourva souligne que « dans ces conditions, la banque *n'est pas un intermédiaire* entre des déposants et des emprunteurs, elle est purement un organisme spécialisé dans *la création et la résorption de la monnaie* » (Le Bourva 1962, p. 37).

Bien que le secteur bancaire joue un rôle essentiel dans la création monétaire, il ne contrôle pas la masse des dépôts.

« Du fait que la monnaie est créée à l'occasion d'un prêt, *l'initiative appartient d'abord aux clients* des banques. La quantité de monnaie augmente parce que les entrepreneurs ont plus ou moins parallèlement sollicité des crédits accrus [...] » (Le Bourva 1959, p. 721, cité par Lavoie 1982, p. 203)

Dans une *économie avec monnaie endogène*, le processus de création monétaire est donc un processus essentiellement décentralisé — comme le sont les processus de production et de consommation. Dans une telle économie, la quantité de monnaie « est déterminée de manière *endogène* par la demande de crédit bancaire émanant des forces du marché » (Moore 2003, p. 41).

Une économie d'entrepreneurs

Une troisième notion essentielle qui vient compléter les précédentes est celle d'*économie d'entrepreneurs*. Dans une telle économie, les entreprises font des profits, et ces profits sont monétaires.

« The firm is dealing throughout in terms of money. It has no object in the world except to end up with more money than it started with. That is the essential characteristic of an entrepreneur economy. ¹ » (Keynes 1933 [1979], p. 89)

1. Pour Wray (2003, p. 58), l'approche de Keynes est « bien entendu similaire au schéma de Marx » $M - C - M'$ décrivant le circuit du capital.

Si la notion d'*économie d'entrepreneurs* est importante, ce n'est pas seulement pour ce qu'elle nous apprend des motivations qui guident le comportement des entreprises ; c'est aussi parce qu'elle rend compte des contraintes particulières qui pèsent sur les entreprises, contraintes imposées par la structure monétaire de l'économie. Ainsi Graziani souligne que :

« Since debts carry with them the obligation to pay interest, a consequence is that producers having gone into debt need to earn a profit. »
(Graziani 2003b, p. 81)

Les trois notions d'*économie monétaire de production*, d'*économie avec monnaie endogène* et d'*économie d'entrepreneurs* sont donc intimement liées, au point d'être souvent confondues.

3.1.3 Compatibilité des approches

Dans la perspective de la construction d'un modèle macroéconomique peuplé d'agents multiples, les trois notions d'*économie monétaire de production*, d'*économie avec monnaie endogène* et d'*économie d'entrepreneurs* se révèlent particulièrement riches. Elles permettent de donner un contenu concret au principe de non neutralité de la monnaie, en donnant des indications précises sur la structure réelle et monétaire de l'économie à modéliser. Elles définissent ainsi les spécifications de base — le « cahier des charges » — de la structure du modèle à construire. Cependant, avant de se lancer dans la construction d'un modèle croisant la macroéconomie postkeynésienne avec la macroéconomie multi-agents, il est nécessaire de s'interroger sur la compatibilité des deux approches.

A première vue, ces deux approches paraissent faites pour s'entendre. Comme les partisans de l'approche multi-agents en macroéconomie, les auteurs postkeynésiens :

- adoptent une position très critique vis-à-vis de la théorie néoclassique, dont les hypothèses sont considérées comme irréalistes (Lavoie 2004, p. 12) ;
- considèrent l'économie comme un système dynamique fonctionnant hors de l'équilibre, pouvant présenter des phénomènes de dépendance au sentier (Lavoie 2004, p. 18) ;
- insistent sur la situation d'incertitude radicale dans laquelle sont placés les agents économiques (Lavoie 2004, p. 21) ;
- rejettent les calculs d'optimisation pour modéliser le comportement des agents, qu'ils considèrent plutôt comme obéissant aux principes de la rationalité procédurale² (Lavoie 2004, p. 14).

2. Tesfatsion (2006, p. 855) fait remarquer cette convergence *naturelle* : « It is interesting how

Toutefois, une approche qui prétend baser ses modèles macroéconomiques sur des agents multiples et hétérogènes peut paraître complètement incompatible avec ce que Graziani (2003a) nomme « une véritable approche macroéconomique ». Pour Graziani, « l'idée d'appuyer la macro sur la microéconomie est justement la voie indiquée par les théoriciens néoclassiques ». Un modèle macroéconomique « déduit à partir de l'analyse micro, grâce à un processus d'agrégation » ne représente jamais qu'une variante de « l'approche marginaliste traditionnelle ».

« [...] any theory based on an individualistic approach is necessarily confined to microeconomics and is unable to build a true macroeconomic analysis. » (Graziani 2003b, p. 18)

Parce qu'elle est souvent dite « basée sur les agents » ou parfois « *bottom-up* » — c'est-à-dire ascendante — l'approche multi-agents peut être confondue avec un développement de la démarche d'agrégation des comportements individuels propre à la théorie néoclassique. On a vu dans le chapitre précédent que c'est en fait exactement l'inverse : en rejetant la notion d'agent représentatif sur lequel repose la théorie néoclassique, l'approche multi-agents rejette en même temps comme réductionnistes les tentatives d'agrégation des comportements individuels³. Pour nous, cette approche est pleinement compatible avec la macroéconomie postkeynésienne, à condition d'admettre l'existence d'une structure économique et sociale qui s'impose aux agents en venant organiser leurs interactions et limiter leur autonomie. Or, tout modèle économique réputé « basé sur les agents » repose en fait sur des hypothèses structurelles, qui définissent un ensemble de contraintes exogènes que les agents ne peuvent remettre en cause⁴.

Ainsi Wright (2009) présente un modèle macroéconomique multi-agents dans lequel le stock de monnaie est fixé initialement pour toute la durée de la simulation. Dans le modèle *EURACE*, le processus de production ne prend pas de temps, les marchandises sont disponibles le jour même (Dawid et Harting 2010, p. 11). Selon nous, ces détails de l'implémentation caractérisent l'économie modélisée, imposant une structure particulière susceptible d'influencer fortement sa dynamique macroscopique, quelle que soit l'autonomie accordée aux agents qui peuplent ces modèles.

naturally one slips back into a consideration of such practical “Keynesian” rules of thumb when procurement processes must be constructively modeled solely in terms of agent interactions. »

3. Voir la section consacrée à la critique de la notion d'agent représentatif par les tenants de l'approche multi-agents, page 31.

4. Voir la section consacrée à la structure des modèles multi-agents, page 53.

3.2 Le circuit de la monnaie

Nous avons décidé d'appuyer la construction de la structure réelle et monétaire du modèle sur les trois notions postkeynésiennes d'*économie monétaire de production*, d'*économie avec monnaie endogène* et d'*économie d'entrepreneurs*. Ces trois notions nous ont paru simples, réalistes, cohérentes et fécondes. Pour ces raisons, elles constituent un point de départ pertinent pour développer des modèles macroéconomiques dans lesquels monnaie et production sont étroitement liées.

L'approche du *circuit de la monnaie* rassemble, parmi les auteurs proches de la pensée postkeynésienne, ceux qui se sont attachés à construire des modèles formels d'économie monétaire à partir des mêmes notions (Schmitt 1972, Parguez 1975, Poulon 1982, Graziani 1990). Les auteurs de ce courant prennent explicitement en compte le fait que la monnaie est créée par les banques dans leur activité de crédit aux entreprises, et que cette monnaie disparaît dans le remboursement du crédit. En suivant le parcours de la monnaie entre ces deux instants, ils s'efforcent de retracer les interactions réelles et monétaires entre les groupes d'agents qui composent le modèle. Bien que le formalisme utilisé par ces auteurs soit un formalisme mathématique classique, leur analyse repose sur une description séquentielle des interactions économiques — aux antipodes des analyses d'équilibre général.

3.2.1 La structure du circuit

L'algorithme du circuit

Le fonctionnement du système formé par le circuit de la monnaie obéit à un processus qui peut être décrit comme un algorithme, c'est à dire comme une suite d'opérations ordonnées au sein d'une séquence — la période du circuit.

« A monetary economy is therefore viewed as existing through a specific sequence of irreversible events where the principle factor is the “essentiality of money”. » (Rochon 1999, p. 6)

Pour Bougrine et Seccareccia (2003, p. 165), « [p]uisque la production et l'échange prennent du temps, la structure du circuit monétaire est temporelle et appelle une analyse séquentielle ». Suit une description du circuit qui en fait apparaître clairement le caractère algorithmique :

Première phase (début du cycle de production et du processus de “flux” de la monnaie) :

Les entreprises ont besoin d'une finance qui leur permettra d'acheter le capital circulant nécessaire pour entreprendre la production ; pour le secteur consolidé

des entreprises, elle peut être réduite au paiement des salaires.

Les entreprises constituent donc leur stock de dette à court terme auprès du système bancaire.

Seconde phase :

Le travail employé entreprend la production sur la base d'un accord de salaire monétaire et produit soit des biens de consommation (destinés à être vendus aux ménages), soit des biens capitaux (pour les achats inter-entreprises).

Lorsque la production est achevée, fin du cycle de production.

Troisième phase (début du processus de "reflux" de la monnaie) :

Les ménages dépensent une certaine partie de leur revenu pour acquérir les biens de consommation qu'ils ont produits, en fonction de leur propension à épargner.

Les entreprises émettent des titres sur le marché financier espérant capter la totalité du flux d'épargne des ménages retirée du marché des biens.

Quatrième phase :

Les entreprises remboursent les dettes à court terme contractées auprès des banques.

Pour le modélisateur multi-agents, cette description du circuit de la monnaie sous forme d'un enchaînement d'opérations ordonnées au sein d'une séquence de base constitue un document de travail très précieux. En effet, la structure d'un modèle multi-agents est par nature séquentielle et en termes d'informatique cette séquence d'événements définit la *boucle principale* (« main loop ») du programme correspondant. La répétition de cette séquence assure la reproduction et le développement du système.

L'idée de la répétition de la période de base du circuit, bien qu'admise en principe par les auteurs du circuit, ne va pourtant pas de soi. Dans la théorie du circuit, la séquence de base constitue une période abstraite, considérée isolément du passé et du futur. Nous verrons que cela n'est pas sans conséquence sur les résultats des modèles du circuit.

Micro, méso, macro

L'autre particularité remarquable qui apparaît à la description de la période de base, est que les modèles du circuit sont composés de plusieurs « agents sectoriels » (Lavoie 2004, p. 75) en interaction. Lavoie rapproche cette démarche de l'approche de Tobin (1982), selon lequel « tout modèle doit comprendre une multiplicité de secteurs » (Lavoie 2004, p. 69) ; il l'oppose en revanche à celle des « économistes

néoclassiques [...] repliés sur l'irréaliste agent représentatif, à la fois consommateur et producteur » (Lavoie 2004, p. 70). Selon Lavoie, l'approche du circuit se situe au niveau intermédiaire de la mésoéconomie :

« Les keynésiens circuitistes français ont toujours prôné l'étude de lois structurelles, indépendantes des comportements des agents, et situées à un niveau mésoéconomique. La mésoéconomie est l'analyse qui se situe à mi-chemin entre l'analyse agrégée de la macroéconomie et l'analyse individualisée de la microéconomie. » (Lavoie 2004, p. 69)

Pour autant, les modèles du circuit de la monnaie se situent-ils vraiment au niveau mésoéconomique ? La préoccupation première des circuitistes est, sans aucun doute, macroéconomique. Ce n'est que pour faire apparaître les interactions internes au système économique qu'ils le décomposent en différents secteurs. Aussi, selon nous, les modèles du circuit de la monnaie ne se situent pas quelque part sur l'axe *micro-macro*, ils se situent d'emblée au niveau macroéconomique. Le mouvement de la pensée opéré par leurs auteurs doit être plutôt localisé à un niveau intermédiaire sur un axe *désagrégation-agrégation*.

Désagrégation et complexification

Les modèles du circuit de la monnaie peuvent être rapprochés des *modèles à compartiments* utilisés en biologie en particulier pour la modélisation des dynamiques de populations.

« Un système à compartiments est un ensemble de deux ou plusieurs compartiments qui communiquent entre eux et entre lesquels circule un ou plusieurs éléments déterminés. Le nombre de compartiments et les règles de circulation constituent les caractéristiques du système. » (Legay 1973, p. 121)

L'élément circulant des modèles du circuit est évidemment la monnaie. Les compartiments des modèles du circuit sont généralement au nombre de trois — secteurs des banques, des entreprises, des ménages — mais parfois plus — par exemple avec l'intégration du secteur gouvernemental.

Poursuivons avec Legay :

« En fait, les compartiments *sont souvent* des boîtes noires dans la mesure où l'on ignore ce qui se passe à l'intérieur de ceux-ci. C'est même l'un des mérites du modèle à compartiments que de permettre l'approche de problèmes qui seraient inabordables autrement. Mais cela ne veut pas dire qu'un compartiment *doit être* une boîte noire. Bien au contraire

dans de nombreux cas la connaissance du comportement des éléments mobiles à l'intérieur du compartiment donne de grandes facilités quant à l'interprétation des échanges effectués par ce compartiment. [...] On peut donc affiner l'analyse et surtout la rendre plus explicative en rompant la boîte noire admise au départ et en la divisant en autant de compartiments que l'information disponible le permet.⁵ » (Legay 1973, p. 126)

En désagrégeant le système économique en plusieurs agents sectoriels reliés entre eux par des flux réels et monétaires, les circuitistes ont « rompu la boîte noire » de la macroéconomie. Comme le préconise Legay, certains d'entre eux ont poussé la démarche plus avant en désagrégeant à leur tour les différents secteurs — distinguer le secteur des biens de consommation du secteur des biens de production (Forges Davanzati et Realfonzo 2005) ou distinguer la banque centrale du secteur des banques commerciales (Lavoie 2003, Rossi 2005).

Toutefois, le mouvement de désagrégation se heurte à la complexification croissante du modèle. Plus on désagrège le modèle, plus le nombre de secteurs augmente ainsi que le nombre d'interactions entre les secteurs, et donc augmente la complexité du modèle.

« Il est clair que l'expérience pourrait parfois nous conduire à un niveau très complexe, mais dont on ne pourrait traiter mathématiquement les données [...] [U]n système à compartiments, pour une même situation, sera d'autant plus simple qu'il y aura moins de compartiments et que ceux-ci seront plus globaux ; chaque compartiment recouvre alors une réalité plus complexe dont on utilise que le bilan ; le nombre de relations entre les compartiments s'en trouve évidemment réduit. On peut donc avoir intérêt, dans un premier temps, à construire un modèle simple, dont on sait bien que les éléments devront à leur tour éclater. » (Legay 1973, p. 65)

Les modèles du circuit de la monnaie se situent donc à un niveau de complexité supérieur à celui des modèles basés sur un agent représentatif unique, mais à un niveau encore très éloigné de la complexité d'un modèle multi-agents. Par conséquent, il ne va pas être simple de construire la structure réelle et monétaire d'un modèle multi-agents à partir de la théorie du circuit ; cette construction réclamera nécessairement un effort important d'adaptation, et le mouvement de désagrégation sera aussi un mouvement de complexification.

5. Ce processus de division progressive d'un élément complexe en un système d'éléments plus simples en interactions est évidemment similaire à la stratégie de décomposition des problèmes préconisée en programmation orientée objet (voir Wegner (1990), cité page 44) et à la stratégie d'abstraction décroissante en modélisation multi-agents (voir Phan (2006), cité page 51).

3.2.2 Le paradoxe des profits

Si l'on anticipe des difficultés dans la construction de la structure réelle et monétaire du modèle, aucune jusqu'à présent ne nous a semblé insurmontable. Il reste cependant une difficulté essentielle à surmonter, connue sous le nom de « paradoxe des profits ». Cette difficulté n'est pas spécifique à notre projet ; elle est présente dans tous les modèles du circuit.

L'algorithme du circuit de la monnaie doit être compatible avec la reproduction et le développement du système économique dans son ensemble. Il doit donc permettre, de période en période, que les entreprises réalisent en moyenne des profits et, par là, soient en moyenne capables de payer l'intérêt dû aux banques. Or, dans la version de base du circuit de la monnaie, il est impossible d'observer la formation d'un profit monétaire macroéconomique ni le paiement de l'intérêt en monnaie :

« One of the unresolved problems in the theory of the monetary circuit is the monetary realization of business profits and the monetary payment of bank interest at the macroeconomic level. » (Messori et Zazzaro 2004, p. 1)

Résumons le problème en quelques mots : si toute la monnaie qui circule dans l'économie y a été introduite par les entreprises pour le paiement des salaires, alors les entreprises — considérées comme un tout — ne peuvent voir s'exprimer en termes monétaires une demande supérieure à leurs coûts de production. Au mieux, les entreprises récupèrent intégralement leurs avances, mais jamais plus — du moins en moyenne⁶. Pareillement, si toute cette monnaie a été créée par le crédit bancaire, les banques ne peuvent jamais voir refluer vers elles des sommes supérieures à ce qu'elles ont initialement prêté. Au mieux, elles récupèrent intégralement ces sommes, mais jamais plus — là encore en moyenne⁷.

« If money is created from bank credit, how can we explain profits if firms borrow just enough to cover wages that are simply spent on consumption goods and returned to firms to extinguish their initial debt? Indeed, not only are firms unable to create profits, they also cannot raise sufficient funds to cover the payment of interest. In other words, how M become M' ?⁸ » (Rochon 2005, p. 125)

6. Certaines entreprises peuvent réaliser des profits, mais il faut alors que d'autres réalisent des pertes pour un montant équivalent.

7. Si certaines entreprises réussissent à payer l'intérêt dû sur les crédits, c'est que d'autres n'ont pas réussi à rembourser intégralement leurs créances ; les profits et les pertes du secteur bancaire se compensent alors exactement.

8. L'auteur fait référence à Marx et au schéma du circuit du capital $M - C - M'$ (voir note

En somme, le circuit est le modèle d'une *économie monétaire de production* puisque la production commence et finit en monnaie, mais il n'est pas le modèle d'une *économie d'entrepreneurs* puisque les entreprises ne peuvent collectivement retirer plus de la circulation que ce qu'elles y ont jeté. Le circuit monétaire est toujours en crise et, comme le fait remarquer Parguez, l'économie modélisée n'est pas une économie capitaliste.

« Since firms cannot accumulate capital, the existence condition of the capitalist mode of production is denied. » (Parguez 2004, p. 258)

Ce résultat est très décourageant. Nous nous sommes tournés vers la pensée post-keynésienne parce que nous comptons y trouver les éléments concrets qui nous permettraient de construire un modèle retraçant de façon réaliste la structure monétaire des économies de marché. Au contraire, on se retrouve avec un modèle qui débouche sur des résultats totalement irréalistes, selon lesquels les entreprises et les banques sont collectivement incapables de faire des profits. Cela vaut-il vraiment la peine de faire l'effort de construire un modèle d'économie de marché décentralisée selon l'approche multi-agents si, avant même de peupler ce modèle avec un grand nombre d'agents autonomes, on sait déjà qu'il sera impossible d'y observer autre chose que des entreprises et des banques en faillite ?

Les circuitistes, bien sûr, ont très tôt pris conscience des difficultés posées par le paradoxe des profits et cela a donné lieu à une abondante littérature. De très nombreuses solutions ont été envisagées. Certains auteurs font appel aux faillites d'une partie des entreprises pour expliquer les succès des autres (Messori et Zazzaro 2004), tandis que d'autres auteurs proposent de considérer le profit monétaire comme une illusion (Bruun et Heyn-Johnsen 2009). Mais la plupart des auteurs, constatant que le circuit de base *crédit à la production-salaires-consommation-remboursement du crédit* ne permet pas la formation du profit monétaire et le paiement de l'intérêt, estiment qu'une seconde source de création monétaire est nécessaire. Selon les auteurs, cette seconde source peut être le crédit à l'investissement des entreprises

1 page 61). En effet, Marx rencontre le même problème pour rendre compte de la réalisation des profits :

« La classe capitaliste reste donc le seul point de départ de la circulation de l'argent. Quand elle a besoin de 400 l. st. pour payer des moyens de production et de 100 l. st. pour payer la force de travail, elle jette 500 l. st. dans la circulation. [...] La plus value contenue dans le produit est égale à une valeur de 100 l. st. Comment peut-on retirer continuellement 600 l. st. de la circulation, où l'on ne jette continuellement que 500 ? Rien ne vient de rien. La classe totale des capitalistes ne peut retirer de la circulation ce qui n'y avait pas été jeté. » (Marx 1885 [1977], p. 292-293)

(Rochon 2005), le crédit à la consommation des ménages (Ségura 1995) ou le déficit budgétaire du secteur public (Parguez 2003, Forges Davanzati et Realfonzo 2005).

Nous ne voulons pas examiner ici chacune de ces propositions. Toutes, quelles que soient les difficultés nouvelles qu'elles entraînent, présentent un intérêt théorique. Nous nous contentons de donner la raison essentielle pour laquelle nous n'en retenons aucune pour notre projet. L'objectif de départ des circuitistes était de rendre compte de l'économie monétaire de production. Dans le projet initial, la monnaie est endogène, c'est une monnaie de crédit nécessaire à la mise en oeuvre de la production. La recherche de sources de création monétaire accessoires pouvant permettre la formation du profit et le paiement de l'intérêt conduisent les auteurs du circuit à s'écarter de ce schéma originel.

Selon nous, le profit et l'intérêt sont des phénomènes essentiels des économies de marché. Si les fondements de la théorie monétaire de la production sont valides, alors il doit être possible de construire un modèle rendant compte du profit monétaire et du paiement de l'intérêt, sans recourir à d'autres sources de création monétaire que celle nécessaire au financement de la seule production⁹.

3.2.3 Une solution interne

Dans un papier récent, Zezza (2011) pose à nouveau la question de la réalisation des profits :

« [...] in the best case scenario, where firms have recovered from sales all the money paid out in wages, and the initial amount of newly created money gets entirely destroyed, where do firms get the cash to pay for interest? And how can they possibly get a monetary profit? » (Zezza 2011, p. 1-2)

Comme nous, Zezza pense qu'aucune des nombreuses solutions proposées jusque là n'est pleinement satisfaisante :

« [...] none seemed entirely satisfactory, since more contributions on the same topic continue to appear. » (Zezza 2011, p. 4)

Le modèle

Zezza présente alors un petit modèle numérique de circuit de la monnaie dans lequel les entreprises font du profit et paient les intérêts dus aux banques. Ce modèle

9. Ce qui ne signifie pas que, dans le monde réel, il n'existe pas d'autres sources de création monétaire susceptibles de venir compliquer ce schéma.

nous intéresse parce qu’il est le modèle d’une économie monétaire de production au sens strict : toute la monnaie qui circule dans cette économie est créée par la banque pour le financement de la production ; il n’y a pas de second circuit monétaire qui se superposerait au circuit de base pour permettre la réalisation des profits.

Le tableau 3.1 (page 72) reproduit ce petit modèle numérique. Ce modèle présente certaines particularités qui le distinguent des modèles classiques de circuit :

- la durée du cycle de production est inférieure à la durée du crédit (dans les modèles classiques ces deux durées sont égales) ;
- le secteur des entreprises est désagrégé, faisant apparaître la dépense des profits des entrepreneurs sur le marché des biens (dans les modèles classiques le secteur des entreprises est agrégé, la dépense des profits n’est pas prise en compte — et pour cause!) ;
- l’intérêt est payé avant la fin de la période et dépensé sur le marché des biens (dans les modèles classiques l’intérêt doit être payé en fin de période, une fois clos le marché des biens).

Ce faisant, Zezza entend montrer qu’il est nécessaire que la dépense des profits soit prise en compte dans le circuit : c’est une nécessité à la fois logique et comptable. Si ce n’est pas le cas, les profits (profits des entreprises et des banquiers) constituent une fuite hors du circuit de la monnaie. Cela nous renvoie au principe kaleckien selon lequel « les capitalistes gagnent ce qu’ils dépensent ». En effet, dans le modèle de Zezza, on voit que les entrepreneurs et les banquiers n’attendent pas la fin de la période et l’écoulement de la totalité des stocks pour dépenser les profits, et que si jamais ils attendaient la fin de la période pour le faire, le paradoxe des profits resurgirait.

On peut rapprocher la démarche de Zezza de celle prônée par Legay pour la complexification progressive des modèles à compartiments. Constatant que le profit et l’intérêt ne peuvent logiquement apparaître comme des flux aux portes du super-compartiment constitué par la période unique du circuit, il en conclut que le profit et l’intérêt sont des flux internes à la période. Il réorganise alors les interactions entre les compartiments, divisant le compartiment des entreprises en deux et complexifiant l’agencement des flux monétaires entre les compartiments. Simultanément, il relâche plusieurs hypothèses relatives aux vitesses de circulation des flux reliant les compartiments¹⁰.

10. Legay (1973, p. 122) souligne que « les *règles de circulation* constituent la deuxième caractéristique essentielle d’un système [après le nombre de compartiments]. A chaque porte et pour chaque élément, les deux sens sont possibles. En outre — et à partir de là nous passons de la “morphologie” à la “physiologie” du système — la circulation aux portes peut s’effectuer à des vitesses différentes, éventuellement variables. »

Period	Firm A	Firm B	Workers	Bankers	Debt
Beginning : a loan is made to both firms	+100	+100	0	0	-200
Wages are paid	0	0	+200	0	-200
Production is complete and workers spend 80% of their income	+80	+80	+40	0	-200
Firms pay interest	+70	+70	+40	+20	-200
Owner of firm A purchases goods from firm B	+30	+110	+40	+20	-200
Bankers spend their income on consumption goods	+40	+120	+40	0	-200
Owner of firm B purchases goods from firm A	+80	+80	+40	0	-200
Workers spend the remaining 20% of their income	+100	+100	0	0	-200
The loan is paid back	0	0	0	0	0

TABLE 3.1 – Le modèle de Zezza (2011)

Vitesses de circulation

Le relâchement des hypothèses restrictives du circuit classique ne porte pas seulement sur la durée du cycle de la production (durée séparant l'entrée de la force de travail dans l'entreprise de la sortie de la marchandise de l'entreprise) et sur la durée du circuit de la monnaie (durée séparant la création de la monnaie par le crédit bancaire de sa destruction dans le remboursement de ce crédit) mais aussi sur la durée du cycle de la consommation (durée séparant le versement du revenu de sa dépense). Dans le modèle de Zezza, c'est parce qu'une unité monétaire peut être dépensée deux fois (une fois comme dépense sur salaire, une fois comme dépense sur profit) que le profit est possible.

« Some authors have suggested that monetary profits can be realized in the [theory of monetary circuit] only if the velocity of circulation is greater than one. This is indeed the case, since the same bank notes will be used once by wage earners, and a second time by capitalists or bankers. » (Zezza 2011, p. 7)

A partir du modèle très simple de Zezza, on s'aperçoit que le modèle classique du circuit est en réalité composé d'au moins trois circuits distincts :

- le circuit de la production, par lequel les forces de travail sont transformées en marchandises — circuit situé dans la sphère réelle ;
- le circuit de la monnaie proprement dit, par lequel la monnaie de crédit est injectée puis retirée de l'économie — circuit situé dans la sphère monétaire ;
- le circuit de la consommation, par lequel les revenus sont transformés en marchandises (point de vue des ménages) et les marchandises en revenus (point de vue des entreprises) — circuit reliant les sphères réelle et monétaire.

Dans la théorie du circuit monétaire, ces trois circuits ne sont pas clairement distingués, parce que leurs vitesses de circulation respectives sont supposées égales. C'est une hypothèse simplificatrice, car il n'y a aucune raison de penser que ce soit le cas dans le monde réel. C'est certainement aussi une hypothèse réductionniste, car il y a tout lieu de penser — c'est en tout cas ce que nous montre le modèle de Zezza — que ces différentes vitesses jouent un rôle déterminant dans les propriétés du système. Le modèle classique du circuit n'apparaît plus que comme un cas particulier d'une classe plus générale de modèles dans lesquels les différentes vitesses de circulation seraient des paramètres.

3.3 Pour un circuit dynamique et complexe

3.3.1 Du temps logique au temps historique

Nous savons à présent qu’il est possible de construire un modèle de circulation de la monnaie et d’y observer profit et paiement de l’intérêt, sous réserve de distinguer les durées caractérisant la circulation des grandeurs réelles et monétaires.

Malgré ces avancées importantes, le modèle de Zezza reste limité par certaines contraintes propres à la théorie du circuit monétaire. La construction d’un modèle de circuit réellement dynamique passe par l’abandon des dernières hypothèses simplificatrices qui placent le circuit hors du temps concret ¹¹, en particulier :

- l’usage d’une période abstraite, unique et refermée sur elle-même,
- la synchronisation des actions individuelles.

3.3.2 Un circuit dynamique

L’une des hypothèses centrales de la théorie du circuit monétaire est celle de l’économie monétaire de production, selon laquelle, on l’a vu, le processus de production prend du temps.

« At the heart of the [theory of monetary circuit] is the notion [...] that production requires time, and that costs of production have to be paid before receipts from sales can be obtained. Monetary wages must therefore be paid in advance, and this requires firms to have enough liquidity before production occurs. » (Zezza 2011, p. 3)

Selon Henry et Seccareccia :

« L’acte de production est un processus qui se déroule dans le temps historique. Cependant, la production peut fort bien être analysée dans le *temps logique*, lorsque le processus qui la soustend se reproduit à l’identique d’une période à l’autre. La notion de temps logique correspond à celle de “temps circulaire” chez les physiciens. Dans le temps logique, il ne peut survenir *aucun changement endogène* dans le système étudié ; c’est d’ailleurs la raison pour laquelle toutes les observations relevées ou

11. Selon Lavoie (1987, p. 37), Robinson (1962) « a défini deux concepts du temps : le temps historique et le temps logique (...) Le temps historique est le temps qui correspond à la véritable évolution de nos économies. C’est le temps du vécu, le temps du concret, le temps irréversible ; le temps où chaque décision aura des répercussions irrémédiables sur l’avenir. Le temps logique est le temps de l’éternité, le temps de l’abstrait, le temps réversible ; le temps où le passé et le futur se confondent. C’est malheureusement le temps de la plupart des modèles économiques. »

mesures prises sur un système en équilibre dans le temps logique sont indépendantes du temps historique. Dans un tel cadre analytique, le découpage du temps en périodes de longueur définie ne peut être que tout à fait arbitraire, car chaque période de reproduction ne peut être que l'image parfaite des précédentes. C'est la raison pour laquelle l'on peut dire que se situer "dans le temps logique" revient à se situer "hors du temps". » (Henry et Seccareccia 1982, p. 7)

En somme, dans le temps logique, une seule période est représentative de toutes les autres. Or la théorie du circuit monétaire s'appuie précisément sur une représentation de la période totalement abstraite, refermée sur elle-même, isolée du passé dont elle ne reçoit rien comme du futur à qui elle ne transmet rien. On peut alors se demander si, enfermé dans un cadre aussi étroit, le processus de production prend *réellement* du temps.

Dans tous les modèles fidèles à la théorie du circuit monétaire, une fois que les salaires sont versés (en début de période), les travailleurs sont contraints d'attendre la fin du processus de production (en fin de période) pour pouvoir consommer. Pourquoi cela ? Parce qu'en début de période, au moment où les travailleurs sont payés, aucun produit n'est encore disponible. Les travailleurs ne peuvent donc dépenser leurs salaires que dans l'achat de la production pour laquelle ils ont été payés. Ainsi, bien que la théorie du circuit monétaire insiste si fortement sur l'idée que la production prend du temps, cette durée n'excède pas celle pendant laquelle les salariés peuvent patienter sans consommer.

Cette représentation des enchaînements réels et monétaires au sein de la période n'est pas seulement irréaliste ; elle est contradictoire avec la notion même d'économie monétaire de production. En effet, si les salariés pouvaient attendre la fin du processus de production sans consommer, ils n'auraient pas besoin d'être payés en avance ; ils pourraient se contenter d'un engagement de paiement — par exemple en bons sur le produit à venir¹². L'économie de production serait une économie de crédit mais

12. Pour Marx :

« Prenons le premier ouvrier venu, par exemple, un tisserand. Le capitaliste lui fournit le métier à tisser et le fil. Le tisserand se met au travail et le fil devient de la toile. Le capitaliste s'approprie la toile et la vend 20 marks par exemple. Le salaire du tisserand est-il alors une part de la toile, des 20 marks, du produit de son travail ? Pas du tout. Le tisserand a reçu son salaire bien avant que la toile ait été vendue et peut-être bien avant qu'elle ait été tissée [...] Le salaire n'est donc pas une part de l'ouvrier à la marchandise qu'il produit. Le salaire est la partie de marchandises déjà existantes avec laquelle le capitaliste s'approprie par achat une quantité déterminée de force de travail productive. » (Marx 1847 [1976], p. 17)

Et plus loin :

non une économie monétaire puisque la monnaie se caractérise par sa liquidité.

« [...] the use of money must give rise to an immediate and final payment and not to a simple commitment to make a payment in the future [...] » (Graziani 2003b, p. 60)

Par conséquent, pour construire un modèle cohérent avec les hypothèses fondamentales de la théorie monétaire de la production, il ne suffit pas de supposer que les salaires sont payés en avance, il faut encore admettre que :

- la production prend réellement du temps — par exemple en s'étalant sur plusieurs périodes ;
- les travailleurs ne peuvent attendre la fin du processus de production pour dépenser leurs salaires ;
- il existe en début de période des marchandises dont la production est achevée ou quasi-achevée et sur lesquelles se porte la dépense des salaires de la période ; ces marchandises sont nécessairement le produit de la dépense de la force de travail au cours de périodes antérieures.

On ne peut donc pas, dès qu'on cherche à prendre en compte le fait que la production prend réellement du temps, continuer à raisonner dans le cadre abstrait de la période isolée¹³. Au contraire, chaque période doit être reliée à la période antérieure et à la période suivante par des transferts de produits — finis et non finis. Nous allons voir dans la section suivante qu'il doit en être de même pour la monnaie.

« L'ouvrier reçoit du capitaliste une partie des moyens de subsistance existants. A quoi lui servent ces moyens de subsistance ? A sa consommation immédiate. Mais dès que je consomme des moyens de subsistance, ils sont irrémédiablement perdus pour moi, à moins que j'utilise le temps pendant lequel ces moyens assurent mon existence pour produire de nouveaux moyens de subsistance, pour créer par mon travail de nouvelles valeurs à la place des valeurs que je fais disparaître en les consommant. » (Marx 1847 [1976], p. 31)

13. A notre connaissance, Dupont et Reus (1989) sont les premiers chercheurs à avoir tenté de construire un modèle de circuit dynamique dans lequel la production prend réellement du temps, en distinguant la durée de production de la périodicité des salaires :

« Le temps de production fait que, si l'activité donne lieu immédiatement à la rémunération de facteurs, elle ne se matérialise que tardivement sous forme de produits finis. [...] Deux durées caractérisent l'activité productive: le temps d qui sépare deux versements de revenus de facteurs, et le temps D d'achèvement des produits. » (Dupont et Reus 1989, p. 89–90)

3.3.3 Un circuit complexe

Une autre difficulté logique propre au circuit classique se situe cette fois-ci en fin de période, après le remboursement des crédits, au moment dit de la « clôture » du circuit. A cet instant-là, dans la théorie du circuit monétaire, toute la monnaie doit avoir reflué vers la banque pour disparaître dans le remboursement du crédit¹⁴.

« The logical closure of the circuit therefore requires that all income is spent [...] » (Zezza 2011, p. 8)

Tout retard dans la dépense des ménages vient s'opposer à la clôture du circuit. Le problème posé par l'épargne des ménages a pris une place très importante dans la littérature du circuit de la monnaie car, tout comme le paradoxe des profits, il révèle une contradiction essentielle entre la théorie du circuit monétaire et le monde réel dans lequel la préférence pour la liquidité des ménages ne pose *en général* pas de problème.

Le problème posé à la théorie du circuit monétaire par l'épargne des ménages est très semblable à celui posé par l'intérêt payé aux banques, puisqu'il apparaît comme une fuite de la monnaie hors du circuit et s'oppose dès lors à sa clôture logique. Cependant, les solutions que Zezza a mises en oeuvre pour résoudre la question du profit et de l'intérêt sont selon lui inopérantes face au problème de l'épargne :

« [...] assumptions about velocity alone are insufficient to close the circuit by extinguishing the initial loan. » (Zezza 2011, p. 8)

Pour nous, encore une fois, la difficulté posée par l'épargne des ménages trouve sa source dans une des hypothèses simplificatrices de la théorie du Circuit : celle de la clôture du circuit par le reflux simultané de toutes les unités monétaires. Cette exigence théorique engendre une double contradiction :

- une contradiction interne : la clôture du circuit appelant la disparition complète de la monnaie, l'économie monétaire de production s'accomplirait en perdant son caractère monétaire, dont on nous dit pourtant qu'il lui est essentiel ;
- une contradiction externe : dans le monde réel, tous les jours des crédits sont remboursés, sans que *jamais* l'économie ne cesse d'être monétaire.

Si l'on veut construire un modèle dynamique d'économie avec monnaie endogène, et qui soit *en permanence* monétaire, il faut renoncer à l'hypothèse simplificatrice du remboursement simultané de tous les crédits. Il faut que, comme dans le monde réel, flux et reflux de monnaie se croisent sans cesse.

14. Ainsi, dans le modèle de Zezza, à la dernière ligne du tableau, toutes les dettes sont éteintes et tous les dépôts sont nuls.

« The idea is that in the real world, firms do not borrow and reimburse their debt all at the same time. ¹⁵ » (Rochon 2005, p. 132)

Bien sûr, prendre en compte ces dynamiques croisées des flux monétaires entraîne nécessairement une complexification radicale du modèle. Pour que la continuité monétaire du modèle soit assurée :

- les crédits doivent avoir une durée véritable, c'est-à-dire comprendre plusieurs périodes de base ¹⁶ ;
- les actions financières des agents qui composent le secteur des entreprises doivent être désynchronisées.

En effet, pour que tous les crédits ne parviennent pas à échéance au même moment, il ne suffit pas de leur accorder une durée réelle, mesurable en nombre de périodes de base du modèle, il faut encore qu'ils n'aient pas tous été contractés au cours de la même période. L'assèchement monétaire constaté en fin de période dans les modèles de la théorie du circuit a aussi pour cause l'utilisation d'une entreprise unique, abritant un processus de production unique, pour représenter l'ensemble des entreprises composant le secteur. On a vu au contraire ¹⁷ que dans le monde réel, la création monétaire est la conséquence de l'activité « plus ou moins parallèle » — c'est-à-dire décentralisée et asynchrone — d'un grand nombre d'entreprises :

« [...] la quantité de monnaie créée pour le secteur privé résulte un double mouvement : celui qui affecte les *prêts nouveaux* demandés et celui qui intéresse les *remboursements* des prêts anciens. Si les premiers dépassent les seconds la quantité de monnaie fournie par le crédit augmente si les premiers sont égaux aux seconds la quantité de monnaie demeure stationnaire, enfin, si les remboursements dépassent les emprunts la quantité de

15. Dans un papier plus ancien, Rochon reconnaît que le circuit *crédit-remboursement* isolé n'est qu'une hypothèse simplificatrice et que dans le monde réel les boucles formées par le flux et le reflux de la monnaie sont multiples et se superposent sans cesse :

« Also, while simplification requires us to deal exclusively with a single circuit, it must nonetheless be understood within the greater context of time. It is evident that many circuits exist simultaneously and that the economy does not operate in such a neat pattern — that is, circuits do not begin and end at the same moment; they are constantly overlapping. » (Rochon 1999, p. 7)

Graziani (2003b, p. 22) aussi admet que, dans les économies modernes, « les crédits sont continuellement accordés et continuellement remboursés. »

16. Accorder aux crédits une durée véritable, mesurable en nombre de périodes de base du modèle, est de toute façon indispensable dès lors qu'on a admis que le processus de production prenait réellement du temps ; comme le souligne Zezza (2011, p. 6), la durée du crédit doit être supérieure à la durée de production pour que le modèle soit viable.

17. Voir Le Bourva (1959), cité page 61.

monnaie décline. » (Le Bourva 1959, p. 721)

On peut donc imaginer un modèle plus complexe, peuplé d'un grand nombre d'entreprises hétérogènes, chacune abritant plusieurs processus de production avec des états d'avancement différents¹⁸. Les mouvements individuels désordonnés d'endettement et de remboursement de chacune de ces entreprises correspondraient aux variations de leurs stocks de produits finis et non finis. Au niveau macroscopique, les mouvements individuels se compensant mutuellement par la loi des grands nombres, il y aurait toujours des processus de production en cours, et donc des créances bancaires non échues, et donc de la monnaie dans les dépôts — et en particulier dans les dépôts des ménages, réglant au passage la question de la préférence pour la liquidité des ménages.

3.4 Conclusion

Un modèle macroéconomique, même s'il est peuplé d'un grand nombre d'agents autonomes, est toujours formé d'une structure qui encadre et limite le comportement des agents. Pour nous, la structure d'un modèle d'économie de marché doit être à la fois réelle et monétaire. Pour construire cette structure, nous nous sommes tournés vers les auteurs du courant postkeynésien et en particulier vers ceux de la théorie du circuit de la monnaie, parce qu'ils ont développé une pensée articulée centrée sur les interactions monétaires entre secteurs économiques.

Cependant, la théorie du circuit monétaire se situe à un niveau d'abstraction très élevé. Dans la théorie du circuit de la monnaie, trois notions sont confondues. Le circuit est à la fois :

- le système formé par les interactions réelles et monétaires entre agents économiques,
- la trajectoire décrite par la monnaie de sa création à sa destruction,
- la période de base du système.

Cette confusion découle de l'hypothèse selon laquelle toute unité monétaire a été créée au début de la période et doit disparaître à son terme. Alors, la description de la trajectoire de la monnaie de sa création jusqu'à sa destruction est nécessaire et

18. En somme, il s'agit simplement d'étendre à la dynamique du système (aux processus) le principe de modélisation par décomposition que nous voulions appliquer à la structure du système (aux agents). Comme le fait remarquer Ramat (2006, p. 46) : « Modéliser un système, c'est construire un objet abstrait représentant la structure et la dynamique du système observé [...] Le système est décomposable en sous-systèmes et chaque sous-système fait l'objet d'une modélisation [...] La décomposition peut aussi s'appliquer sur les éléments de la dynamique du système. Dans ce cas, on peut, par exemple, décomposer un état du système en sous-états. »

suffisante pour décrire le système formé par les relations monétaires entre agents, et la durée de cette trajectoire est égale à la durée de la période de base du système. Ce dispositif est complété par une série d'hypothèses annexes qui achèvent de faire du circuit une unité de temps abstraite qui encapsule tous les processus économiques. La théorie du circuit de la monnaie est donc basée sur un ensemble d'hypothèses fortes, destinées à réduire la complexité du système économique réel pour le rendre intelligible.

On ne peut pas reprocher aux auteurs du circuit d'avoir cherché à simplifier la réalité, d'avoir voulu réduire la complexité du réel. Un modèle n'est pas, ne peut pas être la réalité — toute activité de modélisation implique des opérations de simplification. Quant au niveau de simplification ou de complexité à retenir, on a vu que c'est une *décision*¹⁹ qui dépend de l'objectif assigné au modèle. La théorie du circuit monétaire a donc débouché sur un ensemble de modèles analytiques simples mais présentant des propriétés remarquables, au premier rang desquelles l'impossibilité du profit macroéconomique monétaire et du paiement de l'intérêt. En s'appuyant sur la classification proposée par Legay (1997, p. 40–44) on peut considérer ces modèles comme des *modèles de mécanismes*, utiles pour explorer certains aspects de la théorie de la monnaie endogène, ou comme des *modèles pédagogiques*, utiles pour diffuser les principes de l'économie monétaire de production. En revanche, tels quels, ces modèles sont beaucoup trop éloignés du réel pour pouvoir constituer des *modèles de décision et de prévision*.

Nous avons montré que l'obstacle principal au développement de modèles d'économie monétaire de production plus réalistes réside dans le caractère purement abstrait de la notion de période²⁰.

« Using a single period of production may be appropriate to outline the basic principles of the [Theorie of Monetary Circuit], but proper models for monetary economies should be developed in a dynamic context. »
(Zezza 2011, p. 11)

Toutefois, abandonner la période unique et construire un modèle dynamique d'économie monétaire de production, c'est se lancer dans la construction du modèle d'un système complexe formé d'un grand nombre de boucles réelles et monétaires entrelacées — c'est-à-dire, en termes d'informatique, d'un *système distribué* formé d'un grand nombre de processus *parallèles* et *asynchrones*. La complexité de ce système est telle qu'il paraît impossible d'y appliquer les formalismes analytiques et nous

19. Voir Legay (1997), cité page 47.

20. Comme le souligne Palley (2003, p. 79) : « Phénomène intrinsèquement dynamique, la monnaie endogène a besoin d'intégrer une structure macroéconomique où le niveau des crédits flue constamment. »

pensons que c'est parce qu'ils n'avaient pas d'alternative à ces formalismes que les auteurs du circuit sont restés arc-boutés sur les hypothèses réductionnistes liées à la période unique.

Pour nous, cependant, le relâchement des hypothèses réductionnistes de la théorie du circuit monétaire ne constitue pas un obstacle infranchissable. Au contraire, ce relâchement participe d'une démarche d'*abstraction décroissante* (Phan 2006) pleinement compatible avec l'approche multi-agents que nous avons choisie pour modéliser le caractère décentralisé des économies de marché.

Chapitre 4

Construction du modèle

Il est temps de descendre d'un degré dans l'abstraction et de se rapprocher de systèmes moins irréels.

Le Bourva (1962)

Dans le premier chapitre, nous avons identifié les systèmes multi-agents comme le cadre formel qui doit nous permettre de modéliser les économies de marché comme des économies dynamiques et complexes, peuplées d'un grand nombre d'agents hétérogènes, autonomes et concurrents. Nous avons retenu la notion de rationalité procédurale pour nous guider dans la modélisation du comportement des agents qui peupleront le modèle.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exploré la théorie du circuit monétaire. Nous y avons trouvé les bases théoriques sur lesquelles construire la structure dans le cadre de laquelle les agents modélisés pourront exercer leur autonomie. En revanche, le niveau d'abstraction élevé des modèles du circuit nous est apparu incompatible avec celui, plus concret, auquel se situent les modèles basés sur les agents. Nous avons alors montré que les techniques de modélisation basées sur les agents pouvaient justement offrir à la théorie du circuit monétaire l'occasion de dépasser le cadre très abstrait des modèles à période unique.

Ayant ainsi rassemblé les matériaux et aplani le terrain, nous pouvons passer à la phase de construction du modèle¹. Nous commençons par en tracer les grandes lignes

1. On trouvera dans Seppecher (2009) la description d'une première version du modèle. Bien que construit avec des agents aux fonctions de comportement un peu différentes, cette première version donnait déjà des résultats semblables à la version que nous présentons ici.

dans la section 4.1. Les sections suivantes détaillent la construction du modèle selon une approche ascendante : la section 4.2 présente les objets réels et monétaires par la manipulation desquels les agents entrent en interaction ; la section 4.3 est consacrée à la description des marchés, lieux où les agents établissent des relations directes et décentralisées ; la section 4.4 présente les différents types d'agents qui peuplent le modèle et décrit leurs fonctions de comportement.

4.1 Caractéristiques générales

Le modèle que nous voulons construire est un modèle qui se situe à un niveau d'abstraction moins élevé que les modèles classiques du circuit de la monnaie parce qu'il prend en compte de nombreux éléments de complexité du monde réel :

- la multiplicité des agents, leur hétérogénéité, leur autonomie,
- la décentralisation des interactions entre agents,
- le parallélisme asynchrone des processus réels et monétaires qu'ils mettent en oeuvre.

Notre intérêt est concentré sur ces aspects du modèle, et sur leurs conséquences au niveau de la dynamique macroéconomique du système, de sa capacité à se reproduire dans le temps en respectant une certaine stabilité interne. Le modèle que nous voulons construire n'est pas un *modèle de prévision et de décision* mais un *modèle de recherche* ; par conséquent nous ne cherchons pas à en faire un *modèle complet*, et nous écartons tous les éléments de complexité du réel qui ne semblent pas essentiels à notre objet tout en veillant à préserver les capacités d'évolution — de complexification — du modèle.

Dans cette section, nous donnons une vue d'ensemble du modèle. Nous soulignons les principales hypothèses simplificatrices que nous avons adoptées. Nous justifions les choix techniques opérés.

4.1.1 Un modèle d'économie monétaire de production

Une économie fermée

Toutes les grandeurs (monnaie, forces de travail, marchandises) qui circulent dans le modèle sont endogènes. Il n'y a pas d'échange avec l'extérieur.

La monnaie

Toute la monnaie qui circule dans le modèle est une monnaie de crédit. C'est une monnaie scripturale, un nombre inscrit dans les livres de comptes de la banque. Les

paiements se font par chèque ou par virement, les agents non bancaires ne manipulent jamais directement de monnaie. Le financement de la production est le seul objet du crédit. Les ménages n'ont donc pas accès au crédit.

Les marchandises

Toutes les entreprises produisent le même type de marchandise, qui est un bien de consommation. Pour les entreprises, ce bien est non périssable : il peut être stocké sans perte. En revanche pour les ménages l'achat vaut consommation immédiate.

Le capital productif

Le stock de capital productif des entreprises — les machines — est exogène. Il n'y a pas d'investissement productif, pas d'innovation, et donc pas de croissance.

Le temps

Chaque boucle du programme correspond à une période de base du modèle, dont la durée est définie comme celle qui sépare deux paiements consécutifs des revenus (salaires et dividendes) aux ménages. Nous dirons donc que la durée d'une période est égale à un mois.

Cela ne signifie pas que tous les événements intervenant au cours d'une période sont simultanés. La structure interne de la période est elle-même séquentielle et nous distinguons, au sein d'une période t , 8 instants (notés $t + \frac{0}{7}$, $t + \frac{1}{7}$, ... jusqu'à $t + \frac{7}{7}$) correspondant à 8 états distincts du système. Le diagramme de séquence des flux monétaires (figure 4.1, page 85) inspiré des diagrammes de séquence *UML*², donne une représentation graphique de l'enchaînement chronologique des états et des transitions monétaires au sein d'une période de base t .

Si la périodicité des revenus est fixée par la structure du modèle, les deux autres durées importantes — la durée du cycle de production, la durée du crédit — sont des paramètres exogènes, exprimés en nombre de périodes de base.

2. L'*Unified Modeling Language (UML)* est un langage de modélisation graphique. Dans sa version 2, il définit 13 types de diagrammes, structurels, comportementaux ou dynamiques, dont les diagrammes de séquence. A l'origine étroitement lié à la programmation orientée objet et au développement logiciel, son application ne se limite plus au seul domaine informatique.

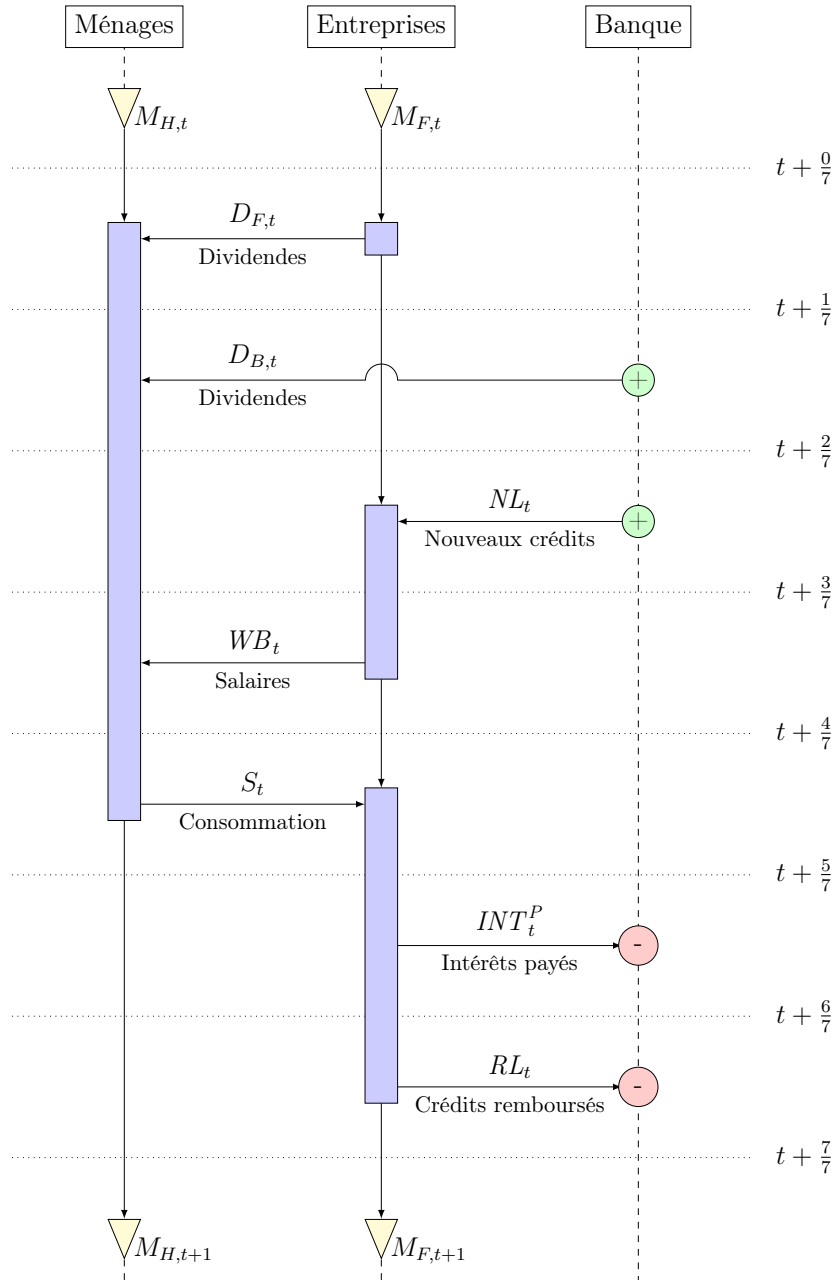


FIGURE 4.1 – Diagramme de séquence des flux monétaires

4.1.2 Un modèle décentralisé

Pour modéliser le caractère décentralisé des économies de marché, nous avons choisi de peupler le modèle d'agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents.

Multiplicité

Les agents qui peuplent le modèle sont de trois types : ménage, entreprise, banque. Le nombre d'agents de chaque type est un paramètre exogène.

Les ménages : Ils sont normalement les agents les plus nombreux. Les principales fonctions des ménages sont le travail et la consommation. Pour pouvoir consommer, les ménages doivent avoir un revenu ; pour avoir un revenu, ils doivent avoir un travail ou être propriétaires d'une entreprise ou de la banque. Les ménages sans emploi ne reçoivent aucun revenu. Quelle que soit sa situation matérielle et monétaire, un ménage ne disparaît pas.

Les entreprises : Elles sont normalement moins nombreuses que les ménages, puisque chaque entreprise peut employer plusieurs ménages. La principale fonction des entreprises est la production. Chaque entreprise a un propriétaire unique, un ménage choisi au hasard parmi tous les ménages qui peuplent la simulation. Chaque entreprise s'endette, embauche ou licencie, produit, vend, rembourse ses crédits et verse des dividendes à son propriétaire. Une entreprise peut être mise en faillite et disparaître. Elle est alors automatiquement remplacée, un an plus tard, par une entreprise identique (de même taille et de même productivité).

La banque : Elle diffère des ménages et des entreprises car c'est une banque unique, représentative de l'ensemble du secteur bancaire. En effet, dans une économie avec monnaie endogène, le secteur bancaire est généralement supposé être accommodant, l'initiative de la création monétaire via le crédit revenant aux entreprises³, la désagrégation du secteur bancaire n'a donc a priori qu'un intérêt secondaire pour l'étude de la dynamique macroscopique de l'économie modélisée.

La banque peut être mise en faillite et disparaître. Comme c'est une banque unique et que sa présence est indispensable, la faillite bancaire est donc synonyme de la crise systémique et la simulation s'interrompt.

3. Voir Le Bourva (1959), cité page 61.

Echelle du modèle : Si le modèle ne peut contenir qu'une seule banque, il peut en revanche supporter théoriquement n'importe quel nombre d'entreprises et de ménages. Comme notre modèle se situe à un niveau d'abstraction encore très élevé, il ne peut prétendre constituer un modèle de décision et de prévision, il est donc inutile de le peupler avec des populations de taille réaliste. L'expérience nous prouve qu'avec quelques centaines d'entreprises et quelques milliers de ménages, il est possible de conduire des simulations très rapides et présentant des résultats suffisamment robustes pour pouvoir être exploités.

Hétérogénéité

Les agents sont hétérogènes d'abord parce qu'ils sont divisés en trois classes d'agents (ménages, entreprises, banque) aux fonctions différentes. Cependant, c'est l'hétérogénéité au sein d'une même classe d'agents qui est importante pour la modélisation du caractère décentralisé des économies de marché.

Nous ne mettons pas l'accent sur les caractéristiques exogènes des agents — leurs dotations initiales, les paramètres qui fixent leur comportement — mais plutôt sur l'hétérogénéité endogène, celle qui découle de l'activité des agents eux-mêmes et qui se traduit d'un agent à un autre par des états différents (employé ou chômeur, bon ou mauvais débiteur...) ou des niveaux différents (stocks d'inventaires, encaisses liquides, endettement...).

Autonomie

Les agents sont modélisés comme des agents réactifs simples. Les agents n'ont accès à aucune information macroéconomique (telle que le niveau moyen des prix ou des salaires, le taux inflation ou de chômage...). Chaque agent ajuste son comportement sur la base des déséquilibres constatés entre son état interne et ses objectifs. Les objectifs des agents sont définis par rapport à des niveaux normaux exogènes et il n'y a pas de processus d'apprentissage. Les fonctions de réaction des agents sont partiellement stochastiques.

Concurrence

Les réseaux sociaux occupent une place limitée dans le modèle. Les relations sociales se réduisent aux relations *employeur-employé* et *fournisseur-client* entre ménages et entreprises et à la relation *créancier-débiteur* entre la banque et les entreprises. De plus, les relations *employeur-employé* et *fournisseur-client* sont des relations faibles, remises en cause très régulièrement sur le marché des biens et le

marché du travail. Il n’y a aucune relation horizontale directe d’agent à agent d’une même classe — aucune solidarité de classe — toutes les relations entre ménages et entre entreprises se réduisent à des relations indirectes de concurrence par l’intermédiaire des marchés.

4.1.3 Un modèle informatique

Compte tenu de la complexité du modèle projeté, il nous a paru plus simple de construire entièrement le modèle plutôt que de s’appuyer sur une plateforme multi-agents existante. Nous avons donc dû programmer entièrement le modèle, y compris l’interface qui permet de le piloter et d’observer les résultats. Nous avons choisi pour cela le langage *Java*.

Un langage de haut niveau

Le langage *Java* est un langage de programmation orienté objet de haut niveau. Selon Axtell (2004, p. 12), c’est un langage susceptible de « repousser les limites » des modèles multi-agents. Il est moins rapide que le *C++*, mais plus facile à programmer : le programmeur est — presque — débarrassé des soucis de gestion de la mémoire. Moins préoccupé par les aspects techniques et par les bugs, le programmeur peut mieux se concentrer sur les questions de modélisation.

Un langage multi-plateformes

Le langage *Java* fonctionne indifféremment sur toute sorte de plateforme. On peut exécuter un programme *Java* sur n’importe quel type d’ordinateur. Il en est donc de même pour le code source : il est indépendant de la machine sur laquelle il a été écrit.

Le langage *Java* est donc en un sens universel ; c’est important puisque l’on sait que le langage de programmation du modèle en est le langage théorique naturel. Le langage *Java* est donc particulièrement adapté à la communication scientifique. Il permet d’élargir l’horizon d’utilisation et d’extension du modèle.

Interface graphique

Le langage *Java* dispose de nombreuses bibliothèques logicielles facilitant la construction d’une interface graphique. En particulier la bibliothèque libre *JFreeChart* offre une très grande variété de graphiques adaptés à la représentation dynamique de données économiques.

Application web

Le langage *Java* permet enfin de développer des applications exécutables en ligne. Il est possible d'installer le modèle à l'intérieur d'une page web, et dans n'importe quel navigateur.

4.1.4 Notations

Nous adoptons, pour désigner les variables du modèle, un système de notation inspiré de celui de Godley et Lavoie (2007) : les noms en majuscule désignent des grandeurs monétaires, les noms en minuscules désignent des grandeurs réelles, les lettres grecques désignent des ratios et des élasticités.

4.2 Les objets des sphères réelle et monétaire

Le modèle est formé de deux systèmes couplés : l'un représentant la sphère réelle, l'autre la sphère monétaire. Les règles de fonctionnement de ces deux systèmes sont des éléments essentiels de la structure du modèle et s'imposent aux agents. L'implémentation du modèle dans un langage orienté objet et l'encapsulation des données réelles et monétaires au sein d'objets extérieurs aux agents permettent d'assurer :

- le respect des contraintes physiques (règles de production, de transfert et de destruction des biens),
- le respect des contraintes monétaires (règles de création, de transfert et de destruction de la monnaie).

Entreprises et ménages interagissent par la manipulation d'objets de la sphère réelle et de la sphère monétaire. La banque, en revanche, ne manipule aucun objet de la sphère réelle : son action est limitée à la sphère monétaire. Le diagramme d'interaction (figure 4.2, page 90) propose une représentation des flux reliant les agents, projetés sur deux plans parallèles.

4.2.1 Les objets de la sphère réelle

Les objets de la sphère réelle représentent les objets et les processus physiques impliqués dans la production des marchandises.

La sphère réelle comprend cinq classes d'objets :

- L'objet `LabourForce` représente la force de travail d'un ménage ;
- L'objet `Factory` représente une usine ;
- L'objet `Machine` représente une unité de capital ;

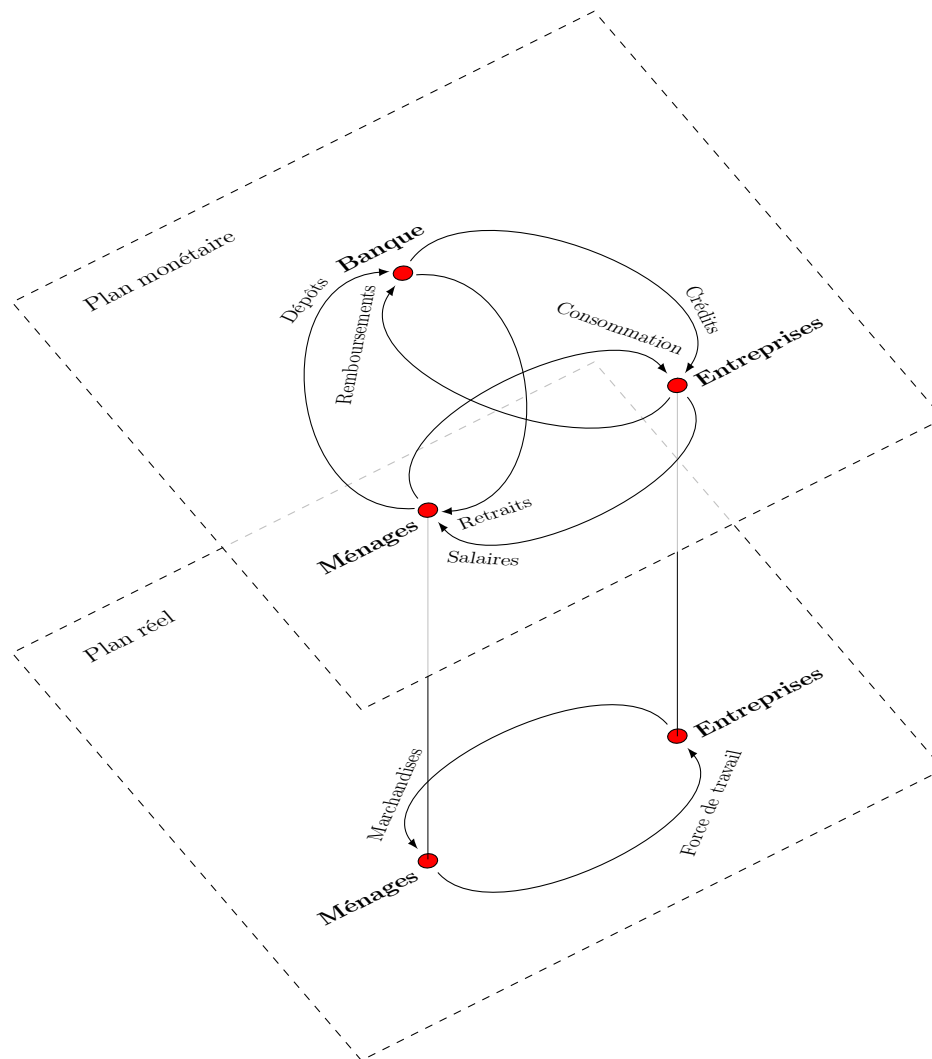


FIGURE 4.2 – Diagramme d'interaction, flux réels et monétaires

- L’objet `ProductionProcess` représente un processus de production ;
- L’objet `Goods` représente un stock de marchandises.

La force de travail

Un objet de type `LabourPower` représente la force de travail d’un ménage. Cette force de travail peut prendre deux états : `available` (disponible) et `exhausted` (épuisée). Dans la version actuelle du modèle, les forces de travail des différents ménages ne sont pas autrement distinguées.

En début de période, toutes les forces de travail sont disponibles. Lorsqu’à l’appel de son employeur, un ménage travaille, la méthode `expend()` (dépenser) de sa force de travail est appelée. Si la force de travail du ménage est disponible au moment de l’appel à `expend()`, la force de travail peut être dépensée : l’état de la force de travail passe à `exhausted`. En revanche, si au moment de l’appel à `expend()` la force de travail est déjà épuisée, alors une erreur est générée qui vient interrompre l’exécution de la simulation⁴. Au cours d’une période, une force de travail ne peut donc être dépensée qu’une seule fois, un ménage ne peut travailler qu’une seule fois.

L’usine

Un objet de type `Factory` représente une usine, c’est-à-dire la partie de l’entreprise chargée de la mise en oeuvre de la production. Un objet de type `Factory` est essentiellement composé d’une collection de machines. Dans la version actuelle du modèle, le nombre de machines dont est dotée chaque usine est un paramètre exogène⁵.

Lors de la phase de production, l’entreprise transmet à l’usine la liste des travailleurs — des ménages — employés par l’entreprise. Comme le nombre de travailleurs peut être inférieur au nombre de machines — soit parce que le niveau de production décidé par l’entreprise est inférieur au plein emploi des capacités de production, soit parce tous les postes offerts sur le marché du travail n’ont pas été

4. En pratique, cela n’arrive jamais, car l’entreprise ne sollicite chacun de ses employés qu’une seule fois par période. Mais si l’entreprise tentait de le faire, par exemple suite à une erreur de programmation, l’existence de ce contrôle l’en empêcherait. On est donc certain que chaque ménage ne travaille jamais plus d’une fois par période. On voit par cet exemple comment la notion d’*encapsulation* propre à la programmation orientée objet, permet de modéliser les contraintes réelles du modèle indépendamment de l’implantation des agents. Comme dans le monde réel, ces contraintes sont *extérieures* aux agents.

5. Dans la version actuelle du modèle, les stocks de capital productif sont donnés (voir la section consacrée aux caractéristiques générales du modèle, page 84). C’est une hypothèse forte, uniquement justifiée par le principe d’abstraction décroissante, et destinée à être levée dès que possible.

pourvus — l’usine doit répartir la main d’oeuvre disponible sur les machines existantes.

On admet que la direction de l’usine a pour premier objectif d’achever les travaux en cours avant d’en commencer d’autres. Pour cela, elle range les machines par ordre de priorité. Les machines dont le processus de production est le plus avancé sont prioritaires. Parmi les machines dont le processus de production est au même niveau d’avancement, les machines sont rangées par productivité décroissante⁶.

Machines et processus de production

Un objet de type `Machine` représente une machine, c’est-à-dire une unité de capital productif. Chaque machine k est définie par deux paramètres :

- d_k^p durée d’un cycle de production ;
- pr_k productivité périodique moyenne.

Dans la version actuelle du modèle, la durée d’un cycle de production et la productivité périodique moyenne de chaque machine sont des paramètres exogènes.

Chaque machine comporte aussi un objet de type `ProductionProcess`, représentant le processus de production associé à la machine. Un objet de type `ProductionProcess` encapsule un nombre entier $p_{k,t}$, qui représente l’avancement du processus de production.

Chaque fois qu’un ménage travaille — c’est-à-dire chaque fois qu’il est appelé à dépenser sa force de travail sur la machine qui lui a été désignée — l’avancement du processus de production associé à la machine k est incrémenté⁷ :

$$p_{k,t} = \begin{cases} p_{k,t-1} + 1 & \text{si la machine } k \text{ est actionnée,} \\ p_{k,t-1} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Comme pour les forces de travail qui ne peuvent être dépensées qu’une fois par période, un processus de production ne peut être avancé qu’une fois par période. Par conséquent, le cycle complet d’un processus de production s’étalera sur un nombre de périodes au moins égal à d_k^p . Ce détail de l’implémentation de l’objet `ProductionProcess` est une caractéristique très importante du modèle qui relie les sphères réelle et monétaire puisque c’est parce que la production prend du temps que

6. Si la productivité des machines composant une usine est à peu près homogène, alors les rendements seront approximativement constants. En revanche, plus la productivité des machines composant l’usine sera hétérogène, plus les rendements seront décroissants.

7. Dans la version actuelle du modèle, les processus de production ne consomment donc ni matières premières, ni biens intermédiaires, ni énergie.

les entreprises ont besoin du crédit bancaire pour financer le processus de production⁸.

Lorsque le processus de production est achevé, un objet de type **Goods** représentant la marchandise nouvellement produite est créé. A la date t , le volume de la production de la machine k est :

$$q_{k,t} = \begin{cases} pr_k d_k^p & \text{si } p_{k,t} = d_k^p, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Lorsque le processus de production associé à une machine est achevé, il est annulé. Un nouveau processus sera créé dès qu'un ménage dépensera à nouveau sa force de travail sur cette machine⁹.

Les marchandises

Un objet de type **Goods** représente un stock de marchandises. Il associe deux grandeurs, un volume de marchandise et sa valeur. Aucune autre propriété ne vient distinguer deux stocks de marchandises. En particulier, il n'est fait aucune distinction d'utilité ou de qualité entre les marchandises : tous les objets de type **Goods** représentent différents volumes d'un même bien destiné à la consommation des ménages.

L'encapsulation du volume et de la valeur dans l'objet **Good** permet de définir rigoureusement les conditions de création et de transfert de ces grandeurs. Nous venons de voir comment était déterminé le volume des marchandises nouvellement produites par une machine donnée : la dépense réitérée de forces de travail sur la machine en est la condition nécessaire et suffisante. La valeur des marchandises nouvellement produites, elle, est égale à la somme des salaires versés pour l'avancement et l'achèvement du processus de production correspondant.

« Dans le cas présent, dans le cadre de notre économie verticalement intégrée, le coût de production des stocks est égal aux salaires versés aux ménages dans la période. » (Lavoie 2003, p. 151–152)

Un objet de type **Goods** dispose de méthodes lui permettant de recevoir un volume de marchandise transféré depuis un autre objet de même type **Goods**. Ces méthodes définissent les « lois » qui règnent sur l'univers des marchandises :

- les volumes de marchandises sont conservés par les transferts ;

8. Voir Keynes (1923 [1971]), cité page 60 et Zezza (2011), cité page 74.

9. La fonction de production sous-jacente à cette implémentation de l'objet **Machine** est donc une fonction à facteurs complémentaires.

- les stocks de marchandises sont évalués à leur coût de production ou à leur coût de remplacement¹⁰.

4.2.2 Les objets de la sphère monétaire

Les objets de la sphère monétaire représentent les objets impliqués dans la création et la circulation de la monnaie. La sphère monétaire comprend quatre classes d'objets :

- Un objet de type `Account` représente un compte bancaire ;
- Un objet de type `Deposit` représente un dépôt monétaire ;
- Un objet de type `Loan` représente un crédit ;
- Un objet de type `Cheque` représente un chèque.

Compte courant

Un objet de type `Account` représente le compte courant d'un agent non bancaire — un ménage ou une entreprise — auprès de la banque. Un objet de type `Account` est composé d'un dépôt monétaire (objet de type `Deposit`) et une liste de crédits bancaires (objets de type `Loan`).

Dépôt monétaire

Un objet de type `Deposit` représente un dépôt monétaire d'un agent non bancaire — un ménage ou une entreprise — auprès de la banque. Un objet de type `Deposit` encapsule un nombre entier représentant le montant du dépôt. Cet objet est doté d'une méthode unique `Deposit.credit()` admettant un paramètre v . Un appel à cette méthode permet d'augmenter la valeur du dépôt (crédit si $v > 0$) ou de la diminuer (débit si $v < 0$). Le montant d'un dépôt ne peut être négatif : si on tente de débiter un montant supérieur au montant du dépôt, une erreur sera générée et la simulation s'interrompra¹¹.

Les agents non bancaire n'ont pas d'accès direct à l'objet `Deposit` qui est encapsulé à l'intérieur de l'objet `Account`. Un agent ne peut donc pas faire varier librement

10. Voir Lavoie (2003, p. 151).

11. Normalement, aucun agent n'engage de dépense sans s'être assuré de disposer des sommes nécessaires sur son compte. Une telle interruption est donc *a priori* impossible mais la présence de ce contrôle extérieur aux agents permet de s'en assurer, indépendamment de l'implémentation des agents : une erreur de programmation d'un agent ne peut pas conduire à une création monétaire indue.

le montant du dépôt, qui est placé sous la protection de la banque qui seule y a accès et à qui l'agent doit s'adresser pour toutes ses opérations monétaires.

Toute la monnaie qui existe dans le modèle n'existe que sous forme de dépôts : la masse monétaire est égale à la somme des dépôts des agents non bancaires.

Crédit bancaire

Un objet de type `Loan` représente un crédit de la banque unique à un agent non bancaire¹². Chaque prêt l est défini par quatre paramètres :

- r_l le taux d'intérêt mensuel ;
- L_l le principal ;
- d_l la date d'échéance ;
- q_l la qualité du prêt.

Lorsque la banque accorde un nouveau crédit à un agent non bancaire, un nouvel objet `Loan` est créé avec pour principal le montant du crédit demandé. Cet objet est ajouté à la liste des crédits associés au compte de l'agent emprunteur. Simultanément, le dépôt associé à ce compte est crédité du même montant, sans qu'aucun autre dépôt ne soit débité.

Chaque mois, en fin de période, la banque consulte la liste des crédits associés au compte de chacun des agents. Pour chaque crédit, elle calcule le montant de l'intérêt et débite ce montant du dépôt associé. Si la date d'échéance d_l est atteinte, l'objet `Loan` correspondant est retiré de la liste des crédits associée à son compte. Simultanément, le dépôt monétaire associé à son compte est débité d'un montant équivalent sans qu'aucun autre dépôt ne soit crédité.

Le crédit bancaire est donc l'occasion d'une création monétaire et son remboursement l'occasion d'une destruction monétaire¹³.

12. Dans la version actuelle du modèle les entreprises sont les seuls agents à recourir au crédit bancaire. Néanmoins, rien dans l'implémentation de la sphère monétaire ne s'oppose à la construction d'un modèle dans lequel les ménages (ou des agents d'un autre type) auraient aussi accès au crédit.

13. Nous reviendrons sur ce point lorsque nous aborderons le financement de la production par la banque (voir page 107).

Chèques

La classe abstraite¹⁴ `Cheque` représente un moyen de paiement émis par un agent payeur et remis à un agent payé. Un objet de type `Cheque` encapsule un nombre entier représentant le montant du chèque. Un objet de type `Cheque` comporte une méthode abstraite : `transferTo()`.

Deux classes concrètes héritent de la classe abstraite `Cheque` :

- Un objet de type `RegularCheque` représente un chèque à tirer sur le compte bancaire d'un agent non bancaire ;
- Un objet de type `BankCheque` représente un chèque de banque.

L'implémentation de la méthode `transferTo()` est différente selon le type de chèque. Lors d'un appel à `RegularCheque.transferTo()`, le dépôt associé au compte courant de l'agent payeur est débité du montant du chèque et le dépôt associé au compte courant de l'agent payé est crédité du même montant. En revanche, lors d'un appel à `BankCheque.transferTo()`, le dépôt monétaire associé au compte courant de l'agent payé est crédité du montant du chèque sans qu'aucun autre dépôt monétaire ne soit débité.

Les deux types de chèques sont donc très différents. Les chèques ordinaires constituent le principal moyen de paiement utilisé dans le modèle, en permettant le transfert d'un montant donné d'un dépôt à un autre. Cependant on a vu que, dans ce modèle, un dépôt monétaire représente la dette de la banque vis-vis d'un agent non bancaire. Or la banque ne peut détenir de dette sur elle-même¹⁵. Par conséquent, dans ce modèle, lorsque la banque effectue un paiement il s'agit toujours, non d'un transfert monétaire, mais d'une création monétaire. C'est la raison pour laquelle nous avons été obligés d'introduire les chèques de banque dans le modèle¹⁶.

14. En programmation orientée objet, une classe abstraite est une classe dont on ne peut créer aucune instance parce que sa définition est incomplète. Elle définit un certain nombre de propriétés communes à toutes les classes qui en hériteront, laissant à ces classes plus spécialisées (les classes concrètes) le soin de préciser l'implémentation des méthodes non définies au niveau supérieur (méthodes abstraites).

15. Nous reviendrons sur cette question lorsque nous nous intéresserons au capital de la banque (voir page 105).

16. Nous verrons que ce moyen de paiement, utilisé par la banque pour le paiement des dividendes, ne relève pas pour autant d'une forme de seigneurage (voir page 106 et page 143).

On peut penser qu'il aurait été plus simple de permettre à la banque de créditer directement le compte bancaire de son propriétaire des sommes correspondantes. Cependant cette solution présentait l'inconvénient d'introduire pour les ménages deux types de dividendes : ceux versés par la banque et faisant l'objet d'un virement, et ceux versés par les entreprises et faisant l'objet d'un chèque. En revanche, avec la solution du chèque, le ménage ignore complètement quel type de chèque est utilisé pour lui verser les dividendes : il l'encaisse de la même manière que ce chèque provienne d'une entreprise ou de la banque. De toute façon, le choix de l'une ou l'autre des solutions n'est

4.3 Les marchés

Les marchés ne sont ni des objets subordonnés aux agents, ni des agents doués d'autonomie. Ils se situent à l'interface des sphères réelle et monétaire. Ils jouent un rôle essentiel non seulement parce que c'est sur les marchés que les agents entrent en relation mais aussi parce que c'est là que se rencontrent les grandeurs réelles (les volumes de marchandise ou d'emploi) et les grandeurs monétaires (les prix, les salaires).

Cependant les marchés jouent un rôle déterminant dans les modèles basés sur les agents parce que de leur implémentation va dépendre le caractère général de l'économie modélisée : centralisée ou décentralisée. A l'aide d'un modèle basé sur les agents, Axtell (2005) montre comment les hypothèses de marchés centralisés sur lesquels reposent les modèles d'équilibre général conduisent à des propositions irréalistes.

« Walrasian markets in their Arrow-Debreu conception are an ideal type, in the terminology of the philosophy of science, a caricature of reality that abstracts from many details of real markets in order to provide a home for our intuitions and a point of departure for deeper exploration of market processes. Unfortunately, the embodiment of this ideal type in [computable general equilibrium] software, especially when utilised for policy purposes, institutionalises a series of propositions that more behaviourally realistic and decentralised models reveal to be false, namely, that markets do not disperse wealth, yield allocations that are determined solely by preferences and endowments and are not history-dependent. »
(Axtell 2005, p. 209)

On peut très bien construire des modèles macroéconomiques multi-agents avec des marchés centralisés : c'est le cas, par exemple, lorsqu'on confie au marché la tâche de déterminer le prix des transactions. Nous décidons au contraire de modéliser les marchés comme des lieux de rencontre directe et décentralisée entre des agents¹⁷. Dans une démarche radicale — suivant en cela Gintis (2006) — nous choisissons de limiter au maximum les informations auxquelles les agents ont accès sur ces marchés.

« Rather than using analytically tractable but empirically implausible ad-

qu'une question d'implémentation qui ne change rien aux propriétés du modèle.

17. Voir aussi Duménil et Lévy (1991), pour qui l'implémentation de procédures d'ajustement est étroitement liée à la modélisation de marchés décentralisés : « We call this generalized adjustment in the modeling of the behavior of economic agents "Disequilibrium Microeconomics." In this framework, the services of the auctioneer are not required. No agent computes any equilibrium prices prior to the occurrence of the market, and no auctioneer announces prices on the market. » (Duménil et Lévy 1991, p. 372)

justment mechanisms and informational assumptions (such as Walrasian tâtonnement and prices as public information), we treat the economy as complex system in which agents have extremely limited information, there is no aggregate price-adjustment mechanism institution, and out of equilibrium exchange occurs in every period [...] Agents in this economy have no knowledge of excess demand or supply for any good. Nor is there an “auctioneer” (Walras 1954) calling out prices, collecting information concerning aggregate demand, and dynamically ‘correcting’ the price structure, with the aim of moving the system towards market clearing. » (Gintis 2006, p. 2-3)

4.3.1 Le marché abstrait

La classe abstraite¹⁸ `Market` représente un marché, c’est à dire une institution permettant à une collection d’agents (les offreurs) de poster des offres et à une autre collection d’agents (les demandeurs) de répondre à ces offres. Les offreurs arrivent sur le marché avec des offres déjà formées. Ces offres associent une grandeur réelle à une grandeur monétaire. Les offres sont postées simultanément et les offreurs n’ont pas accès aux offres de leurs concurrents.

Les demandeurs, eux, se présentent sur le marché les uns après les autres. Un demandeur est aléatoirement sélectionné dans la liste. Il consulte un nombre limité d’offres et choisit parmi elles la plus intéressante. Le demandeur entre alors directement en relation avec l’offreur et la transaction est effectuée. Après la transaction, on examine l’état du demandeur et celui de l’offreur. Si le demandeur n’a plus rien à demander, il est retiré de la liste des demandeurs. Si l’offreur n’a plus rien à offrir, il est retiré de la liste des offreurs. Cette séquence est réitérée jusqu’à l’épuisement de l’une ou l’autre des deux listes. Il est très improbable que les deux listes soient simultanément épuisées : la plupart du temps, il restera donc des offreurs ou des demandeurs insatisfaits.

4.3.2 Le marché des biens

La classe concrète `GoodsMarket` représente le marché des biens. Elle hérite de la classe abstraite `Market`.

La collection des offreurs est formée de l’ensemble des entreprises peuplant le modèle. Les entreprises se présentent sur le marché des biens en tant que fournisseurs de marchandises. Les offres des entreprises associent un volume de marchandises à un

18. Voir la note 14, page 96.

prix unitaire. Le prix est déterminé par les entreprises avant que l'offre ne soit postée sur le marché : les entreprises sont des « price-makers ». Pour une période donnée, il peut donc y avoir autant de prix sur le marché des biens qu'il y a d'entreprises peuplant le modèle.

La collection des demandeurs est formée de l'ensemble des ménages peuplant le modèle. Les ménages se présentent sur le marché des biens en tant que consommateurs. Chaque consommateur dispose d'un budget¹⁹ qu'il cherche à dépenser intégralement. Pour cela, il consulte un nombre limité d'offres. Ces offres sont aléatoirement sélectionnées dans la liste des offres postées par les fournisseurs. La probabilité pour une offre d'être sélectionnée est proportionnelle au volume de marchandises offert²⁰. Le consommateur choisit parmi ces offres celle dont le prix est le moins élevé. Il entre en relation directe avec le fournisseur et lui achète le maximum de marchandises dans la limite de son budget et du volume de marchandises offert par le fournisseur. Si la transaction épuise le volume de marchandises offert par le fournisseur, ce dernier est retiré de la collection des offreurs et le consommateur va recommencer le processus de recherche jusqu'à avoir épuisé son budget. Si la transaction épuise le budget du consommateur, ce dernier est retiré de la collection des consommateurs et un autre consommateur est tiré au hasard, qui va à son tour mettre en oeuvre la même procédure de recherche et de dépense.

Le marché des biens est fermé lorsque l'une des deux collections est épuisée. Si c'est la collection des fournisseurs qui est épuisée la première, cela signifie que certains consommateurs ne sont pas parvenus à dépenser la totalité de leur budget. Si c'est la collection des consommateurs qui est épuisée la première, cela signifie que certaines entreprises ne sont pas parvenues à écouler la totalité des marchandises offertes.

4.3.3 Le marché du travail

La classe concrète `LaborMarket` représente le marché du travail. Elle hérite de la classe abstraite `Market`.

19. Nous verrons plus loin comment les ménages déterminent le budget qu'ils entendent consacrer à leurs achats de biens de consommation (voir page 133).

20. Le procédé de sélection des offres est celui de la *roulette biaisée* ou *roulette wheel selection*, procédé fréquemment utilisé dans les algorithmes génétiques : « Le principe de *Roulette wheel selection* consiste à associer à chaque individu un segment dont la longueur est proportionnelle à sa fitness. On reproduit ici le principe de tirage aléatoire utilisé dans les roulettes de casinos avec une structure linéaire. Ces segments sont ensuite concaténés sur un axe que l'on normalise entre 0 et 1. On tire alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1, puis on "regarde" quel est le segment sélectionné. Avec ce système, les grands segments, c'est-à-dire les bons individus, seront plus souvent adressés que les petits. » (Alliot et Durand 2005, p. 6).

Sur le marché du travail, on considère généralement que ce sont les ménages qui sont les offreurs et les entreprises qui sont les demandeurs, ce qui est logique dans la mesure où la force de travail est la « marchandise » qui est « offerte » sur ce marché. Néanmoins, dans notre modèle de marché abstrait, l'offreur est celui qui poste une offre associant un prix et un volume. Comme sur le marché des biens, les offreurs sont donc les entreprises.

La collection des offreurs est formée de l'ensemble des entreprises peuplant le modèle. Les entreprises se présentent sur le marché du travail en tant qu'employeurs. Les offres des employeurs associent un nombre d'emplois à un salaire unitaire. Le salaire est déterminé par les employeurs avant que l'offre ne soit postée sur le marché : les employeurs sont des « wage-makers ». Pour une période donnée, il peut donc y avoir autant de salaires sur le marché du travail qu'il y a d'entreprises peuplant le modèle²¹.

La collection des demandeurs est formée de l'ensemble des ménages sans emploi peuplant le modèle. Les ménages se présentent sur le marché du travail en tant que demandeurs d'emploi. Chaque demandeur d'emploi décide d'un salaire de réservation²² en dessous duquel il refuse de travailler. Le demandeur d'emploi consulte un nombre limité d'offres²³ et choisit celle dont le salaire est le plus élevé. Si ce salaire est supérieur ou égal à son salaire de réservation, le demandeur d'emploi entre en relation avec l'employeur et il est immédiatement embauché²⁴. Si le salaire de l'offre sélectionnée est inférieur au salaire de réservation du demandeur d'emploi, alors ce dernier refuse le poste et restera sans emploi pour la période courante. Dans un cas comme dans l'autre, le demandeur d'emploi est retiré de la liste des demandeurs d'emplois et un autre est tiré au hasard, qui va à son tour mettre en oeuvre la même procédure de recherche d'emploi. Après chaque embauche, l'employeur rectifie son offre. Lorsque tous ses postes vacants sont pourvus, il est retiré de la liste des employeurs.

Le marché est fermé lorsque l'une des deux collections (employeurs ou demandeurs d'emplois) est épuisée. Si c'est la collection des employeurs qui est épuisée la première, cela signifie que certains demandeurs d'emplois connaîtront un chômage involontaire.

21. Une autre conséquence est que plusieurs niveaux de salaire coexistent généralement au sein de la même entreprise, selon la date d'embauche des salariés.

22. Nous verrons plus loin (page 131) comment les ménages déterminent ce salaire de réservation.

23. Les offres consultées sont sélectionnées aléatoirement selon le procédé de la *roulette biaisée* (voir note 20, page 99) : la probabilité pour une offre d'être sélectionnée est proportionnelle au nombre de postes offerts.

24. Nous verrons plus loin que cette embauche fait l'objet d'un contrat de travail à durée déterminée (voir page 122). Dans la version actuelle du modèle, la durée du contrat n'est pas prise en compte par le demandeur d'emploi dans sa décision.

Si c'est la collection des demandeurs d'emplois qui est épuisée la première, cela signifie que certaines entreprises ne sont pas parvenues à pourvoir tous leurs postes vacants.

4.4 Les agents

Trois types d'agents peuplent le modèle :

- la banque, qui crée et gère les moyens de paiement, distribue des dividendes ;
- les entreprises, qui empruntent, emploient, produisent, vendent, remboursent, distribuent des dividendes ;
- les ménages, qui travaillent, consomment, épargnent.

Les agents se distinguent des objets réels et monétaires ainsi que des institutions comme les marchés, parce qu'ils disposent d'une capacité d'action et d'une autonomie de décision. Les agents poursuivent des buts, et prennent des décisions pour les atteindre. Les décisions se traduisent par des actions, manipulations (création, échange et destruction) d'objets réels et monétaires.

4.4.1 Un schéma général de comportement

A partir de la notion de *rationalité procédurale*²⁵, complétée par celle d'*agent réactif*²⁶ on peut développer un schéma général de comportement simple et réaliste, pleinement compatible avec l'analyse postkeynésienne du comportement des agents économiques.

« ... we need only assume, in contrast to neoclassical theory, a very limited amount of rationality on the part of economic agents. Agents act on the basis of their budget constraints. Otherwise, the essential rationality principle is that of adjustment. Agents react to what they perceive as disequilibria, or to the disequilibria that they take note of, by making successive corrections. There is no need to assume optimization, perfect information, rational expectations, or generalized price-clearing mechanisms. » (Lavoie et Godley 2001, p. 307-308)

Dans de tels modèles de comportement, conformément à l'analyse de Simon, les stocks (réels ou monétaires) jouent un double rôle : ils permettent d'amortir les chocs et ils expriment les déséquilibres que l'agent doit s'efforcer de corriger.

« It is inventories on the one hand, and money stocks on the other, which provide the essential flexible elements — the 'buffers' — which enable the

25. Voir la section consacrée à la notion de rationalité procédurale, chapitre 2, page 36.

26. Voir Ferber (2006), cité page 50.

whole system to function in a world of uncertainty (...) This ‘buffering’ does not merely enable the system to function, it also generates a kind of auto pilot whereby unexpected (and unwanted) stocks of money and inventories result in a corrective mechanism which comes into play during subsequent periods. » (Lavoie et Godley 2001, p. 292)

A partir de ces principes généraux, nous définissons un ensemble de règles que nous suivrons pour modéliser formellement le comportement des agents :

- L’état de chaque agent est défini par un certain nombre de variables (les variables d’état) que l’agent compare à des valeurs normales. L’agent ajuste son comportement pour tenter de réduire l’écart (le déséquilibre) entre les valeurs constatées et les valeurs normales.
- Chaque agent maintient des stocks (réels ou monétaires) dans lesquels il peut puiser pour faire face instantanément à une variation imprévisible de son environnement.
- Souvent l’agent peut agir directement sur le niveau de ses stocks, en augmentant ou en réduisant sa consommation de la ressource correspondante pour ramener le stock à son niveau normal.
- Parfois l’agent ne peut agir qu’indirectement, en agissant sur des variables qui sont susceptibles de permettre de rétablir l’équilibre (les variables de contrôle), mais sans savoir quelle ampleur donner à cet ajustement. L’ampleur de l’ajustement est alors déterminée aléatoirement dans un intervalle donné.
- Plus le déséquilibre est grand, plus il est probable que l’agent prendra une décision d’ajustement.
- Plus l’ampleur de l’ajustement envisagé est importante, moins il est probable que la décision d’ajustement soit effectivement mise en oeuvre par l’agent.

Nous construisons ainsi des agents réactifs, qui utilisent des procédures de recherche orientée et tâtonnante²⁷ pour rejoindre l’équilibre. Cependant, ce tâtonnement n’a rien du tâtonnement walrasien. Ce n’est que par l’action et l’observation du résultat de ses actes que l’agent accède à une information sur son environnement. Par conséquent, même s’ils recherchent l’équilibre, les agents agissent toujours hors de l’équilibre :

« In contrast to neo-classical economics, the adjustment processes towards the steady state will be based on simple reaction functions to disequilibria. There will be no need to assume that firms maximize profit or that agents optimize some utility function, nor will be any need to assume that agents have perfect information or know perfectly how the macroe-

27. Voir la discussion de la stochasticité comme source d’autonomie, chapitre 2, page 50.

conomic system behaves. In other words, there is no need nor no room for the rational expectations hypothesis. Still agents in our model are rational: they display a kind of *procedural rationality*, sometimes misleadingly called *weak rationality* or *bounded rationality*, or more appropriately named *reasonable rationality*. They set themselves norms and targets, and act in line with these and the expectations that they may hold about the future. These norms, held by agents, produce a kind of autopilot. Mistakes, or mistaken expectations, bring about piled-up (or depleted) stocks — real inventories, money balances, or wealth — that signal a required change in behavior. » (Godley et Lavoie 2007, p 16)

4.4.2 La banque

La banque est représentée par un objet de type **Bank**. C'est une banque unique, représentative de l'ensemble du système bancaire. Cet objet est essentiellement composé d'une liste de comptes courants (objets de type **Account**) eux-mêmes composés, nous l'avons vu, d'un dépôt monétaire et d'une liste de crédits. La banque regroupe donc l'ensemble des crédits et des dépôts présents dans le modèle, objets que les agents non bancaires ne peuvent manipuler directement, mais seulement en passant des ordres de paiement à la banque (les chèques).

Variables et paramètres

En tant que banque unique représentative de l'ensemble du système bancaire, la banque est — dans la version courante du modèle — plus une institution chargée de la gestion de la sphère monétaire qu'un agent à proprement parler. Son comportement est extrêmement simplifié et son autonomie très limitée : elle se réduit à la détermination du niveau des dividendes dans l'objectif de maintenir les capitaux propres à un niveau normal.

L'état de la banque est défini par deux variables (table 4.1, page 104) représentant l'une la somme des dépôts monétaires des agents non bancaires ($M_{B,t}$), l'autre la somme des dettes des agents non bancaires envers la banque ($L_{B,t}$).

Le comportement de la banque est régi par un ensemble de paramètres exogènes (table 4.2, page 104). Ces paramètres définissent un ensemble de valeurs « normales » qui guident le comportement de la banque. La banque agit en modifiant la valeur de certaines variables dont elle a le contrôle direct (table 4.3, page 104).

$L_{B,t}$	l'encours des crédits accordés aux agents non bancaires.
$M_{B,t}$	la somme des dépôts monétaires des agents non bancaires.
$K_{B,t}$	le capital de la banque.

TABLE 4.1 – Variables d'état de la banque

r_B	le taux d'intérêt normal.
r'_B	le taux d'intérêt majoré.
d_B	le terme normal des crédits.
\hat{d}_B	le terme maximal des crédits.
κ_B^*	le ratio normal de fonds propres.
μ_B^K	la propension à distribuer l'excès de capital.

TABLE 4.2 – Valeurs normales (exogènes) de la banque

$K_{B,t}^*$	l'objectif de capitaux propres.
$D_{B,t}$	le dividende versé au propriétaire de la banque.

TABLE 4.3 – Variables de contrôle de la banque

Capital de la banque

Dans le tableau des variables d'état de la banque (table 4.1), on remarque une troisième variable ($K_{B,t}$) représentant le capital de la banque. Cette variable n'est pas à proprement parler une variable d'état, dans la mesure où elle est complètement déterminée par les deux autres. Elle est donnée par l'égalité comptable de l'actif et du passif de la banque.

$$\underbrace{L_{B,t}}_{\text{Actif}} = \underbrace{M_{B,t} + K_{B,t}}_{\text{Passif}} \quad (4.3)$$

D'où :

$$K_{B,t} = L_{B,t} - M_{B,t} \quad (4.4)$$

Le capital de la banque est l'excès de la dette du secteur non bancaire sur les dépôts du secteur non-bancaire. Il constitue la richesse nette de la banque.

Lavoie souligne que dans le monde réel le capital de la banque peut avoir deux origines :

« It includes the funds initially put up by the owners of the bank when starting business (how that initial fund came about is rather mysterious however), plus the retained earnings of the bank. » (Lavoie 2000, p. 8)

Dans la version actuelle du modèle, avec une banque unique représentant l'ensemble du système bancaire, tout le capital de la banque est formé des profits que la banque n'a pas redistribués à son propriétaire. Pour autant, ce capital n'est pas de la monnaie.

Parce qu'on a défini la monnaie comme la somme des dépôts des agents non bancaires²⁸, la banque elle-même ne peut détenir de monnaie. Dans ce modèle, la monnaie est une dette de la banque vis-à-vis d'un autre agent, et la banque ne peut détenir de dette sur elle-même. Le capital de la banque n'est donc pas de la monnaie, il est au contraire la part des profits de la banque dont le propriétaire ne peut se servir comme moyen de paiement :

« The own capital of the bank constitutes a liability to itself. It represents the funds which the firm owes to its owners. In general, the own funds play a role similar to deposits that would be in the hands of the owners. The own funds, just like the deposits or the credits, are an accounting entry, but in contrast to deposits, they cannot be drawn down by the owners. » (Lavoie 2000, p. 8)

Pour être disponibles sous forme monétaire, les profits de la banque doivent préalablement être distribués sous forme de dividendes.

28. Voir la description de l'objet *Deposit*, page 94.

Paiement des dividendes

Le paiement des dividendes au ménage propriétaire de la banque constitue la première étape de la période. Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{0}{7})$ et l'instant $(t + \frac{1}{7})$ du diagramme de séquence de la figure 4.1, page 85.

Etape 1 : Observation La banque calcule son objectif de capitaux propres pour la période ($K_{B,t}^*$). Cet objectif est proportionnel à l'encours des crédits accordés par la banque.

$$K_{B,t}^* = \kappa_B^* L_{B,t} \quad (4.5)$$

Le ratio (κ_B^*) est un paramètre exogène, qui représente en quelque sorte la préférence pour la liquidité de la banque (Lavoie 2000, p. 8–9).

Etape 2 : Décision La banque considère l'écart entre le niveau constaté de capitaux propres ($K_{B,t+\frac{0}{7}}$) et son objectif ($K_{B,t}^*$). Si les capitaux propres sont inférieurs à l'objectif, aucun dividende n'est distribué. Si les capitaux propres dépassent l'objectif, la banque décide de distribuer une fraction (μ_B^K) de l'excédent sous forme de dividende ($D_{B,t}$).

$$D_{B,t} = \begin{cases} 0 & \text{si } K_{B,t+\frac{0}{7}} - K_{B,t}^* \leq 0, \\ \mu_B^K (K_{B,t+\frac{0}{7}} - K_{B,t}^*) & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.6)$$

Etape 3 : Mise en oeuvre Le dividende est versé au moyen d'un chèque de banque²⁹. Nous avons vu que l'encaissement d'un chèque de banque par un agent non-bancaire conduit à une création monétaire équivalente. La banque semble alors être en mesure de créer sans limite de la monnaie au bénéfice de son propriétaire. Pourtant, cette création monétaire n'est possible que dans les limites du capital de la banque ($K_{B,t+\frac{0}{7}}$). En effet, lorsque la banque verse un dividende ($D_{B,t}$), la somme correspondante est déposée sur le compte du ménage propriétaire de la banque. On a donc, au passif de la banque, une augmentation de la somme des dépôts tandis qu'à l'actif la somme des dettes reste inchangée.

$$M_{B,t+\frac{1}{7}} = M_{B,t+\frac{0}{7}} + D_{B,t} \quad (4.7)$$

$$L_{B,t+\frac{1}{7}} = L_{B,t+\frac{0}{7}} \quad (4.8)$$

29. Voir la description de l'objet `BankCheque`, page 96.

Le capital de la banque est donc affecté par cette opération :

$$\begin{aligned}
 K_{B,t+\frac{1}{7}} &= L_{B,t+\frac{1}{7}} - M_{B,t+\frac{1}{7}} \\
 &= L_{B,t+\frac{0}{7}} - (M_{B,t+\frac{0}{7}} + D_{B,t}) \\
 &= K_{B,t+\frac{0}{7}} - D_{B,t}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Ainsi les dividendes versés par la banque sont bel et bien prélevés sur le capital de la banque. Or on a vu que la banque cessait de distribuer des dividendes dès que son capital était inférieur à une certaine fraction de l'encours des crédits accordés. En effet, si le capital de la banque devenait négatif — c'est-à-dire si l'encours des dépôts dépassait l'encours de la dette — alors la banque ferait faillite et la simulation s'interromprait. La distribution de dividendes par la banque est donc toujours limitée par le capital que la banque a réussi à accumuler au cours des périodes antérieures.

Financement de la production

Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{1}{7})$ et l'instant $(t + \frac{2}{7})$ de la période t . Les nouveaux crédits, destinés au financement de la production, sont accordés pour une durée d_B au taux d'intérêt normal r_B . Dans son rôle de financier de la production, la banque est parfaitement accommodante : elle accepte toutes les demandes de crédit des entreprises. Le montant total des nouveaux crédits ($NL_{B,t}$) ne dépend pas de la volonté de la banque mais des besoins de financement des entreprises. Le montant des nouveaux crédits n'est pas contraint non plus par l'objectif de fonds propres de la banque :

« [...] at the very moment in time when a new loan has been granted, the bank is in a more risky position. This situation is however only a temporary one. For the larger stock of loans and deposits will allow the bank to rake up additional net interest revenues (unless the new loans are being defaulted in unusual proportions) [...] These additional revenues, when they are due and integrated to the retained earnings, will thus bring the [asset to own funds] ratio back to its initial level. At the end of the year, the balance sheet of the bank has increased in size, but the liquidity preference of the bank may remain the same. » (Lavoie 2000, p. 10)

La somme des nouveaux prêts ($NL_{B,t}$) venant s'ajouter à l'encours de la dette des agents non bancaire est égale à l'augmentation du montant total des dépôts monétaires des agents non bancaires³⁰.

$$L_{B,t+\frac{2}{7}} = L_{B,t+\frac{1}{7}} + NL_{B,t} \tag{4.10}$$

30. Voir la description de l'objet *Loan*, page 95.

$$M_{B,t+\frac{3}{7}} = M_{B,t+\frac{2}{7}} + NL_{B,t} \quad (4.11)$$

On montre facilement que cette étape n'affecte pas le capital de la banque.

$$\begin{aligned} K_{B,t+\frac{3}{7}} &= L_{B,t+\frac{3}{7}} - M_{B,t+\frac{3}{7}} \\ &= (L_{B,t+\frac{2}{7}} + NL_{B,t}) - (M_{B,t+\frac{2}{7}} + NL_{B,t}) \\ &= L_{B,t+\frac{2}{7}} - M_{B,t+\frac{2}{7}} \\ &= K_{B,t+\frac{2}{7}} \end{aligned} \quad (4.12)$$

On constate que le montant des nouveaux prêts n'est limité par aucune contrainte budgétaire, telle que l'existence de fonds prêtables offerts sur un marché de la monnaie. Conformément au principe de la monnaie endogène, « les crédits font les dépôts ».

« An agent opening a bank deposit doesn't lose his own liquidity, since he is usually able to make use of his deposit as a means of payment at any moment and without notice. At the same time a bank, when making a new loan, is granting additional liquidity without subtracting any liquidity from any of its own depositors. therefore, as Hawtrey concluded, when a bank makes a loan to a customer, it is not transmitting liquidity from one agent to another one but creating new liquidity [...] »
(Graziani 2003b, p. 82–83)

Gestion des moyens de paiements

Les étapes suivantes de la période — de l'instant $(t + \frac{3}{7})$ à l'instant $(t + \frac{5}{7})$ de la période t — impliquent en premier lieu les entreprises et les ménages dans la production et la consommation des marchandises. Au cours de ces étapes impliquant des échanges réels et monétaires, la banque joue un simple rôle de gestionnaire des moyens de paiement (paiement des salaires et dépense des ménages). Dans ce rôle, la banque ne dispose d'aucune autonomie. Elle se contente d'exécuter les ordres de paiement que lui transmettent les agents titulaires des comptes, sous réserve toutefois que les comptes soient suffisamment approvisionnés.

Chaque fois qu'un agent non bancaire effectue un paiement au profit d'un autre agent non bancaire, son compte est débité du montant correspondant, tandis que le compte du bénéficiaire est crédité du même montant. Comme la banque est une banque unique, elle héberge les comptes de tous les agents non bancaires. La somme des dépôts n'est donc pas affectée par de telles opérations de paiement et le capital de la banque reste inchangé.

Païement de l'intérêt

En fin de période, la banque s'efforce d'obtenir le paiement des intérêts sur la dette des agents non bancaires. Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{5}{7})$ et l'instant $(t + \frac{6}{7})$ de la période t .

La banque passe en revue les dettes de chacun de ses clients. Pour chacun des crédits, elle calcule le montant de l'intérêt que doit payer le client. La banque prélève directement le montant des intérêts du compte de ses clients en débitant le dépôt monétaire associé du montant correspondant.

$$M_{B,t+\frac{6}{7}} = M_{B,t+\frac{5}{7}} - INT_{B,t}^P \quad (4.13)$$

Le paiement des intérêts dus ($INT_{B,t}^P$) se traduit donc par une réduction égale du passif de la banque.

Lorsque le débiteur n'est pas en mesure de payer l'intérêt dû, la banque est toujours accommodante : les intérêts dus et non payés viennent s'ajouter à la dette du débiteur. Ce report vient augmenter l'encours de la dette des agents non bancaire à l'actif de la banque.

$$L_{B,t+\frac{6}{7}} = L_{B,t+\frac{5}{7}} + INT_{B,t}^{NP} \quad (4.14)$$

Que les intérêts soient prélevés sur le compte des débiteurs ou que leur paiement soit reporté à plus tard, le capital de la banque est immédiatement augmenté du montant correspondant.

$$\begin{aligned} K_{B,t+\frac{6}{7}} &= L_{B,t+\frac{6}{7}} - M_{B,t+\frac{6}{7}} \\ &= (L_{B,t+\frac{5}{7}} + INT_{B,t}^{NP}) - (M_{B,t+\frac{5}{7}} - INT_{B,t}^P) \\ &= K_{B,t+\frac{5}{7}} + INT_{B,t}^{NP} + INT_{B,t}^P \end{aligned} \quad (4.15)$$

Recouvrement des créances

Après avoir prélevé les montants dus au titre de l'intérêt, la banque procède au recouvrement des créances exigibles. Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{6}{7})$ et l'instant $(t + \frac{7}{7})$ de la période t .

Normalement les débiteurs disposent à ce moment des sommes nécessaires pour rembourser la banque. Comme pour le paiement de l'intérêt, le remboursement des crédits est à l'initiative de la banque qui prélève directement les sommes dues ($RL_{B,t}$) des comptes des agents non bancaires.

Il arrive — comme pour le paiement de l'intérêt — que certains débiteurs ne disposent pas de la trésorerie nécessaire pour permettre le remboursement des créances

exigibles. L'attitude de la banque vis-à-vis de ses mauvais débiteurs dépend de la qualité de la créance :

goodDebt : Lorsqu'une entreprise se trouve incapable de rembourser au terme d_B une créance notée *goodDebt*, la banque lui accorde automatiquement un nouveau délai : le terme du crédit passe de d_B à \hat{d}_B ; la qualité de la créance est dégradée à *doubtfulDebt* ; le taux d'intérêt applicable à la créance est un taux majoré (r'_B).

doubtfulDebt : A la fin de chaque période, la banque tente de procéder au recouvrement, même partiel, des créances notées *doubtfulDebt*, sans attendre l'échéance. Si au terme du crédit un agent débiteur se trouve incapable de rembourser une créance notée *doubtfulDebt*, la banque considère alors que l'agent est en situation de faillite.

Les faillites se traduisent à l'actif de la banque par l'effacement de toutes les dettes ($NPL_{B,t}$) des agents faillis, sans qu'il y ait au passif réduction équivalente du montant des dépôts. La possibilité de faillites introduit donc un déséquilibre entre destruction monétaire et destruction de créances au moment du recouvrement des créances.

$$M_{B,t+\frac{7}{7}} = M_{B,t+\frac{6}{7}} - RL_{B,t} \quad (4.16)$$

$$L_{B,t+\frac{7}{7}} = L_{B,t+\frac{6}{7}} - RL_{B,t} - NPL_{B,t} \quad (4.17)$$

Alors que le remboursement normal des dettes ($RL_{B,t}$) laisse le capital inchangé, l'effacement des dettes ($NPL_{B,t}$) des agents faillis implique pour la banque une destruction équivalente de capital³¹.

$$\begin{aligned} K_{B,t+\frac{7}{7}} &= L_{B,t+\frac{7}{7}} - M_{B,t+\frac{7}{7}} \\ &= (L_{B,t+\frac{6}{7}} - RL_{B,t} - NPL_{B,t}) - (M_{B,t+\frac{6}{7}} - RL_{B,t}) \\ &= L_{B,t+\frac{6}{7}} - M_{B,t+\frac{6}{7}} - NPL_{B,t} \\ &= K_{B,t+\frac{6}{7}} - NPL_{B,t} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Si $K_{B,t+\frac{7}{7}} < 0$, cela signifie que le capital de la banque est insuffisant pour permettre l'effacement de la dette. C'est alors la banque elle-même qui est en faillite³². Parce

31. Selon Lavoie (2000, p. 7) : « [The own funds] would be reduced whenever a borrower defaults on a loan. In that case, a similar amount would be deducted from the loan assets and the own funds liabilities when the bad loans need to be written off (i.e., when the accountants of the bank consider that the borrowers are unable to service the interest payments on their loan and are unable to ever pay back the loan). »

32. Nous suivons toujours Lavoie (2000, p. 7) : « When there is too large a proportion of bad loans, own funds, i.e., the net worth of the bank, can become negative, in which case the bank becomes insolvent. »

que dans notre modèle la banque est une banque unique représentative de l'ensemble du système bancaire, la crise est alors systémique et la simulation est interrompue.

4.4.3 Les entreprises

Une entreprise est représentée par un objet de type `Firm`. Cet objet est essentiellement composé d'un objet de type `Factory` représentant une usine³³ et un objet de type `Payroll` composé de la liste des employés de l'entreprise et de leur contrat de travail.

A chaque période, les entreprises déterminent leur plan de production et s'adressent à la banque pour obtenir les financements nécessaires à leur mise en oeuvre. Elles embauchent, paient les salaires, produisent et offrent leur production sur le marché. Elles remboursent les crédits échus et versent aux actionnaires une part des profits enregistrés.

La plupart de ces actions nécessitent des prises de décisions non triviales³⁴ :

- Quelle quantité de marchandises produire ?
- A quel prix offrir ces marchandises ?
- Quel salaire offrir à l'embauche ?
- Quelle part des profits conserver pour l'autofinancement de la production et quelle part distribuer ?

Le comportement des entreprises est modélisé par l'enchaînement de procédures d'ajustement simples. L'état d'une entreprise particulière est défini par un ensemble de variables qui lui sont propres (table 4.4 page 112). Chaque entreprise compare la valeur de certaines de ces variables d'état à des valeurs normales, exogènes au modèle et communes à l'ensemble des entreprises du secteur (table 4.5 page 113). En fonction de l'écart constaté entre ces variables d'état et les valeurs normales, elle ajuste à la hausse ou à la baisse les variables contrôlant son comportement (table 4.6 page 114).

Paiement des dividendes

Pour l'entreprise, le paiement des dividendes au ménage propriétaire de l'entreprise constitue la première étape de la période. Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{1}{7})$ et l'instant $(t + \frac{2}{7})$ du diagramme de séquence de la figure 4.1, page 85.

33. Voir la description de l'objet `Factory`, page 91.

34. Voir Godley et Lavoie (2007, p. 2) : « Rejecting as chimerical the concept of the neo-classical production function, post-Keynesians hold that, in an uncertain world, firms, operating under conditions of imperfect competition and increasing returns, must decide how much to produce and how many workers to employ, what prices to charge, how much to invest, and how to obtain finance. »

$in_{i,t}^{\hat{f}_i}$	le niveau des stocks d'inventaire de l'entreprise (produits finis), exprimé en volume.
$IN_{i,t}$	la valeur totale des stocks d'inventaire de l'entreprise (produits finis et non finis).
$\hat{p}r_{i,t}$	la production mensuelle moyenne de l'entreprise fonctionnant à pleine utilisation de ses capacités de production (égale à la somme des productivités mensuelles p_k des machines possédées par l'entreprise).
$\rho_{i,t}$	le taux moyen d'emplois vacants calculé sur les 3 derniers mois.
$w_{i,t}$	la quantité de main d'oeuvre effectivement employée par l'entreprise.
$\hat{w}_{i,t}$	la quantité de main d'oeuvre nécessaire à une pleine utilisation des capacités de production de l'entreprise (égale au nombre de machines de l'usine de l'entreprise).
$M_{i,t}$	la trésorerie de l'entreprise (égale au montant déposé par l'entreprise auprès de la banque).
$L_{i,t}$	la dette de l'entreprise.

TABLE 4.4 – Variables d'état de l'entreprise i

d_F^w	l'intervalle des durées des contrats de travail.
κ_F^*	le ratio normal d'autonomie financière.
in_F^*	le niveau normal des stocks d'inventaire (produits finis), exprimé en nombre de périodes de production à pleine utilisation des capacités de production.
ρ_F^*	le taux normal d'emplois vacants, exprimé en pourcentage du nombre d'emplois offerts.
\bar{W}_F	le salaire minimum légal, exprimé en unités monétaires.
ν_F^P	la flexibilité mensuelle maximale du prix unitaire des biens produits.
ν_F^w	la flexibilité mensuelle maximale du niveau de production, exprimée en pourcentage de la pleine utilisation des capacités de production.
ν_F^{Wup}	la flexibilité à la hausse mensuelle maximale du salaire offert à l'embauche.
ν_F^{Wdown}	la flexibilité à la baisse mensuelle maximale du salaire offert à l'embauche.
μ_F^K	la propension à distribuer le capital excédentaire.
μ_F^{in}	la propension à écouler les stocks d'inventaires.
λ_F	le rapport des capacités de commercialisation aux capacités de production.

TABLE 4.5 – Valeurs normales (exogènes) du secteur des entreprises

$w_{i,t}^*$	le niveau de production décidé (en nombre d'emplois).
$W_{i,t}$	le salaire offert.
$P_{i,t}$	le prix unitaire offert.
$sa_{i,t}^*$	le volume de marchandises offert à la vente.
$D_{i,t}$	le montant des dividendes versés aux actionnaires.

TABLE 4.6 – Variables de contrôle de l'entreprise i

On définit une procédure basée sur le principe de l'ajustement, la distribution du dividende ($D_{i,t}$) permettant de contrôler le niveau de capital de l'entreprise.

Etape 1 : Observation Le département comptable de l'entreprise commence par calculer le montant de ses capitaux propres formés par les profits accumulés au cours des périodes précédentes. A l'actif de l'entreprise, on trouve la valeur des stocks de produits finis et non finis ($IN_{i,t+\frac{1}{7}}$) ainsi que les dépôts monétaires auprès de la banque ($M_{i,t+\frac{1}{7}}$). Au passif de l'entreprise, on trouve la dette vis-à-vis de la banque ($L_{i,t+\frac{1}{7}}$) et les capitaux propres ($K_{i,t+\frac{1}{7}}$). L'égalité comptable de l'actif et du passif permet à l'entreprise de connaître le montant de ses capitaux propres.

$$\underbrace{IN_{i,t+\frac{1}{7}} + M_{i,t+\frac{1}{7}}}_{\text{Actif}} = \underbrace{K_{i,t+\frac{1}{7}} + L_{i,t+\frac{1}{7}}}_{\text{Passif}} \quad (4.19)$$

D'où :

$$K_{i,t+\frac{1}{7}} = IN_{i,t+\frac{1}{7}} + M_{i,t+\frac{1}{7}} - L_{i,t+\frac{1}{7}} \quad (4.20)$$

Puis le département comptable de l'entreprise calcule l'objectif de capitaux propres pour la période ($K_{i,t}^*$). Cet objectif est proportionnel au total du passif de l'entreprise au début de la période.

$$K_{i,t}^* = \kappa_F^* (K_{i,t+\frac{1}{7}} + L_{i,t+\frac{1}{7}}) \quad (4.21)$$

Etape 2 : Proposition L'entreprise considère l'écart entre le niveau constaté de capitaux propres ($K_{i,t+\frac{1}{7}}$) et son objectif ($K_{i,t}^*$). Si les fonds propres sont inférieurs à l'objectif, aucun dividende n'est distribué. Si les fonds propres dépassent l'objectif, le département de la comptabilité adresse à la direction de l'entreprise une proposition

de dividende ($\tilde{D}_{i,t}$) égale à une fraction (μ_F^K) de l'excédent.

$$\tilde{D}_{i,t} = \begin{cases} 0 & \text{si } K_{i,t+\frac{1}{7}} - K_{i,t}^* \leq 0, \\ \mu_F^K (K_{i,t+\frac{1}{7}} - K_{i,t}^*) & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.22)$$

Etape 3 : Décision L'entreprise accepte la proposition du département de la comptabilité, dans la limite du montant de la trésorerie disponible à cet instant ($M_{i,t+\frac{1}{7}}$).

$$D_{i,t} = \begin{cases} \tilde{D}_{i,t} & \text{si } \tilde{D}_{i,t} \leq M_{i,t+\frac{1}{7}} \\ M_{i,t+\frac{1}{7}} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.23)$$

Etape 4 : Paiement Le dividende est versé par chèque tiré sur le compte bancaire de l'entreprise.

$$M_{i,t+\frac{2}{7}} = M_{i,t+\frac{1}{7}} - D_{i,t} \quad (4.24)$$

Le dividende versé est déduit du capital de l'entreprise.

$$\begin{aligned} K_{i,t+\frac{2}{7}} &= IN_{i,t+\frac{2}{7}} + M_{i,t+\frac{2}{7}} - L_{i,t+\frac{2}{7}} \\ &= IN_{i,t+\frac{1}{7}} + (M_{i,t+\frac{1}{7}} - D_{i,t}) - L_{i,t+\frac{1}{7}} \\ &= (IN_{i,t+\frac{1}{7}} + M_{i,t+\frac{1}{7}} - L_{i,t+\frac{1}{7}}) - D_{i,t} \\ &= K_{i,t+\frac{1}{7}} - D_{i,t} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Détermination de la production et de l'emploi

Les entreprises déterminent ensuite leur niveau de production. Cette étape se situe entre l'instant ($t + \frac{2}{7}$) et l'instant ($t + \frac{3}{7}$) de la période t .

Parce que l'économie que nous voulons modéliser est complexe, l'incertitude est endogène et les entreprises ne peuvent avoir accès à aucune information sur l'état à venir de l'offre et de la demande.

« When the decision to produce is made, demand on the next market is, in fact, unknown. A classical-inspired construction would have agents estimate demand using the knowledge of disequilibrium in the *present*. »
(Duménil et Lévy 1987, p. 142)

De plus, parce que l'économie que nous voulons modéliser est décentralisée, nous avons décidé que les entreprises ne peuvent avoir accès à aucune donnée sur les états

passés de l'offre et de la demande agrégées³⁵. L'entreprise doit construire sa propre représentation de l'état présent de l'offre et de la demande à partir de son expérience individuelle. Parce que les stocks d'inventaire servent de tampon pour amortir les déséquilibres entre l'offre et la demande au niveau de l'entreprise, leur niveau joue un rôle essentiel dans la décision de production³⁶.

« This difference between supply and demand is equal, for accounting reasons, to the size of the new stock of inventories. In a decentralised economy, each enterprise is ignorant of the general industrial situation concerning supply and demand. Therefore, the degree of stockpiling, as experienced by individual sellers in the movement of their own inventories, is one of the best indicators of disequilibrium. » (Duménil et Lévy 1987, p. 137)

Chaque entreprise détermine son niveau de production en déterminant la force de

35. Voir la section 4.3 (page 97) dans laquelle nous discutons de la modélisation des marchés. Il y a donc deux niveaux d'incertitude dans le modèle :

- une incertitude endogène, imposée par le caractère complexe de l'économie modélisée, et qui rend impossible l'accès aux données futures, qu'elles soient individuelles ou agrégées ;
- une incertitude exogène, imposée par le caractère radical de notre approche de la modélisation des économies décentralisées, et qui interdit l'accès aux données agrégées passées et présentes.

L'interdiction d'accès aux données agrégées passées et présentes n'est donc qu'une hypothèse de travail pouvant au besoin être relâchée, tandis que l'impossibilité d'accès aux données futures est une propriété inhérente au modèle.

36. Pour Godley et Lavoie (2007), le mécanisme essentiel qui permet d'assurer l'ajustement de l'offre et de la demande s'appuie sur l'existence des stocks d'inventaire.

« Firms hold a buffer of finished goods, which can be called upon whenever demand exceeds production. Sales are always equal to demand because it is assumed that inventories are always large enough to absorb any discrepancy between production and demand. In this approach it is necessary to track the evolution of inventories from period to period, and to pay meticulous attention to the way in which they are measured, in particular to how they are valued. » (Godley et Lavoie 2007, p. 64-65)

L'importance du niveau des stocks dans la décision de production est soulignée par Cyert et March (2003) :

« In most models of output determination, we introduce expectations with respect to future sales and relate output to such predictions. Our studies indicates, to the contrary, that organizations use only gross expectations about future sales in the output decision. They may, and frequently do, forecast sales and develop some long-run production plans on paper, but the actual production decisions are more frequently dominated by day-to-day and week-to-week feedback data from inventory, recent sales, and sales staff. » (Cyert et March 2003, p. 167)

travail à employer. On définit une procédure basée sur le principe de l'ajustement ³⁷, l'objectif d'emplois de la période ($w_{i,t}^*$) étant déterminé par une variation à la hausse ou à la baisse ($\delta_{i,t}^w$) de l'objectif d'emplois de la période précédente ($w_{i,t-1}^*$).

Etape 1 : Observation Le département de la production de l'entreprise calcule le niveau normal des stocks d'inventaire (le volume de produits finis en stock $in_{i,t}^*$). Ce niveau est un multiple de la production moyenne de l'entreprise fonctionnant à pleine utilisation de ses capacités de production.

$$in_{i,t}^* = in_F^* \cdot \hat{p}r_{i,t} \quad (4.26)$$

Ce niveau normal est comparé au niveau des stocks (produits finis) effectivement constaté à cet instant ($in_{i,t+\frac{2}{7}}^{fi}$).

Etape 2 : Proposition Si le département de la production constate un déséquilibre (si $in_{i,t}^* \neq in_{i,t+\frac{2}{7}}^{fi}$), il propose à la direction de l'entreprise un ajustement de la main d'oeuvre employée ($\tilde{\delta}_{i,t}^w$). Pour déterminer l'orientation de l'ajustement, l'entreprise considère l'écart entre le niveau des stocks d'inventaire effectivement constaté à cet instant et le niveau normal des stocks d'inventaires ($in_{i,t+\frac{2}{7}}^{fi} - in_{i,t}^*$).

Un niveau des stocks inférieur au niveau normal est interprété comme un excès de la demande sur l'offre et conduit le département de la production à proposer une augmentation du niveau de l'emploi. Inversement un niveau des stocks supérieur au niveau normal est interprété comme un excès de l'offre sur la demande et conduit le département de la production à proposer une réduction du niveau de l'emploi. L'ampleur de l'ajustement est aléatoirement déterminée dans l'intervalle $[0, \nu_F^w]$.

$$\tilde{\delta}_{i,t}^w = \begin{cases} \alpha \nu_F^w & \text{si } in_{i,t+\frac{2}{7}}^{fi} - in_{i,t}^* < 0, \\ -\alpha \nu_F^w & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.27)$$

La variable α est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

37. Voir la section dans laquelle on présente le schéma général de comportement des agents (page 101).

Etape 3 : Décision Le département de la production soumet sa proposition d'ajustement à la direction de l'entreprise, qui l'accepte ou la rejette.

$$\delta_{i,t}^w = \begin{cases} \tilde{\delta}_{i,t}^w & \text{si } \alpha\beta < \left| \frac{in_{i,t+\frac{2}{7}}^f - in_{i,t}^*}{in_{i,t}^*} \right|, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.28)$$

La variable β est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

On voit que plus α est grand — c'est-à-dire plus l'ajustement proposé est grand — plus il y aura de chance que l'ajustement proposé soit rejeté. Inversement, plus le déséquilibre constaté est important, plus il y aura de chance que la direction accepte de mettre en oeuvre l'ajustement proposé. La direction de l'entreprise est modélisée comme *prudente*, voire *conservatrice*, elle ne modifie son comportement que sous la pression des événements.

Etape 4 : Ajustement de l'objectif L'entreprise ajuste son objectif d'emploi ($w_{i,t}^*$), dans les limites de l'intervalle $[0, \hat{w}_{i,t}]$ défini par les capacités de production de l'entreprise.

$$w_{i,t}^* = \begin{cases} 0 & \text{si } (1 + \delta_{i,t}^w)w_{i,t-1}^* < 0, \\ \hat{w}_{i,t} & \text{si } (1 + \delta_{i,t}^w)w_{i,t-1}^* > \hat{w}_{i,t}, \\ (1 + \delta_{i,t}^w)w_{i,t-1}^* & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.29)$$

Etape 5 : Mise en oeuvre Une fois son objectif d'emploi ($w_{i,t}^*$) déterminé, l'entreprise rapproche cet objectif du nombre de travailleurs effectivement employés à cet instant ($w_{i,t+\frac{2}{7}}$). Si la main d'oeuvre est excédentaire (si $w_{i,t}^* < w_{i,t+\frac{2}{7}}$), l'entreprise licencie immédiatement les travailleurs excédentaires. Ce sont alors les derniers travailleurs embauchés par l'entreprise qui sont les premiers licenciés (suivant le principe « Last in first out »). En revanche si l'entreprise manque de main d'oeuvre (si $w_{i,t}^* > w_{i,t+\frac{2}{7}}$) l'entreprise devra embaucher de nouveaux salariés.

Détermination du prix

Immédiatement après avoir déterminé le niveau de la production — mais toujours entre l'instant $(t + \frac{2}{7})$ et l'instant $(t + \frac{3}{7})$ de la période t — chaque entreprise détermine le niveau du prix auquel la production sera offerte sur le marché des biens.

Selon Lavoie (2004, p. 44), « Tous les modèles postkeynésiens reposent sur le principe des prix fondés sur le calcul de coût (*cost-plus pricing*). » C'est délibérément que nous nous écartons ici des modèles postkeynésiens de détermination des prix pour définir une procédure plus conforme à la tradition classique telle que l'énoncent Duménil et Lévy (1987) en se référant à Smith :

« In the classical framework, price adjustments follow the observation of actual disequilibrium between supply and demand (to a degree which varies according to circumstances, as mentioned by Smith in the above quotation) on markets which do not clear. » (Duménil et Lévy 1987, p. 137)

Ainsi, comme pour la détermination du niveau de production, les entreprises fonderont leurs décisions relatives à la détermination du niveau des prix sur l'observation du niveau des stocks d'inventaire³⁸.

On définit une procédure basée sur le principe de l'ajustement, le prix de la période ($P_{i,t}$) étant déterminé par une variation à la hausse ou à la baisse ($\delta_{i,t}^P$) du prix de la période précédente ($P_{i,t-1}$).

Etape 1 : Observation Comme pour la procédure de détermination du niveau de production, le département des prix de l'entreprise considère l'écart entre le niveau des stocks d'inventaire (le volume de produits finis) effectivement constaté à cet instant ($in_{i,t+\frac{2}{7}}^f$) et le niveau normal des stocks d'inventaires ($in_{i,t}^*$).

Etape 2 : Proposition Si un déséquilibre est constaté, un ajustement du prix ($\tilde{\delta}_{i,t}^P$) est proposé. Un niveau des stocks inférieur au niveau normal est interprété comme un excès de la demande sur l'offre et conduit le département des prix à proposer une augmentation du prix. Inversement un niveau des stocks supérieur au niveau normal est interprété comme un excès de l'offre sur la demande et conduit le département des prix à proposer une baisse du prix. L'ampleur de l'ajustement proposé est aléatoirement déterminé dans l'intervalle $[0, \nu_F^P]$.

$$\tilde{\delta}_{i,t}^P = \begin{cases} \alpha \nu_F^P & \text{si } in_{i,t+\frac{2}{7}}^f - in_{i,t}^* < 0, \\ -\alpha \nu_F^P & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.30)$$

La variable α est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

38. Nous reviendrons sur cette hypothèse dans le chapitre 11 (page 286).

Etape 3 : Décision Le département des prix soumet sa proposition d'ajustement à la direction de l'entreprise, qui l'accepte ou la rejette.

$$\delta_{i,t}^P = \begin{cases} \tilde{\delta}_{i,t}^P & \text{si } \alpha\beta < \left| \frac{in_{i,t+\frac{2}{7}}^{fi} - in_{i,t}^*}{in_{i,t}^*} \right|, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.31)$$

La variable β est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

On voit que la direction de l'entreprise manifeste la même prudence que dans le processus d'ajustement de la production.

Etape 4 : Ajustement du prix L'entreprise ajuste alors le prix.

$$P_{i,t} = (1 + \delta_{i,t}^P)P_{i,t-1} \quad (4.32)$$

Le nouveau prix est celui auquel les marchandises seront proposées sur le marché des biens lors de la phase d'écoulement de la production.

Détermination du salaire d'embauche

Chaque entreprise détermine ensuite le salaire d'embauche qu'elle proposera avec ses offres d'emplois. On définit une procédure basée sur le principe de l'ajustement, le salaire d'embauche de la période ($W_{i,t}$) étant déterminé par une variation à la hausse ou à la baisse ($\delta_{i,t}^W$) du salaire d'embauche de la période précédente ($W_{i,t-1}$). L'ajustement du salaire d'embauche est éventuellement limité par le salaire minimum légal (\bar{W}_F).

Etape 1 : Observation Le département des ressources humaines commence par calculer le taux d'emploi vacants effectivement constatés au cours des 4 derniers mois ($\rho_{i,t}$). Puis il considère l'écart de ce taux avec le taux normal d'emplois vacants (ρ_F^*).

Etape 2 : Proposition Si un déséquilibre est constaté, un ajustement du salaire d'embauche ($\tilde{\delta}_{i,t}^W$) est proposé. Un taux d'emplois vacants inférieur au niveau normal est interprété comme un excès de la demande d'emplois sur l'offre d'emplois et conduit le département à proposer une baisse du salaire d'embauche. Inversement un taux d'emplois vacants supérieur au niveau normal est interprété comme un excès de l'offre d'emplois sur la demande et conduit le département à proposer une augmentation du salaire d'embauche. L'ampleur de l'ajustement est aléatoirement

déterminé dans un intervalle défini différemment selon l'orientation de l'ajustement (la flexibilité à la hausse diffère de la flexibilité à la baisse).

$$\tilde{\delta}_{i,t}^W = \begin{cases} -\alpha \nu_F^{Wdown} & \text{si } \rho_{i,t} - \rho_F^* < 0, \\ \alpha \nu_F^{Wup} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.33)$$

La variable α est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

Etape 3 : Décision Le département des ressources humaines soumet sa proposition d'ajustement à la direction de l'entreprise, qui l'accepte ou la rejette.

$$\delta_{i,t}^W = \begin{cases} \tilde{\delta}_{i,t}^W & \text{si } \alpha\beta < \left| \frac{\rho_{i,t} - \rho_F^*}{\rho_F^*} \right|, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.34)$$

La variable β est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

On voit que la direction de l'entreprise manifeste la même prudence que lors des processus d'ajustement de la production et du prix, ayant toujours tendance à repousser les ajustements jugés excessifs ou peu justifiés.

Etape 4 : Ajustement du salaire L'entreprise ajuste alors le salaire d'embauche, en respectant la limite imposée par le salaire minimum (\bar{W}_F).

$$W_{i,t} = \begin{cases} (1 + \delta_{i,t}^W)W_{i,t-1} & \text{si } (1 + \delta_{i,t}^W)W_{i,t-1} > \bar{W}_F, \\ \bar{W}_F & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.35)$$

Le nouveau salaire est celui qui sera proposé sur le marché du travail lors de la phase de recrutement des nouveaux employés.

Financement de la production

Les entreprises doivent ensuite s'assurer du financement du niveau de production décidé. Cette étape assure la transition entre l'état $(t + \frac{2}{7})$ et l'état $(t + \frac{3}{7})$ du modèle.

Une fois le salaire d'embauche déterminé, l'entreprise peut estimer la masse des salaires ($WB_{i,t}^*$) qu'elle devra payer si toutes ses offres d'emplois sont satisfaites. Elle compare alors cette estimation à la trésorerie dont elle dispose à cet instant ($M_{i,t+\frac{2}{7}}$) pour calculer son besoin de financement externe ($NL_{i,t}^*$). Si sa trésorerie est supérieure

à la masse des salaires anticipée alors l'entreprise n'a pas besoin de financement externe. En revanche, si sa trésorerie est inférieure à la masse des salaires anticipée alors l'entreprise doit rechercher auprès de la banque les sommes nécessaires.

$$NL_{i,t}^* = \begin{cases} 0 & \text{si } M_{i,t+\frac{2}{7}} \geq WB_{i,t}^*, \\ WB_{i,t}^* - M_{i,t+\frac{2}{7}} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.36)$$

Nous avons vu³⁹ que la banque se montre alors parfaitement accommodante : elle accorde à l'entreprise un nouveau prêt d'un montant ($NL_{i,t}$) égal au besoin de financement exprimé.

$$NL_{i,t} = NL_{i,t}^* \quad (4.37)$$

$$L_{i,t+\frac{3}{7}} = L_{i,t+\frac{2}{7}} + NL_{i,t} \quad (4.38)$$

La trésorerie de l'entreprise est abondée par le nouveau prêt.

$$M_{i,t+\frac{3}{7}} = M_{i,t+\frac{2}{7}} + NL_{i,t} \quad (4.39)$$

Parce que l'actif et le passif du bilan de l'entreprise sont simultanément affectés, le capital de l'entreprise reste inchangé.

$$\begin{aligned} K_{i,t+\frac{3}{7}} &= IN_{i,t+\frac{3}{7}} + M_{i,t+\frac{3}{7}} - L_{i,t+\frac{3}{7}} \\ &= IN_{i,t+\frac{2}{7}} + (M_{i,t+\frac{2}{7}} + NL_{i,t}) - (L_{i,t+\frac{2}{7}} + NL_{i,t}) \\ &= IN_{i,t+\frac{2}{7}} + M_{i,t+\frac{2}{7}} - L_{i,t+\frac{2}{7}} \\ &= K_{i,t+\frac{2}{7}} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Recrutement de la main d'oeuvre

L'entreprise dispose à présent de la trésorerie nécessaire pour payer la main d'oeuvre qu'elle a décidé d'employer ($w_{i,t}^*$). Si le nombre de travailleurs effectivement employés à cet instant est inférieur à la main d'oeuvre décidée, l'entreprise procède à l'embauche de nouveaux salariés. Pour cela, elle poste sur le marché du travail une offre d'embauche précisant le nombre d'emplois offerts (égal à $w_{i,t}^* - w_{i,t+\frac{2}{7}}$) et le salaire offert ($W_{i,t}$). L'entreprise embauche les ménages qui répondent à son offre, dans l'ordre où ils se présentent. Si le nombre de candidats qui se présentent est inférieur au nombre de postes offerts, certains postes resteront vacants⁴⁰.

39. Voir la description du comportement de la banque lors du financement de la production, page 107.

40. Voir la description du fonctionnement du marché du travail, page 99.

Chaque embauche fait l'objet d'un contrat de travail particulier, liant le travailleur à l'entreprise. La durée du contrat est aléatoirement déterminée dans l'intervalle d_F^w . Le salaire est égal au salaire d'embauche ($W_{i,t}$) et n'est pas modifié pour toute la durée du contrat. Il peut être rompu sans préavis par l'entreprise lorsqu'elle décide de réduire le niveau de sa production.

Mise en oeuvre de la production

Une fois la main d'oeuvre recrutée, l'entreprise peut passer à l'étape de la mise en oeuvre de la production. Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{3}{7})$ et l'instant $(t + \frac{4}{7})$ de la période t .

Cette étape commence par le paiement des salaires aux travailleurs embauchés par l'entreprise⁴¹. Pour cela, l'entreprise passe en revue la liste de ses employés et verse à chacun un chèque correspondant au montant inscrit sur le contrat de travail correspondant. La somme de ces chèques forme le montant total des salaires de la période ($WB_{i,t}$).

$$M_{i,t+\frac{4}{7}} = M_{i,t+\frac{3}{7}} - WB_{i,t} \quad (4.41)$$

Comme l'entreprise a calculé son besoin de financement externe pour couvrir exactement le coût de la main d'oeuvre de la période, sa trésorerie après le paiement de la main d'oeuvre ($M_{i,t+\frac{4}{7}}$) doit normalement être égale à zéro. Cependant, il est possible que l'entreprise n'atteigne pas ses objectifs de recrutement et que des postes offerts et financés restent vacants. Dans ce cas, la part de la trésorerie de l'entreprise destinée au paiement des salaires correspondants restera inutilisée.

La contrepartie du paiement des salaires est la consommation par l'entreprise de la force de travail des salariés pour la mise en oeuvre du processus de production. L'entreprise transmet la liste de ses salariés à son usine, l'usine emploie ces salariés sur les machines et le processus de production des marchandises est mis en oeuvre⁴².

Parce que la production prend du temps, le produit n'est pas immédiatement disponible — c'est un bien non fini. Ce n'est qu'à l'achèvement d'un processus s'étalant sur plusieurs périodes que le produit sort de l'usine sous la forme d'un volume de biens finis⁴³. La dépense des salaires ($WB_{i,t}$) vient donc d'abord augmenter la valeur

41. L'entreprise doit payer les travailleurs avant de les employer sur ses machines, car les ménages refusent de travailler s'ils n'ont pas reçu de salaire pour la période. Voir la note 53, page 133.

42. Voir la description des objets réels associés à ce processus (page 89).

43. Toutefois, comme plusieurs processus de production avec des états d'avancement différents sont généralement en cours dans la même usine, l'acte de produire et la disponibilité du produit apparaissent en temps normal concomitants. Ce n'est que lorsque le niveau de production varie que la durée du cycle de production se manifeste par le retard de la variation du volume de la production de biens finis.

des stocks de biens non finis ($IN_{i,t}^{un}$).

Si un ou plusieurs processus de production atteignent leur terme, il y a production d'une certaine quantité de biens finis, c'est à dire de marchandises. Le volume de marchandises produites ($y_{i,t}$) dépend de la productivité des machines utilisées tandis que la valeur des marchandises produites ($Y_{i,t}$) est égale à la somme des salaires dépensés dans l'avancement des processus de production associés. Les biens finis produits au cours de la période viennent rejoindre dans les stocks d'inventaire de l'entreprise les marchandises produites au cours des périodes précédentes mais encore invendues.

$$in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} = in_{i,t+\frac{3}{7}}^{fi} + y_{i,t} \quad (4.42)$$

$$IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} = IN_{i,t+\frac{3}{7}}^{fi} + Y_{i,t} \quad (4.43)$$

La valeur du stock de biens non finis ($IN_{i,t}^{un}$) subit deux mouvements contradictoires. Elle est augmentée de la dépense des salaires de la période ($WB_{i,t}$) et réduite de la valeur des marchandises produites ($Y_{i,t}$).

$$IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{un} = IN_{i,t+\frac{3}{7}}^{un} + WB_{i,t} - Y_{i,t} \quad (4.44)$$

La valeur des marchandises produites ($Y_{i,t}$) n'affecte pas la valeur totale des stocks de l'entreprise ($IN_{t+\frac{4}{7}}$), elle est simplement transférée du stock de produits non finis au stock de produits finis.

$$\begin{aligned} IN_{t+\frac{4}{7}} &= IN_{t+\frac{4}{7}}^{fi} + IN_{t+\frac{4}{7}}^{un} \\ &= (IN_{i,t+\frac{3}{7}}^{fi} + Y_{i,t}) + (IN_{i,t+\frac{3}{7}}^{un} + WB_{i,t} - Y_{i,t}) \\ &= IN_{i,t+\frac{3}{7}}^{fi} + IN_{i,t+\frac{3}{7}}^{un} + WB_{i,t} \\ &= IN_{t+\frac{3}{7}} + WB_{i,t} \end{aligned} \quad (4.45)$$

L'augmentation de la valeur totale des stocks au cours de l'étape de production est donc égale à la dépense des salaires ($WB_{i,t}$).

La dépense des salaires dans le processus de production fait subir au capital de l'entreprise deux mouvements contradictoires qui viennent se compenser exactement.

$$\begin{aligned} K_{i,t+\frac{4}{7}} &= IN_{i,t+\frac{4}{7}} + M_{i,t+\frac{4}{7}} - L_{i,t+\frac{4}{7}} \\ &= (IN_{i,t+\frac{3}{7}} + WB_{i,t}) + (M_{i,t+\frac{3}{7}} - WB_{i,t}) - L_{i,t+\frac{3}{7}} \\ &= IN_{i,t+\frac{3}{7}} + M_{i,t+\frac{3}{7}} - L_{i,t+\frac{3}{7}} \\ &= K_{i,t+\frac{3}{7}} \end{aligned} \quad (4.46)$$

Lors de la phase de production, le capital de l'entreprise reste donc constant, mais l'on observe une modification de sa composition, avec la conversion du capital détenu sous forme monétaire en capital détenu sous forme de biens (finis ou non finis) pour un montant égal à la masse des salaires.

Écoulement de la production

Lorsque l'étape de la mise en oeuvre de la production est terminée, l'entreprise entreprend d'écouler ses stocks de marchandises sur le marché des biens. Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{4}{7})$ et l'instant $(t + \frac{5}{7})$ de la période t .

On admet que l'entreprise cherche à vendre le maximum de marchandises en respectant deux contraintes :

- L'entreprise utilise ses stocks d'inventaires pour amortir les variations de la production et de la demande : elle ne met jamais en vente plus qu'une fraction (μ_F^{in}) du volume de marchandises disponibles ($in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}$).
- Les capacités de commercialisation d'une entreprise sont limitées, égales à un multiple (λ_F) de ses capacités de production ($\hat{p}r_{i,t}$).

Le volume de marchandises que l'entreprise propose à la vente ($sa_{i,t}^*$) est défini par cet ensemble de contraintes.

$$sa_{i,t}^* = \begin{cases} \mu_F^{in} in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} & \text{si } \mu_F^{in} in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} < \lambda_F \hat{p}r_{i,t}, \\ \lambda_F \hat{p}r_{i,t} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.47)$$

L'entreprise poste son offre sur le marché des biens⁴⁴. Cette offre est définie par le volume de marchandise offert ($sa_{i,t}^*$) et le prix unitaire auquel ce volume de marchandises est offert ($P_{i,t}$). En réponse à cette offre, des clients se présentent et expriment leur demande pour une certaine quantité de la marchandise offerte par l'entreprise. L'entreprise satisfait toutes ces demandes dans la limite du volume offert ($sa_{i,t}^*$) et dépose les chèques reçus en paiement.

Le volume effectif des ventes ($sa_{i,t}$) — qui peut être inférieur au volume offert $sa_{i,t}^*$ — détermine le nouvel état des stocks d'inventaire ($in_{i,t+\frac{5}{7}}^{fi}$).

$$in_{i,t+\frac{5}{7}}^{fi} = in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} - sa_{i,t} \quad (4.48)$$

La valeur des stocks de marchandises ($in_{i,t+\frac{5}{7}}^{fi}$) est diminuée en proportion de la diminution du volume des stocks de marchandises.

$$IN_{i,t+\frac{5}{7}}^{fi} = IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} - \frac{sa_{i,t}}{in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}} IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} \quad (4.49)$$

44. Voir la description du fonctionnement du marché des biens, page 98.

Le produit des ventes ($sa_{i,t}P_{i,t}$) détermine le nouvel état de la trésorerie de l'entreprise ($M_{i,t+\frac{5}{7}}$).

$$M_{i,t+\frac{5}{7}} = M_{i,t+\frac{4}{7}} + sa_{i,t}P_{i,t} \quad (4.50)$$

Le capital de l'entreprise subit donc deux mouvements contradictoires et simultanés : l'un négatif du fait de la diminution de la valeur des stocks de marchandises, l'autre positif du fait de l'encaissement du produit de la vente.

$$\begin{aligned} K_{i,t+\frac{5}{7}} &= IN_{i,t+\frac{5}{7}} + M_{i,t+\frac{5}{7}} - L_{i,t+\frac{5}{7}} \\ &= (IN_{i,t+\frac{5}{7}}^{fi} + IN_{i,t+\frac{5}{7}}^{un}) + M_{i,t+\frac{5}{7}} - L_{i,t+\frac{5}{7}} \\ &= IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} - \frac{sa_{i,t}}{in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}} IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} + IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{un} + M_{i,t+\frac{4}{7}} + sa_{i,t}P_{i,t} - L_{i,t+\frac{4}{7}} \\ &= (IN_{i,t+\frac{4}{7}} + M_{i,t+\frac{4}{7}} - L_{i,t+\frac{4}{7}}) - \frac{sa_{i,t}}{in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}} IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} + sa_{i,t}P_{i,t} \\ &= K_{i,t+\frac{4}{7}} - \frac{sa_{i,t}}{in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}} IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} + sa_{i,t}P_{i,t} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Alors que la phase de production se traduisait par une conversion de capital-monnaie en capital-marchandise, la phase d'écoulement de la production se traduit par une conversion inverse de capital-marchandise en capital monnaie. Toutefois, parce que la valeur des stocks écoulés et le produit monétaire de la vente n'ont pas de raison d'être égaux, le capital de l'entreprise subit une variation entre l'instant ($t + \frac{4}{7}$) et l'instant ($t + \frac{5}{7}$). Cette variation constitue le profit total (ou la perte) de l'entreprise pour la période ($F_{i,t}^T$).

$$\begin{aligned} F_{i,t}^T &= K_{i,t+\frac{5}{7}} - K_{i,t+\frac{4}{7}} \\ &= -\frac{sa_{i,t}}{in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}} IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi} + sa_{i,t}P_{i,t} \\ &= sa_{i,t} \left(P_{i,t} - \frac{IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}}{in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}} \right) \end{aligned} \quad (4.52)$$

Pour que l'entreprise réalise des profits, il faut que le prix unitaire ($P_{i,t}$) soit supérieur au coût unitaire des marchandises vendues ($UC_{i,t+\frac{4}{7}}$).

$$UC_{i,t+\frac{4}{7}} = \frac{IN_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}}{in_{i,t+\frac{4}{7}}^{fi}} \quad (4.53)$$

Autrement dit, il faut que la marge ($\varphi_{i,t}$) du prix ($P_{i,t}$) sur le coût unitaire ($UC_{i,t+\frac{4}{7}}$) soit positive.

$$\varphi_{i,t} = \frac{P_{i,t} - UC_{i,t+\frac{4}{7}}}{UC_{i,t+\frac{4}{7}}} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned} F_{i,t}^T &= sa_{i,t}(P_{i,t} - UC_{i,t+\frac{4}{7}}) \\ &= sa_{i,t}\varphi_{i,t}UC_{i,t+\frac{4}{7}} \end{aligned} \quad (4.55)$$

Paiement de l'intérêt

Une fois clôt le marché des biens, l'entreprise doit payer les intérêts dus à la banque. Cette étape se situe entre l'instant ($t + \frac{5}{7}$) et l'instant ($t + \frac{6}{7}$) de la période t . Ce paiement s'effectue à l'initiative de la banque qui prélève directement le montant de l'intérêt ($INT_{i,t}$) sur le compte courant de l'entreprise⁴⁵. L'entreprise ne dispose d'aucune autonomie au cours de cette étape.

$$M_{i,t+\frac{6}{7}} = M_{i,t+\frac{5}{7}} - INT_{i,t} \quad (4.56)$$

Nous avons vu que lorsqu'un agent débiteur n'est pas en mesure de payer les sommes dues au titre des intérêts, la banque est toujours accommodante. En pareil cas, la dette de l'entreprise est simplement augmentée du montant des intérêts impayés ($INT_{i,t}^{NP}$).

$$L_{i,t+\frac{6}{7}} = L_{i,t+\frac{5}{7}} + INT_{i,t}^{NP} \quad (4.57)$$

Que l'intérêt dû soit normalement prélevé sur le compte de l'entreprise ou que son paiement effectif soit reporté, la somme correspondante est immédiatement déduite du capital de l'entreprise.

$$\begin{aligned} K_{i,t+\frac{6}{7}} &= IN_{i,t+\frac{6}{7}} + M_{i,t+\frac{6}{7}} - L_{i,t+\frac{6}{7}} \\ &= IN_{i,t+\frac{5}{7}} + (M_{i,t+\frac{5}{7}} - INT_{i,t}) - (L_{i,t+\frac{5}{7}} + INT_{i,t}^{NP}) \\ &= (IN_{i,t+\frac{5}{7}} + M_{i,t+\frac{5}{7}} - L_{i,t+\frac{5}{7}}) - (INT_{i,t} + INT_{i,t}^{NP}) \\ &= K_{i,t+\frac{5}{7}} - (INT_{i,t} + INT_{i,t}^{NP}) \end{aligned} \quad (4.58)$$

45. Voir la description du recouvrement de l'intérêt par la banque, page 109.

Remboursement des crédits et faillites

L'entreprise doit ensuite rembourser les crédits parvenus à échéance ($RL_{i,t}$). Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{6}{7})$ et l'instant $(t + \frac{7}{7})$ de la période t .

Là encore, l'entreprise ne dispose d'aucune autonomie et c'est la banque qui prélève directement le montant dû sur le compte courant de l'entreprise.

$$M_{i,t+\frac{7}{7}} = M_{i,t+\frac{6}{7}} - RL_{i,t} \quad (4.59)$$

L'encours total de la dette de l'entreprise est réduit d'autant.

$$L_{i,t+\frac{7}{7}} = L_{i,t+\frac{6}{7}} - RL_{i,t} \quad (4.60)$$

La réduction égale et simultanée de la dette et des dépôts de l'entreprise laisse son capital inchangé.

$$\begin{aligned} K_{i,t+\frac{7}{7}} &= IN_{i,t+\frac{7}{7}} + M_{i,t+\frac{7}{7}} - L_{i,t+\frac{7}{7}} \\ &= IN_{i,t+\frac{6}{7}} + (M_{i,t+\frac{6}{7}} - RL_{i,t}) - (L_{i,t+\frac{6}{7}} - RL_{i,t}) \\ &= IN_{i,t+\frac{6}{7}} + M_{i,t+\frac{6}{7}} - L_{i,t+\frac{6}{7}} \\ &= K_{i,t+\frac{6}{7}} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Il peut arriver que l'entreprise ne dispose pas de la trésorerie suffisante pour faire face à ses obligations. On a vu aussi que lorsqu'un agent débiteur n'est pas en mesure de rembourser un crédit ordinaire, la banque se montrait encore accommodante, lui accordant un nouveau délai pour rembourser la créance. Toutefois, la qualité de la créance est alors dégradée, avec pour conséquence que l'entreprise ne peut plus distribuer de dividendes tant que cette créance n'aura pas été intégralement remboursée⁴⁶. Enfin, si une entreprise se trouve incapable de rembourser à l'échéance une créance notée *doubtfulDebt*, la banque considère que l'entreprise est en situation de faillite. L'entreprise disparaît alors, et avec elle sa dette, son stock de capital productif, ses stocks de marchandises et de produits non finis.

La possibilité d'une disparition d'entreprises pose la question des créations d'entreprises. En effet, dans le modèle simplifié qui est le nôtre, il n'existe pas de mécanisme endogène de création d'entreprises à l'initiative des agents. Les disparitions d'entreprises consécutives aux défauts de paiement ne peuvent donc que conduire à

46. En effet, on a vu que la banque cherche à obtenir le remboursement d'une créance notée *doubtfulDebt* à chaque fin de période, sans attendre l'échéance. Par conséquent tous les profits éventuels réalisés par l'entreprise sont consacrés d'abord au remboursement des créances, et tant qu'elles ne sont pas intégralement remboursées, il ne peut rester aucune somme disponible sur le compte courant de l'entreprise en début de période, au moment de distribuer des dividendes.

une réduction progressive du nombre d'entreprises au fur et à mesure de l'avancement des simulations. C'est pourquoi, chaque fois qu'une entreprise disparaît, une nouvelle entreprise similaire (même nombre de machines, même productivité moyenne) est créée 12 mois plus tard. Ainsi nous nous assurons que le nombre d'entreprises présentes dans le modèle est constant sur le moyen et le long terme.

4.4.4 Les ménages

Un ménage est représenté par un objet de type `Household`. Chaque ménage est doté d'un objet de type `LabourPower` représentant sa force de travail⁴⁷.

A chaque période, les ménages sans travail recherchent un emploi sur le marché du travail. Les ménages employés perçoivent un salaire et dépensent leur force de travail sur les machines de l'entreprise qui les emploie. Les ménages dépensent ensuite une fraction de leurs encaisses monétaires dans l'achat de biens de consommation. Au cours de la période, les ménages doivent mettre en oeuvre des processus de décision pour répondre à deux questions importantes :

- Quel salaire minimum pour accepter un emploi ?
- Quelle part des encaisses monétaires dépenser dans l'achat de biens de consommation et quelle part conserver comme épargne ?

Comme celui des entreprises, le comportement des ménages est modélisé par l'enchaînement de procédures d'ajustement simples. L'état d'un ménage particulier est défini par un ensemble de variables qui lui sont propres (table 4.7, page 130). Chaque ménage compare la valeur de certaines de ses variables d'état à des valeurs normales, exogènes et communes à l'ensemble des ménages du secteur (table 4.8, page 130). En fonction de l'écart constaté entre ses variables d'état et les valeurs normales, il ajuste à la hausse ou à la baisse les variables contrôlant son comportement (table 4.9, page 130).

Paiement des dividendes

Certains ménages sont tirés au hasard, au début de la simulation, pour représenter les propriétaires de chacune des entreprises et de la banque. Ils resteront propriétaires de leur entreprise pour toute la durée d'existence de cette entreprise, et dans le cas de la banque, pour toute la durée de la simulation.

Un ménage propriétaire d'une entreprise ou de la banque se distingue d'un autre ménage seulement dans la mesure où il reçoit, en début de période, un dividende

47. Voir la description de l'objet `LabourPower`, page 91.

$D_{j,t}$	le montant du dividende reçu.
$W_{j,t}$	le montant du salaire reçu.
$Y_{j,t}^a$	le revenu annuel, somme des revenus (salaires et dividendes) reçus au cours des 12 derniers mois.
$S_{j,t}$	le montant de l'épargne.
$M_{j,t}$	le montant disponible sur le compte courant.
$d_{j,t}^u$	le nombre de périodes consécutives sans emploi.

TABLE 4.7 – Variables d'état du ménage j

d_H^r	la durée normale de résistance à une baisse du salaire de réservation.
s_H	la propension à épargner.
$\nu_H^{W^*}$	la flexibilité mensuelle maximale du salaire de réservation.
μ_H^S	la propension à dépenser l'épargne excédentaire.

TABLE 4.8 – Valeurs normales (exogènes) du secteur des ménages

$W_{j,t}^*$	le salaire de réservation.
$S_{j,t}^*$	l'objectif d'épargne.
$C_{j,t}^*$	l'objectif de consommation.

TABLE 4.9 – Variables de contrôle du ménage j

versé par l'entreprise ou par la banque. Cette étape se situe entre l'instant $(t + \frac{0}{7})$ et l'instant $(t + \frac{2}{7})$ dans le diagramme de séquence 4.1, page 85.

Ce dividende ($D_{j,t}$) entre dans la formation du revenu du ménage. Il prend la forme d'un chèque que le ménage dépose immédiatement sur son compte.

$$M_{j,t+\frac{2}{7}} = M_{j,t+\frac{0}{7}} + D_{j,t} \quad (4.62)$$

Salaire de réservation et recherche d'un emploi

Les ménages déterminent leur salaire de réservation ($W_{j,t}^*$), c'est à dire le salaire en dessous duquel ils préfèrent rester au chômage. La durée d'inactivité du ménage ($d_{j,t}^u$) joue un rôle central dans la procédure d'ajustement du salaire de réservation ⁴⁸.

Etape 1 : Observation Le ménage commence par considérer sa situation. Si le ménage est employé, son salaire de réservation est défini comme le dernier salaire perçu.

$$W_{j,t}^* = W_{j,t-1} \quad (4.63)$$

Un ménage employé ne recherche pas de travail, et pour lui la procédure est terminée.

En revanche, si le ménage est sans emploi, il calcule sa durée d'inactivité ($d_{j,t}^u$), c'est-à-dire le nombre de périodes écoulées depuis son dernier emploi.

Etape 2 : Décision Le ménage sans emploi décide alors de maintenir ou d'ajuster à la baisse son salaire de réservation. La décision d'ajustement dépend de la durée d'inactivité ($d_{j,t}^u$) et de la résistance des ménages (d_H^r). L'ampleur de l'ajustement est aléatoirement déterminée dans l'intervalle $[0, \nu_H^{W^*}]$.

$$\delta_{j,t}^{W^*} = \begin{cases} \beta \nu_H^{W^*} & \text{si } \alpha < \frac{d_{j,t}^u}{d_H^r}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.64)$$

Les variables α et β sont des variables aléatoires déterminées à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

On voit que la probabilité d'un ajustement à la baisse du salaire de réservation augmente avec la durée d'inactivité.

48. Dans la version actuelle du modèle, les ménages sans emploi ne touchent aucune indemnité. Si on introduit de telles indemnités dans une version ultérieure du modèle, alors il faudra modifier la procédure d'ajustement du salaire de réservation qui devra tenir compte du niveau de ces indemnités. On devrait aussi compléter ce comportement en permettant au ménage de prendre en compte le niveau de ses encaisses (épargne de précaution).

Etape 3 : Ajustement du salaire de réservation Si le ménage en a pris la décision, il ajuste à la baisse⁴⁹ son salaire de réservation ($W_{j,t}^*$).

$$W_{j,t}^* = (1 - \delta_{j,t}^{W^*})W_{j,t-1}^* \quad (4.65)$$

La variable α est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

Etape 4 : Recherche d'emploi Chaque ménage sans emploi est inscrit sur le marché du travail⁵⁰. Un ménage sans emploi consulte un nombre limité d'offres d'emplois, aléatoirement sélectionnées dans la liste des offres postées par les employeurs. Il choisit dans cette sélection l'offre dont le salaire est le plus élevé. Si l'offre est supérieure ou égale à son salaire de réservation, il accepte l'emploi et est immédiatement embauché⁵¹. Sinon il reste au chômage pour la période.

L'embauche d'un ménage par une entreprise fait l'objet d'un contrat de travail qui précise le montant du salaire et la durée du contrat. Le salaire est égal au salaire proposé par l'entreprise avec l'offre d'emploi acceptée par le ménage. La durée du contrat est aléatoirement déterminée par l'entreprise au moment de l'embauche. Le salaire reste constant pour toute la durée du contrat de travail. Un ménage ne quitte jamais de lui-même son employeur⁵². En revanche, il peut être licencié sans préavis par son employeur dès que celui-ci décide de réduire le niveau de la production.

Dépense de la force de travail

Les ménages employés reçoivent le salaire ($W_{j,t}$) prévu par leur contrat de travail. Chaque ménage reçoit un chèque qu'il dépose immédiatement sur son compte courant.

$$M_{j,t+\frac{4}{7}} = M_{j,t+\frac{3}{7}} + W_{j,t} \quad (4.66)$$

49. Un ménage sans emploi n'ajuste jamais à la hausse son salaire de réservation.

50. Voir la description du marché du travail (page 99).

51. En effet l'entreprise accepte tous les demandeurs d'emplois qui se présentent, dans la limite des postes offerts. Voir la description de la procédure d'embauche des entreprises, page 122.

52. Dans la version actuelle du modèle, la modélisation du comportement des ménages au sein de l'entreprise est très simplifiée, les employés étant parfaitement loyaux. On envisage d'enrichir ce modèle par exemple en intégrant des comportements de type « voice » et « exit » inspirés des travaux de Hirschman (1970).

En échange du salaire⁵³, le ménage fournit sa force de travail à l'entreprise, qui la dépense dans l'avancement du processus de production⁵⁴.

Épargne et consommation

Le ménage détermine ensuite son objectif de dépense ($C_{j,t}^*$). On suppose que le ménage cherche à maintenir un niveau « normal » de consommation : le ménage constitue une épargne liquide dans laquelle il pourra puiser pour pouvoir continuer à consommer malgré une baisse inattendue de revenu⁵⁵.

Étape 1 : Observation Le ménage commence par calculer son objectif d'épargne ($S_{j,t}^*$), proportionnel au revenu des 12 derniers mois ($Y_{j,t}^a$).

$$S_{j,t}^* = s_H Y_{j,t}^a \quad (4.67)$$

Puis le ménage calcule son épargne effective ($S_{j,t+\frac{4}{7}}$), montant des encaisses monétaires ($M_{j,t+\frac{4}{7}}$) moins le revenu mensuel moyen calculé sur les 12 derniers mois.

$$S_{j,t+\frac{4}{7}} = M_{j,t+\frac{4}{7}} - \frac{Y_{j,t}^a}{12} \quad (4.68)$$

Étape 2 : Décision Le ménage compare son épargne effective ($S_{j,t+\frac{4}{7}}$) à son objectif ($S_{j,t}^*$). Si l'épargne est inférieure à l'objectif, il décide de dépenser seulement

53. Si on essaye de faire travailler un ménage alors que celui-ci n'a pas reçu de salaire au cours de la période, une erreur est générée et la simulation est interrompue. Cela n'est censé jamais arriver, car les entreprises veillent à payer tous les salaires avant de mettre leurs employés au travail. Mais l'encapsulation de ce contrôle au sein des objets représentant les ménages permet de s'assurer qu'aucun travail gratuit n'est possible dans l'économie modélisée, indépendamment de l'implémentation du comportement des entreprises.

54. Voir la section consacrée aux objets de la sphère réelle (page 89).

55. Cette épargne est conservée sous forme d'un dépôt monétaire sur le compte courant du ménage auprès de la banque. Elle n'est pas rémunérée. Il est vrai que si le ménage considéré est propriétaire d'une entreprise ou de la banque, alors son épargne totale comprend non seulement l'épargne liquide déposée, mais aussi le capital de l'entreprise possédée ou de la banque. Néanmoins, dans la version actuelle du modèle, pour des raisons de simplicité, le ménage ne prend pas en compte le capital détenu dans son comportement d'épargne, et ne considère que son épargne liquide. Par conséquent, bien que le comportement d'épargne des ménages soit défini de la même façon pour un ménage au chômage, un ménage salarié ou un ménage rentier, le taux d'épargne effectif des ménages rentiers sera en moyenne très supérieur à celui des autres ménages.

une fraction du revenu mensuel moyen. Sinon, il décide de dépenser la totalité du revenu mensuel moyen, plus une fraction (μ_H^S) de l'épargne excédentaire.

$$C_{j,t}^* = \begin{cases} (1 - s_H) \frac{Y_{j,t}^a}{12} & \text{si } S_{j,t+\frac{4}{7}} - S_{j,t}^* < 0 \\ \frac{Y_{j,t}^a}{12} + \mu_H^S (S_{j,t+\frac{4}{7}} - S_{j,t}^*) & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.69)$$

Etape 3 : Mise en oeuvre Le ménage se porte ensuite sur le marché des biens où il tente de réaliser son objectif de dépense auprès d'un nombre limité de fournisseurs ⁵⁶. Deux facteurs peuvent venir contrarier cet objectif et limiter la dépense effective du ménage ($C_{j,t}$).

D'une part, les encaisses monétaires du ménage peuvent être inférieures à son objectif de consommation ($M_{j,t+\frac{4}{7}} < C_{j,t}^*$). Comme dans le modèle simplifié qui est le nôtre les ménages n'ont pas accès au crédit, la dépense ne peut être supérieure aux sommes effectivement disponibles sur le compte bancaire du ménage.

D'autre part, des situations de pénurie peuvent parfois apparaître sur le marché des biens, certains ménages ne parvenant pas alors à dépenser la totalité de leur budget.

Le ménage règle ses achats par chèques tirés sur son compte bancaire. La marchandise achetée est immédiatement consommée (elle disparaît). L'épargne effective du ménage est égale aux sommes restant sur le compte après la dépense.

$$M_{j,t+\frac{5}{7}} = M_{j,t+\frac{4}{7}} - C_{j,t} \quad (4.70)$$

$$S_{j,t+\frac{5}{7}} = M_{j,t+\frac{5}{7}} \quad (4.71)$$

4.5 Conclusion

Selon une démarche ascendante et constructive, nous venons de mettre en place, les uns à côté des autres, tous les éléments logiciels dont nous avons besoin pour notre projet. Nous avons commencé par construire les objets les plus simples, représentations des objets réels et monétaires du monde réel. Puis nous avons construit des marchés, non comme des agents particuliers chargés d'assurer l'équilibre du système, mais comme des institutions passives, de simples lieux de rencontre et d'échanges directs et décentralisés entre les agents. Enfin nous avons développés les trois types d'agents qui vont peupler le système. Nous les avons conçus comme des automates

56. Voir la section consacrée au marché des biens (page 98).

doués d'une certaine autonomie, grâce aux procédures d'ajustement dont nous les avons dotés.

Tous ces objets et agents logiciels ne sont, on l'a vu, que des modèles d'objets et agents du monde réel. Mais tant que ces objets et ces agents restent juxtaposés, tant qu'ils n'entrent pas en interaction, ils ne forment pas un modèle macroéconomique, mais seulement une collection de modèles microéconomiques.

S'il est vrai qu'un langage de programmation est un langage théorique naturel pour la description des systèmes complexes, alors chacun des objets que nous avons construits sont des *propositions* écrites dans ce langage. Ces propositions sont-elles compatibles entre elles ? Comment peuvent-elles s'articuler dans un ensemble cohérent ?

L'objet du chapitre suivant est de répondre à cette question.

Chapitre 5

Cohérence macroéconomique

The structure of an economic model that is relevant to a capitalist economy needs to include the interrelated balance sheets and income statements of the units of the economy.

Minsky (1996)

A présent que tous les objets, marchés et agents ont été décrits, nous devons examiner la façon dont tous ces éléments sont agencés dans la structure macroéconomique du modèle.

Après avoir présenté le *circuit*, objet supérieur organisant les interactions entre les agents (section 5.1), nous montrons comment l'approche comptable matricielle développée par Godley et Lavoie peut être utilisée pour vérifier la cohérence macroéconomique du modèle (section 5.2).

Nous reprenons alors, selon un ordre chronologique, chacune de ces interactions pour vérifier pas à pas qu'elles s'inscrivent toutes dans un ensemble comptable cohérent (section 5.3). Enfin, nous nous interrogeons sur les conséquences de cette cohérence macroéconomique sur la complexité du système modélisé (section 5.4).

5.1 Le circuit

5.1.1 La structure hiérarchique du circuit

L'objet `Circuit` est le plus élevé dans la hiérarchie des objets du modèle. Il représente l'économie modélisée. Il est composé :

- d'une liste d'objets de type `Firm` qui représente le secteur des entreprises,
- d'une liste d'objets de type `Household` qui représente le secteur des ménages,
- d'un objet de type `Bank` qui représente le secteur bancaire,
- d'un objet de type `LabourMarket` et d'un objet de type `GoodsMarket` qui représentent le marché du travail et le marché des biens.

5.1.2 La structure séquentielle du circuit

L'objet `Circuit` est doté d'une méthode principale, une boucle itérative qui constitue une structure temporelle rigide qui s'impose aux agents et organise leurs interactions au sein d'une période de base du modèle.

Sa structure reproduit la structure séquentielle du circuit post-keynésien classique — dont on a vu qu'il est généralement décrit comme une succession d'opérations à la façon d'un algorithme ou d'un programme informatique¹. Comme dans le circuit post-keynésien, l'initiative est donnée à tour de rôle aux agents des différents secteurs pour l'accomplissement d'une tâche donnée. La succession des opérations au sein de la période se traduit par un enchaînement de flux réels et monétaires entre les secteurs.

5.1.3 Le problème du parallélisme

Le problème est que, dans un modèle multi-agents, les agents d'un même secteur sont supposés agir *en parallèle*. A un instant t , chaque agent examine le niveau de ses variables d'état, décide de ses actions, et agit en conséquence sur son environnement. L'environnement est modifié par l'ensemble des actions simultanées des agents et rétroagit sur l'état de chaque agent à l'instant $t + 1$. Le problème est qu'un ordinateur classique fonctionne de façon séquentielle et non parallèle². Par conséquent, le parallélisme des actions des agents ne peut être que simulé : pour chaque action à effectuer par une classe d'agents, le modèle consulte la liste de ces agents, appelle

1. Voir Bougrine et Seccareccia (2003), cités page 64.

2. Il n'en est pas de même dans les supercalculateurs massivement parallèles, mais nous n'y avons pas accès.

chacun de ces agents dans l'ordre de la liste, et leur demande d'exécuter l'action programmée (par exemple pour les entreprises : s'endetter, embaucher, produire, offrir sur le marché des biens...).

Lorsqu'il n'y a pas d'interaction entre les processus, cela ne pose aucun problème : par exemple au moment de la production, l'entreprise va appeler ses employés les uns après les autres et de façon séquentielle les employer à l'avancement de différents processus de production, à la fin de la période de production le résultat sera le même que si tous les processus avaient réellement été avancés simultanément (*pseudo-parallélisme*).

Cependant, dès qu'il y a interaction entre les processus ou entre les agents sensés agir en parallèle, ce n'est plus pareil. L'ordre dans lequel on effectue les tâches est susceptible de jouer un rôle important et d'influer sur les dynamiques. C'est particulièrement le cas sur les marchés. Ainsi, les acheteurs se présentent séquentiellement sur le marché des biens pour consulter les offres des vendeurs. Les acheteurs qui se présentent les premiers sont avantagés : ils pourront choisir les meilleures offres. Si ce sont toujours les mêmes qui se présentent les premiers, cela est susceptible d'introduire un biais important dans la dynamique du marché.

La première des solutions à ce problème est la solution walrasienne, avec un commissaire-priseur chargé de confronter les offres et les demandes multiples et de les réconcilier avant toute transaction. Une fois trouvé le prix unique qui assure l'apurement du marché, peu importe alors l'ordre dans lequel seront effectuées les transactions.

L'autre solution est d'accepter une certaine imperfection du marché mais de s'assurer, en brassant les listes d'agents selon une procédure stochastique à chaque étape, qu'il n'y aura pas d'agent systématiquement privilégié ou désavantagé. C'est cette solution, beaucoup plus simple mais aussi plus réaliste, que nous mettons en oeuvre.

5.1.4 Représenter le circuit

Le diagramme de séquence de la figure 4.1 (page 85) permet de situer au sein de cette période les phases d'activité des différents groupes d'agents. Les rectangles situés le long des « lignes de vie » des secteurs des ménages et des entreprises représentent des blocs de contrainte budgétaire, la somme des flux sortant d'un bloc étant égale à la somme de flux entrant. Toutefois, parce qu'il est centré sur les flux monétaires, ce diagramme est insuffisant pour donner une description complète de la façon dont l'activité des agents des différents secteurs s'insère de façon cohérente dans le déroulement de la période du circuit.

Le diagramme d'interactions de la figure 4.2 (page 90) permet de visualiser l'exis-

tence de flux réels (marchandises et forces de travail), mais l'aspect séquentiel du déroulement de la période est gommé. Pas plus que le diagramme de séquence des flux monétaires, il ne fait apparaître les stocks de dettes qui sont la contrepartie des grandeurs réelles et monétaires qui circulent entre les agents.

Pour donner une représentation plus rigoureuse (plus complète et plus précise) des états (niveaux des stocks) et des transitions (flux réels et monétaires) du modèle, il faut passer des représentations graphiques à une représentation comptable matricielle.

5.2 Cohérence des stocks et des flux

Il est possible de considérer le circuit lui-même comme un automate, comme une « machine à état » dotée d'un comportement définissant les transitions d'un état à un autre. A tout instant l'état du circuit peut être caractérisé par le niveau des stocks de monnaie, de dettes et de marchandises détenus par les agents qui le composent. Une représentation de cet état peut être donnée en faisant la somme des stocks des agents de chacun des secteurs. Pareillement, une représentation des transitions d'un état à un autre peut être donnée en sommant, au niveau de chacun des secteurs, les flux réels et monétaires qui accompagnent les interactions entre les agents. Par là, nous rejoignons l'approche comptable « stocks-flux cohérente » développée par Godley et Lavoie (2007).

« The evolution of the entire system may be characterized (at the level of accounting) by saying that at the beginning of each period, the configuration of stock variables (i.e. all physical stocks together with interlocking system of financial assets and liabilities) is a summary description of (relevant) past history. Then the transactions [...] heave the stock variables from their state at the beginning of each period to their state at the end, to which capital gains will have to be added. » (Godley et Lavoie 2007, p. 8)

5.2.1 La matrice des bilans sectoriels

La matrice des bilans sectoriels (table 5.1) dresse un tableau synthétique de l'état de l'économie simulée au début de la période t . Cette matrice est très proche de la matrice des bilans sectoriels du modèle *DIS* de Godley et Lavoie (2007, p. 285). Elle obéit aux principes généraux des matrices de stock des modèles « stock-flux cohérents ». Trois colonnes représentent chacune le bilan d'un des secteurs qui composent

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		$+IN_t$		$+IN_t$
Dépôts	$+M_{H,t}$	$+M_{F,t}$	$-(M_{H,t} + M_{F,t})$	0
Crédits		$-L_t$	$+L_t$	0
Capital	$+(K_{F,t} + K_{B,t})$	$-K_{F,t}$	$-K_{B,t}$	0
Balance	$-V_{H,t}$			$-V_{H,t}$
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.1 – Matrice des bilans sectoriels à l’ouverture de la période $t + \frac{0}{7}$

l’économie modélisée. Les éléments de l’actif sont affectés d’un signe positif, tandis que les éléments du passif sont affectés d’un signe négatif. Enfin, la somme de chaque ligne et de chaque colonne doit être égale à zéro, cette égalité exprimant le fait que chaque stock doit avoir sa contrepartie ailleurs dans l’économie.

« However, it will be a cardinal principle [...] that all rows and all columns sum to zero, thus ensuring, in a catch-phrase, that “everything comes from somewhere and everything goes somewhere”. » (Godley et Lavoie 2007, p. 6)

Toutefois, on observe que la ligne des stocks d’inventaires présente une somme strictement positive. Nous suivons en cela Godley et Lavoie (2007), pour qui le stock de capital tangible est un actif du secteur des entreprises qui présente la particularité de ne pas être inscrit au passif d’un autre secteur.

« Tangible capital appears in the assets of production firms, but they are not counterbalanced by liabilities of another sector. Tangible capital is only an asset; it is not simultaneously an asset and a liability, as in the case of financial capital. » (Godley et Lavoie 2007, p. 218)

Verticalement, on constate aussi que la somme du bilan des ménages est strictement positive. Toujours à la suite de Godley et Lavoie (2007), on complète la matrice d’une dernière ligne destinée à équilibrer le compte des ménages.

« As usual, also, we add a balancing item, net worth, which ensures that all columns sum to zero [...] Only the households sector has a positive net worth, its wealth V_h , and by the laws of accounting, that net wealth

must be exactly equal to the existing amount of tangible capital [...] »
 (Godley et Lavoie 2007, p. 219)

L'égalité comptable de la richesse nette détenue par les ménages ($V_{H,t}$) et de la valeur des stocks détenus par les entreprises (IN_t) est facile à vérifier :

$$\begin{aligned}
 V_{H,t} &= M_{H,t} + K_{F,t} + K_{B,t} \\
 &= M_{H,t} + (IN_t + M_{F,t} - L_t) + (L_t - (M_{H,t} + M_{F,t})) \\
 &= IN_t
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

5.2.2 La matrice des flux de transactions

L'état de l'économie au début de la période étant donné par la matrice des bilans sectoriels, chaque étape du circuit économique doit s'inscrire dans une matrice de flux de transactions, définissant la transition vers l'état suivant. Pour Godley et Lavoie (2007), cette matrice de transactions est essentielle à la description d'une économie dans laquelle les stocks et les flux sont cohérents.

« It has already been claimed that the transactions flow matrix serves an important purpose in guaranteeing the coherence of the accounting when macroeconomic models are built [...] The transactions flow matrix sets the monetary circuit [...] within a comprehensive accounting framework [...] the transaction flow matrix [...] is the backbone of the monetary production economy [...] » (Godley et Lavoie 2007, p. 47)

La logique de cohérence des flux conduit à affirmer le principe de la *quadruple écriture*, déjà sous-jacent à la matrice des stocks :

« Copeland (1949) pointed out that, “because moneyflows transactions involve two transactors, the social accounting approach to moneyflows rests not a double-entry system but on a quadruple-entry system”. Knowing that each of the columns and each of the rows must sum to zero at all times, it follows that any alteration in one cell of the matrix must imply a modification to at least three other cells. The transactions matrix used here provides us with an exhibit which allows to report each financial both as an inflow to a given sector and as an outflow to the other sector involved in the transaction. » (Godley et Lavoie 2007, p. 47)

Toutefois, nous ne suivons pas Godley et Lavoie (2007) dans le formalisme des matrices de transactions qu'ils développent. Nous nous contentons de décrire les flux de transactions comme des variations de stocks qui s'inscrivent dans des matrices

dont la structure est la même que celle des bilans sectoriels³. Chaque matrice de flux de transactions obéit aux mêmes principes généraux que la matrice des bilans sectoriels et sa structure est la même — on omet simplement les lignes qui ne jouent aucun rôle.

Selon nous, chaque matrice de transactions ainsi définie est suffisante pour vérifier la cohérence des stocks et des flux : appliquée à la matrice des bilans sectoriels à l’instant précédent la transaction, elle permet de déduire l’état de ces bilans à l’instant qui suit la transaction, tout en respectant le principe de quadruple écriture. Par conséquent, elle suffit à s’assurer que les variations des stocks correspondent à des flux véritables, c’est-à-dire des flux qui viennent bien de quelque part pour aller quelque part.

« Central to the methodology I am putting forward is the notion that the accounting should be comprehensive in the sense that there are no “black holes” — every flow comes from somewhere and goes somewhere. »
(Godley 1996, p. 7)

5.3 Dérroulement d’une période

5.3.1 Dividendes des entreprises

Le versement des dividendes dus par les entreprises à leurs propriétaires constitue la première étape du circuit⁴, définissant la transition de l’état $(t + \frac{0}{7})$ à l’état $(t + \frac{1}{7})$.

Au niveau macroéconomique, le versement des dividendes par les entreprises est un simple transfert monétaire d’un montant $D_{F,t}$ du compte des entreprises vers le

3. Pour Godley et Lavoie (2007, p. 8), les gains ou les pertes en capital ne sont pas des transactions et ne devraient donc pas apparaître dans la matrice des flux de transaction.

4. Dans les modèles classiques du circuit, fondés sur une période abstraite et refermée sur elle-même, la première étape du circuit est celle du financement de la production, tandis que l’étape du versement des dividendes — lorsqu’elle est mentionnée — se situe vers la fin de la période, lorsque la monnaie a reflué des ménages vers les entreprises. Dans un modèle dynamique comme le nôtre, se situant dans un temps historique plutôt que dans un temps logique, les périodes s’enchaînent les unes aux autres de façon irréversible. Par conséquent, les profits constatés à la fin de la période t , formés par la dépense des revenus de la période t , ne peuvent être dépensés lors de cette même période. Il est logique d’attendre le début de la période $t+1$ pour les faire entrer dans la composition du revenu des ménages.

« Distributed dividends are a fraction ψ_D of entrepreneurial profits earned in the previous period [...] It is assumed that firms will distribute dividends only once they have verified accounts of their activities [...] the dividends distributed in period t arise from the activity of period $t-1$. » (Godley et Lavoie 2007, p. 390)

compte des ménages (table 5.2). Le montant total des dépôts des agents non bancaires reste donc constant et le bilan de la banque n'est pas affecté. Au bilan des entreprises, ce paiement se traduit par une réduction équivalente du capital ⁵.

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des dépôts	$+D_{F,t}$	$-D_{F,t}$		0
Δ du capital	$-D_{F,t}$	$+D_{F,t}$		0
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.2 – Paiement des dividendes par les entreprises

Au bilan des ménages, la baisse du capital détenu vient compenser exactement l'augmentation des dépôts, la richesse nette du secteur des ménages n'est donc pas modifiée.

5.3.2 Dividendes de la banque

Une fois les dividendes des entreprises versés intervient la seconde étape du circuit avec le versement des dividendes par la banque à ses propriétaires, définissant la transition de l'état $(t + \frac{1}{7})$ à l'état $(t + \frac{2}{7})$.

A la différence du versement du dividende par les entreprises, le versement des dividendes par la banque ($D_{B,t}$) n'est pas un transfert mais une création monétaire (table 5.3). Comme pour le versement du dividende des entreprises, le secteur des ménages voit le montant total de ses dépôts augmenter du montant du dividende versé, mais cela se fait sans que le montant des dépôts d'un autre secteur ne soit réduit. Par conséquent, le montant total des dépôts des agents non bancaires augmente du montant des dividendes versés, tandis que le capital de la banque est réduit du même montant.

Même s'il y a création monétaire à l'occasion du paiement des dividendes, il ne s'agit pas d'une forme de seigneurage. Parce que le capital de la banque ne saurait être négatif — le secteur bancaire ne peut devoir plus au secteur non bancaire que ce que le secteur non bancaire lui doit — la banque subit lors de la distribution des

5. Bien qu'affectée du signe +, la variation de capital au bilan des entreprises est bien une baisse. En effet, comme le capital est un élément du passif des entreprises, il est affecté dans la matrice des stocks (table 5.1) d'un signe négatif.

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des dépôts	$+D_{B,t}$		$-D_{B,t}$	0
Δ du capital	$-D_{B,t}$		$+D_{B,t}$	0
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.3 – Paiement des dividendes par la banque

dividendes une contrainte budgétaire tout aussi forte que celle imposée au secteur des entreprises.

Au bilan des ménages, la baisse du capital détenu vient compenser exactement l'augmentation des dépôts, exactement comme pour les dividendes des entreprises. Là encore, la richesse nette du secteur des ménages reste inchangée.

5.3.3 Financement de la production

La troisième étape du circuit est celle du financement de la production, définissant la transition de l'état $(t + \frac{2}{7})$ à l'état $(t + \frac{3}{7})$.

Les entreprises s'endettent pour financer — au moins partiellement⁶ — la production. On appelle NL_t la somme des montants des nouveaux crédits à la production accordés par la banque aux entreprises au cours de la période t . Les opérations de crédit de la banque en faveur des entreprises se traduisent par une augmentation NL_t des dépôts monétaires des entreprises avec pour contrepartie une augmentation simultanée et égale de la dette des entreprises vis-à-vis de la banque (table 5.4).

« Le prêt, qui est une créance pour la banque, doit apparaître ailleurs comme la dette de l'emprunteur, afin que la somme des composantes de

6. Dans le modèle de Lavoie (2003), la totalité de la masse salariale est financée à crédit.

« [...] au début de la période de production, les entreprises doivent emprunter les montants qui leur sont nécessaires pour payer leurs employés. Ainsi, le montant emprunté pour la période courante est égal au montant des salaires de la période courante. » (Lavoie 2003, p. 151)

Il en est de même chez Graziani (2003b).

« The initial requirement of bank credit can therefore be measured both by the amount of the wage bill and by the value of inventories in possession of the firms. » (Graziani 2003b, p. 28)

la ligne des prêts reste elle aussi égale à zéro. Il en va de même pour la ligne des dépôts. On a bien quatre écritures au minimum. » (Lavoie 2004, p. 174)

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des crédits		$-NL_t$	$+NL_t$	0
Δ des dépôts		$+NL_t$	$-NL_t$	0
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.4 – Crédit bancaire

Cette opération est donc une création monétaire puisqu'il y a, au passif de la banque, augmentation de la masse des dépôts des agents non bancaires. A la différence de la distribution des dividendes par la banque, la distribution de crédits bancaires n'est pas limitée par le capital de la banque, les nouveaux crédits venant compenser exactement à l'actif l'augmentation des dépôts enregistrée au passif⁷.

« [...] a key feature of the banking system is its ability to create deposits *ex nihilo*. More precisely, when agents in the economy are willing to increase their liabilities, banks can increase the size of both sides of their balance sheet, by granting loans and simultaneously creating deposits. » (Godley et Lavoie 2007, p. 48-49)

C'est la principale voie d'entrée de la monnaie dans le circuit.

« La monnaie est en premier lieu le résultat d'une relation d'endettement entre les entreprises productives et les banques ; elle est introduite dans le système économique par la production et le paiement des salaires. » (Rochon et Vernengo 2003, p. 177)

7. Selon Graziani (2003b), ce pouvoir illimité de création monétaire n'existe que si l'on considère une banque unique représentative de l'ensemble du système bancaire.

« An imaginary bank, serving the whole of the market, needs no reserves: exactly as the banking system in its entirety, its credit potential would be unlimited and it would be able to grant any amount of loans at its own discretion. » (Graziani 2003b, p. 90-91)

5.3.4 Mise en oeuvre de la production

La quatrième étape du circuit est celle de la production elle-même, définissant la transition de l'état $(t + \frac{3}{7})$ à l'état $(t + \frac{4}{7})$.

Il peut arriver qu'une entreprise dispose d'une trésorerie excédentaire, supérieure à la masse des salaires effective de la période. C'est la possibilité de l'existence de ce résidu de trésorerie qui est représenté sur le diagramme de séquence de la figure 4.1 (page 85) par la flèche verticale reliant les deux blocs de contrainte budgétaire des entreprises entre l'instant $(t + \frac{3}{7})$ et l'instant $(t + \frac{4}{7})$. Cependant ce flux n'est que résiduel et en temps normal le secteur des entreprises consacre l'essentiel de sa trésorerie au paiement des salaires, sans chercher à conserver de dépôt monétaire.

« [...] les entreprises sont débitées d'un prêt consenti par les banques, tout en étant simultanément créditées d'un dépôt bancaire. Mais cette situation, sauf circonstances exceptionnelles ne peut durer qu'un temps très court. En général, les entreprises ne tirent sur leur ligne de crédit que lorsqu'elles doivent procéder à des paiements. » (Lavoie 2003, p. 151)

On appelle WB_t la somme des salaires versés par les entreprises à leurs salariés au cours de la période t . Le versement des salaires apparaît comme un simple transfert monétaire du secteur des entreprises vers le secteur des ménages.

Pour les entreprises cependant, l'étape de la production ne se réduit pas au paiement des salaires. Les salaires sont payés par les entreprises pour l'achat de la force de travail des ménages, force de travail dont la dépense est nécessaire à la mise en oeuvre de la production. Les forces de travail ne peuvent être stockées : elles doivent être consommées dans la période courante. Aussi les entreprises consomment immédiatement les forces de travail de leurs employés dans l'avancement de processus de production. Cette dépense de forces de travail se traduit par une augmentation des stocks d'inventaires (biens finis et non finis). Parce que les nouveaux stocks d'inventaires sont évalués à leur coût de production, leur valeur vient compenser exactement la perte de capital induite par le paiement des salaires aux ménages. Au niveau macroéconomique, la phase de production se traduit donc par une création de richesse nette égale au montant des salaires — ou, ce qui revient au même, à l'augmentation de la valeur des stocks d'inventaires (table 5.5).

5.3.5 Ecoulement de la production

La cinquième étape du circuit est celle de l'écoulement de la production sur le marché des biens, définissant la transition de l'état $(t + \frac{4}{7})$ à l'état $(t + \frac{5}{7})$. Elle marque aussi une inversion des flux monétaires dans le circuit. Alors que depuis l'ouverture

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des stocks		$+WB_t$		$+WB_t$
Δ des dépôts	$+WB_t$	$-WB_t$		0
Δ balance	$-WB_t$			$-WB_t$
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.5 – Production

du circuit, les flux monétaires étaient dirigés de la banque vers les entreprises et des entreprises vers les ménages, on entre à présent dans une seconde phase, celle du reflux de la monnaie des ménages vers les entreprises et des entreprises vers la banque (table 5.6).

Au niveau macroéconomique, la vente du produit des entreprises aux ménages apparaît d’abord comme un transfert monétaire (S_t) des ménages vers les entreprises. Cependant, la vente du produit n’est pas seulement un transfert monétaire des ménages vers les entreprises, mais aussi un transfert de marchandises des entreprises vers les ménages. La valeur des marchandises achetées n’apparaît pas à l’actif du bilan des ménages, parce que les biens achetés sont immédiatement consommés. En revanche, le stock de marchandises est un élément du bilan du secteur des entreprises, dont la valeur est affectée par la vente d’une partie du produit. La vente d’une partie du produit apparaît au bilan du secteur des entreprises comme une diminution de la valeur des stocks d’inventaire, pour un montant égal à la somme des coûts de production des marchandises vendues (HWC_t).

Cette dernière grandeur mérite qu’on s’arrête pour l’examiner. On a vu que les stocks d’inventaires sont évalués à leur coût de production — c’est-à-dire, dans le modèle d’économie simplifié qui est le nôtre, que leur valeur est égale au montant total des salaires dépensés dans leur production. Cependant, parce que la production prend du temps (et la commercialisation aussi, ainsi qu’en témoigne l’existence de stocks de produits finis) la valeur des marchandises vendues intègre seulement pour une faible part les salaires de la période — lesquels contribueront surtout à l’accroissement de la valeur du stock de produits non finis. La valeur des marchandises vendues au cours de la période (HWC_t) est formée pour l’essentiel de salaires versés au cours de périodes antérieures. C’est pourquoi Godley et Lavoie (2007) appellent « *historic wage costs* » la somme des coûts de production des marchandises vendues.

« The historic wage cost is the wage cost encountered when producing that have been sold in this period. » (Godley et Lavoie 2007, p. 258)

Comme il n'y a aucune raison que le produit de la vente (S_t) soit égal à la somme des coûts de production (HWC_t) de la marchandise vendue, l'écoulement de la production implique une variation — positive ou négative — du capital du secteur des entreprises ($F_{T,t}$). Cette variation représente les profits ou les pertes totales du secteur.

$$F_{T,t} = S_t - HWC_t \quad (5.2)$$

On constate enfin que la richesse nette des ménages subit au cours de cette phase une réduction égale au coût de production des marchandises vendues et consommées (HWC_t).

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des stocks		$-HWC_t$		$-HWC_t$
Δ des dépôts	$-S_t$	$+S_t$		0
Δ du capital	$+F_{T,t}$	$-F_{T,t}$		0
Δ balance	$+HWC_t$			$+HWC_t$
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.6 – Ecoulement de la production

5.3.6 Paiement de l'intérêt

La sixième étape du circuit est celle du paiement de l'intérêt sur les crédits, définissant la transition de l'état ($t + \frac{5}{7}$) à l'état ($t + \frac{6}{7}$).

Au premier abord, ce paiement apparaît comme un transfert monétaire (INT_t^P) du secteur des entreprises vers le secteur de la banque. Cependant, nous avons vu⁸ que la banque unique ne peut détenir de monnaie, puisque dans ce modèle, toute la monnaie qui circule est une dette de la banque vis-à-vis d'un agent non bancaire. Par conséquent le reflux de la monnaie vers la banque est toujours une destruction monétaire, y compris lors du paiement de l'intérêt. Mais parce que cette destruction

8. Voir la discussion sur la nature du capital de la banque, page 105.

monétaire vient augmenter d'un montant égal le capital de la banque, le paiement de l'intérêt apparaît comme un transfert de valeur du secteur des entreprises vers le secteur bancaire.

Il peut arriver que des entreprises ne disposent pas de la trésorerie nécessaire au moment où la banque réclame le paiement de l'intérêt. Les intérêts non payés (INT_t^{NP}) viennent alors accroître la dette des entreprises (table 5.7). On constate

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des crédits		$-INT_t^{NP}$	$+INT_t^{NP}$	0
Δ des dépôts		$-INT_t^P$	$+INT_t^P$	0
Δ du capital		$+INT_t$	$-INT_t$	0
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.7 – Paiement de l'intérêt

que les intérêts dus à chaque période par le secteur des entreprises (INT_t), qu'ils prennent la forme d'une réduction des dépôts monétaires des entreprises ou celle d'une augmentation de la dette des entreprises, se traduisent par un transfert de capital du compte des entreprises vers le compte de la banque.

$$INT_t = INT_t^P + INT_t^{NP} \quad (5.3)$$

Les intérêts dus par les entreprises sont la seule source qui puisse venir augmenter le capital de la banque. La somme de ces intérêts (INT_t) constitue le profit de la banque pour la période. Le capital de la banque est donc formé de l'accumulation des profits des périodes antérieures jusqu'à la période présente et le versement de dividendes par la banque n'est que la distribution plus ou moins différée de ces profits⁹.

Du côté des entreprises, les intérêts viennent réduire le capital du secteur : le profit du secteur bancaire est donc prélevé sur le profit total réalisé par les entreprises ($F_{T,t}$).

9. Dans le modèle *DIS* de Godley et Lavoie (2007, p. 284), le profit des banques est intégralement distribué au secteur des ménages. On voit en fin de compte qu'il en est de même dans notre modèle. Toutefois, chez Godley et Lavoie la distribution est immédiate, parce que tout arrêt du profit sur le compte de capital du secteur bancaire empêcherait la clôture du circuit. Si nous pouvons laisser ce profit transiter un certain temps sur le compte de capital de la banque, c'est parce que l'unité de temps de notre modèle (la période) est inférieure au terme du crédit. L'existence d'un capital bancaire strictement positif apparaît dès lors comme une simple résistance à la circulation de la monnaie, et non plus comme une fuite hors du circuit monétaire.

Godley et Lavoie (2007) nomment « entrepreneurial profits » les profits réalisés par le secteur des entreprises ($F_{F,t}$), nets des intérêts dus au secteur bancaire¹⁰.

$$F_{F,t} = F_{T,t} - INT_t = S_t - HWC_t - INT_t \quad (5.4)$$

5.3.7 Remboursement des crédits

La septième et dernière étape du circuit est celle du remboursement des crédits échus, définissant la transition de l'état ($t + \frac{6}{7}$) à l'état ($t + \frac{7}{7}$).

L'encours total de la dette du secteur des entreprises est diminué du montant des crédits remboursés (RL_t), et le montant total des dépôts des entreprises est diminué du même montant (table 5.8). La monnaie, créée par le crédit bancaire, est détruite

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des crédits		$+RL_t$	$-RL_t$	0
Δ des dépôts		$-RL_t$	$+RL_t$	0
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.8 – Remboursement des crédits

par son remboursement. Le capital total du secteur des entreprises comme celui de la banque restent inchangés.

5.3.8 Faillites

Pour que la description de la dernière étape du circuit soit complète, il nous reste à prendre en compte l'éventualité de faillites d'entreprises.

On a vu qu'il peut arriver que certaines entreprises soient incapables de rembourser un crédit à l'échéance¹¹. La banque peut alors refuser de leur accorder de nouveaux délais de paiement. Les entreprises insolvables sont alors placées en faillite et disparaissent (table 5.9). Les conséquences des faillites d'entreprises se manifestent sur les deux niveaux du modèle :

10. En fait, c'est bien sur le capital des entreprises, c'est-à-dire sur les profits accumulés jusqu'à la période courante, que l'intérêt est prélevé. Ainsi, si le secteur des entreprises réalise au cours de la période un profit total insuffisant pour payer les intérêts dus ($F_{T,t} < INT_t$), alors le secteur des entreprises subit une perte en capital ($F_{F,t} < 0$).

11. Voir la description du processus de remboursement des crédits par les entreprises, page 128.

- au niveau monétaire, les dettes des entreprises faillies sont annulées ;
- au niveau réel, les stocks d’inventaires — produits finis et produits non finis — de ces entreprises sont détruits.

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des stocks		$-B_t$		$-B_t$
Δ des crédits		$+NPL_t$	$-NPL_t$	0
Δ du capital	$-B_t$	$+B_t - NPL_t$	$+NPL_t$	0
Δ balance	$+B_t$			$+B_t$
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.9 – Faillites

Au bilan de la banque, les faillites des entreprises se traduisent par une destruction de capital égale à la somme des dettes annulées (NPL_t). Le passif du bilan agrégé du secteur des entreprises est réduit du montant des dettes annulées tandis que l’actif est réduit du montant des stocks de biens finis et non finis détruits par la disparition des entreprises (B_t). L’effet des faillites sur le capital agrégé du secteur des entreprises est donc incertain. Le secteur des ménages voit sa richesse nette réduite de la valeur des stocks détruits, mais c’est le ménage propriétaire de la banque qui subit l’essentiel de cette perte.

5.3.9 Clôture de la période

On agrège ligne à ligne toutes les matrices de transactions de la période pour construire la matrice agrégée des transactions de la période (table 5.10 page 152). Cette matrice définit la transition de l’état du circuit au début de la période t à l’état du circuit au début de la période $t + 1$.

5.4 Cohérence macroéconomique et complexité

Les états comptables de chacun des agents peuvent être agrégés simplement et sans erreur, par simple addition, pour donner l’état consolidé de chacun des secteurs,

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Δ des stocks		$+WB_t - HWC_t - B_t$		$+WB_t - HWC_t - B_t$
Δ des crédits		$-NL_t - INT_t^{NP} + RL_t + NPL_t$	$+NL_t + INT_t^{NP} - RL_t - NPL_t$	0
Δ des dépôts	$+D_{F,t} + D_{B,t} + WB_t - S_t$	$-D_{F,t} + NL_t - WB_t + S_t - INT_t^P - RL_t$	$-D_{B,t} - NL_t + INT_t^P + RL_t$	0
Δ du capital	$-D_{F,t} - D_{B,t} - B_t + F_{T,t}$	$+D_{F,t} - F_{T,t} + INT_t + B_t - NPL_t$	$+D_{B,t} - INT_t + NPL_t$	0
Δ Balance	$-WB_t - F_{T,t} + B_t + S_t$			$-WB_t - F_{T,t} + B_t + S_t$
Σ	0	0	0	0

TABLE 5.10 – Matrice des transactions de la période

lesquels, réunis dans la matrice des bilans sectoriels, donnent une description synthétique de l'état de l'économie à un instant donné. On a vu qu'une représentation de la transition entre chaque état de l'économie peut être pareillement obtenue par l'addition des flux générés par les interactions entre les agents individuels qui peuplent le modèle. Mais alors, s'il est possible de construire des représentations des états et des transitions du modèle par simple sommation des états et transitions des agents qui le composent, que reste-t-il de la complexité du système modélisé¹²? Autrement dit encore, quel intérêt y a-t-il à peupler un modèle « stock-flux cohérent » avec des agents multiples?

Le modèle que nous avons développé n'est pas le premier modèle peuplé d'agents multiples à tenter de relever le défi de la cohérence des stocks et des flux. Dans un travail précurseur qui met en évidence les convergences possibles entre l'approche multi-agents et la pensée keynésienne, Bruun (1999) insiste sur la nécessité de la cohérence comptable des modèles d'économie monétaire basés sur les agents.

« The model must be complete in the sense that all accounting rules must be respected. This is necessary in order to avoid possible fallacies of composition. » (Bruun 1999, p. 9)

Plus récemment, Cincotti, Raberto, et Teglio (2010) ont présenté un modèle macroéconomique multi-agents, doté d'un système bancaire complexe, et dont ils affirment le caractère « stock-flux cohérent » — sans toutefois se référer aux travaux de Godley et Lavoie.

« Monetary and real flows, given by agents' behaviors and interactions, e.g. market transactions, determine the period by period balance sheet dynamics. Stock-flow consistency checks have then been done at the aggregate level to verify that all monetary and real flows are accounted for, and that all changes to stock variables are consistent with these flows. This provides us with a solid and economically well-founded methodology to test the consistency of the model. » (Cincotti, Raberto, et Teglio 2010, p. 7)

Cependant, la cohérence des stocks et des flux est bien plus qu'une simple exigence logique et comptable. Cet ensemble de relations arithmétiques qui lient les agents au niveau microéconomique et les secteurs au niveau macroéconomique constitue une structure simple mais rigide dans laquelle doivent nécessairement s'insérer les comportements individuels et agrégés.

12. On sait qu'un système complexe est au contraire un système dont le comportement ne peut être déduit simplement de l'observation du comportement des éléments qui le composent. Voir Simon (1962), cité page 23.

« La matrice des opérations, alliée à la matrice des bilans sectoriels, est le squelette de la modélisation des économies monétaires de production. A ce squelette, et aux équations dynamiques qui lient les stocks et les flux, il faudrait ajouter les équations de comportement des divers agents sectoriels. Chaque modèle proposé met en avant des comportements différents, qui vont assurer la fermeture (*closure*) du modèle et qui vont déterminer ses résultats. Néanmoins, les postkeynésiens comme Godley qui prônent cette méthode pensent que le squelette et les équations dynamiques procurent une structure qui restreint l'ensemble des résultats possibles. Certaines configurations sont impossibles. » (Lavoie 2004, p. 75)

Cette structure comptable est donc un élément déterminant du comportement macroéconomique du modèle, et la moindre erreur dans la comptabilité des stocks et des flux est susceptible d'en affecter la dynamique.

« ... the accounting must be right. All stocks and all flows must have counterparts somewhere in the rest of the economy. The watertight stock flow accounting imposes system constraints that have qualitative implications. This is not just a matter of logical coherence; it also feeds into the intrinsic dynamics of the model. » (Lavoie et Godley 2001, p. 307)

La possibilité de décrire simplement les relations comptables au niveau du système à partir des états individuels et des relations bilatérales entre agents vient, pour le modélisateur, réduire considérablement la complexité du système étudié, puisqu'il peut en découvrir directement certaines propriétés macroéconomiques. Cette réduction de la complexité apparente n'est que la conséquence de l'existence d'une structure interne au modèle qui vient limiter l'autonomie des agents. Bien que nous ayons modélisé les agents comme autonomes et concurrents, bien que nous ayons traqué toute procédure de coordination ou d'information centralisée entre les agents, les actions des agents s'inscrivent nécessairement dans la structure comptable macroéconomique du modèle.

Cependant, Godley et Lavoie admettent que la structure comptable seule est insuffisante à décrire les transitions du modèle, et que le modèle doit être complété d'équations décrivant le comportement des agents. Pour ce faire, les auteurs utilisent la notion d'agent sectoriel, qui est — comme l'est la banque unique dans notre modèle — un agent représentatif de l'ensemble des agents d'un secteur. Si cette démarche permet à Godley et Lavoie d'explorer les dynamiques de leurs modèles en émettant différentes hypothèses sur ces comportements agrégés, elle ne peut pas être satisfaisante de notre point de vue, puisque nous nous intéressons au caractère décentralisé des économies monétaires. Bien qu'étant arithmétiquement exacte, la consolidation comptable au niveau sectoriel est réductionniste, puisqu'elle ne rend

pas compte de l'hétérogénéité des situations comptables des agents composant chaque secteur. Or, le comportement de chaque agent dépend de son propre état, du niveau de ses propres stocks, et non pas des niveaux des stocks consolidés du secteur. En utilisant un agent représentatif pour chacun des secteurs, on assigne à l'ensemble des agents qui le composent des buts sectoriels, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse d'économies décentralisées.

Le mécanisme de détermination des prix dans Godley et Lavoie (2007) donne une illustration du caractère réductionniste de l'utilisation de l'agent représentatif au niveau sectoriel.

« In the more sophisticated [Godley and Lavoie] models, the pricing mechanism is essentially an income distribution mechanism, which distributes income between labour wages, entrepreneurial profits and creditors' interest receipts. Pricing arbitrates the income distribution conflicts between different categories of stake-holders. As pointed out earlier, pricing is based on cost-plus principles, whereby unit costs are assessed and a costing margin is calculated to yield a share of sales or a target profit level. In our ultimate closed-economy model, this target profit level is designed to provide a reasonable dividend yield as well as to provide internal funds to finance capital accumulation. » (Godley et Lavoie 2007, p. 496)

Dans ces modèles, les prix sont déterminés par la procédure du markup, dont le niveau uniforme est déterminé au niveau macroéconomique par une répartition du revenu « idéale » (Godley et Lavoie 2007, p. 390), celle qui permet au secteur des entreprises de réaliser des profits « suffisants » pour payer l'investissement, des dividendes « raisonnables » et l'intérêt. Au contraire dans notre modèle salaires et prix sont *a priori* déterminés indépendamment les uns des autres au niveau d'agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents, ce qui va nous permettre de tester sous différentes hypothèses de comportement les conditions de l'émergence d'un système de valeurs stable au niveau macroéconomique — système de valeurs qui pourra peut-être paraître « raisonnable » *a posteriori*.

L'hétérogénéité des états individuels implique l'hétérogénéité des décisions individuelles, lesquelles ne peuvent dès lors être agrégées simplement dans le comportement d'un agent représentatif¹³. Même dans un cadre « stock-flux cohérent », les économies

13. L'utilisation d'une banque unique comme agent représentatif de l'ensemble du secteur bancaire pourra dès lors nous être reprochée comme une incohérence méthodologique. Toutefois, dans l'approche constructiviste qui caractérise les modèles basés sur les agents, le développement d'un modèle se fait par étapes successives de complexification croissante : il n'est pas possible de tout mener de front. A partir de ce modèle, on peut envisager de très nombreuses extensions, dont, bien sûr, le développement d'un secteur bancaire multi-agents.

monétaires décentralisées restent des systèmes complexes, dont on ne peut déduire simplement le comportement macroscopique à partir de la connaissance des règles individuelles de comportement¹⁴. La structure comptable macroscopique, même si elle contraint le comportement des agents, ne les détermine pas pour autant — du moins pas directement, pas simplement, pas *a priori*. Les agents doivent être modélisés comme autonomes, c'est-à-dire comme agissant — ou réagissant — par rapport à leur situation particulière, et non par rapport à la situation du secteur ou de l'économie toute entière¹⁵.

Les rapports entre niveau microéconomique et niveau macroéconomique restent complexes, et du coup, l'approche multi-agent reste pleinement justifiée.

5.5 Conclusion

À la fin du chapitre précédent, nous avons constitué une collection de modèles d'objets réels et monétaires, de marchés, d'agents, destinés à peupler un modèle macroéconomique d'économie de marché. Dans le présent chapitre, nous avons doté le modèle d'une structure qui organise de façon séquentielle les interactions entre ces composants. Nous nous sommes ensuite efforcé de retracer pas à pas les interactions entre les groupes d'agents — entre les secteurs — au moyen de matrices comptables inspirées de l'approche « stock flux » de Godley et Lavoie. Nous avons eu alors la surprise de constater que notre modèle, bien que construit selon une approche ascendante, s'inscrivait exactement dans ces matrices de stocks et de flux.

Cette surprise n'est pas feinte : même si nous nous étions intéressé aux travaux de Godley et Lavoie avant de commencer la construction du modèle, ces travaux nous étaient parus difficiles d'accès — et à dire vrai un peu trop statiques et d'em-

14. « The starting points are a full and consistent acknowledgment that any aggregate economic system is more than the sum of the microeconomic decisions of rational agents; that microeconomic decentralized interactions are crucial, as they create collective arrangements that can not be directly traced back to the individual primitive parameters of taste and technology of heterogeneous individuals, left alone to that of a representative agent » (Delli Gatti, Gaffeo, et Gallegati 2010, p. 2-3)

15. « Since economic activity is of an essentially interactive nature, economists' micro foundations should allow for the interactions of economic agents. Since interaction depends on differences in information, motives, knowledge and capabilities, this implies heterogeneity of agents [...] It would also be fallacious to only replace the current paradigm by a representative "non-rational" actor (as it is sometimes done in recent literature). Rather, an *appropriate micro foundation* is needed that considers interaction at a certain level of complexity and extracts macro regularities (where they exist) from microeconomic models with dispersed activity. » (Colander, Föllmer, Haas, Goldberg, Juselius, Kirman, Lux, et Sloth 2009, p. 9)

blée « macro » pour être utiles à notre projet. Ce n'est qu'*a posteriori*, une fois le modèle pleinement opérationnel, que les questions posées par les travaux de Godley et Lavoie ont pris du sens et que nous nous sommes efforcé de vérifier la cohérence comptable des flux et des stocks. Ainsi, bien que notre modèle soit composé d'une multitude d'agents hétérogènes, autonomes et concurrents, il s'inscrit dans une structure comptable macroéconomique relativement simple et rigide. Ce résultat, d'autant plus remarquable qu'il est obtenu involontairement, montre que si l'on modélise avec rigueur chacun des agents et chacun des objets qui constituent le modèle macroéconomique, alors le modèle macroéconomique lui-même est rigoureux et cohérent. Pour Godley et Lavoie, les modèles « stocks flux » cohérents conduisent à examiner comment chacune des parties d'une économie est connectée à toutes les autres.

« The main purpose of having a formal model, based on transactions accounts which have no black holes, is that one is forced to consider how each part of an economy is interconnected with every other part. »

(Godley et Lavoie 2007, p. 384)

Plus que jamais, la convergence de la pensée post-keynésienne et de l'approche des systèmes complexes nous paraît à la fois évidente et nécessaire.

Pourtant, ce résultat a fait naître un doute dans notre esprit : valait-il la peine d'avoir décomposé le secteur des entreprises et le secteur des ménages en une multitude d'agents, puis d'avoir modélisé ces agents comme autant d'agents autonomes, capables d'agir en fonction de leurs états individuels et selon leurs propres objectifs, pour retomber au bout du compte sur les mêmes résultats atteints par Godley et Lavoie au moyen d'agents sectoriels agrégés ?

Autrement dit, si les économies de marché s'inscrivent dans des cadres comptables aussi simples et contraignants que ceux décrits par Godley et Lavoie, laissent-elles encore assez d'autonomie aux agents qui les composent pour être considérées comme *complexes* ? Nous avons répondu affirmativement : le cadre des comptabilités nationales ne transforme pas les économies marchandes en économies planifiées ; le comportement des agents est contraint par ce cadre, mais il n'est pas dirigé — du moins pas clairement, pas directement. Le « mystère » de la coordination macroscopique du comportement de la multitude d'agents autonomes et concurrents demeure, même si l'on commence à percevoir plus clairement que l'existence d'une structure monétaire superposée à la structure réelle va jouer un rôle important dans cette coordination.

Chapitre 6

Première exploration

No doubt fame and fortune await
systematic exploration and
exploitation of this new world,
along with probably greater risk to
lose oneself in uncharted
wastelands.

Axtell (2004)

Avec le chapitre précédent, nous avons achevé de décrire la construction du modèle. Avant même de l'exécuter, nous avons pu montrer, au moyen de matrices comptables représentant les stocks et les flux, que les activités réelles et monétaires des agents individuels, bien que complètement décentralisées, s'inscrivaient nécessairement dans une structure macroscopique cohérente. Mais cette démonstration n'a été faite que « sur le papier ». Il faut encore la vérifier sinon « dans les faits », du moins dans l'ordinateur, au moyen de simulations. Nous nous fixons donc deux objectifs principaux à atteindre au moyen de simulations :

- vérifier la validité du modèle au regard des règles de cohérence comptable énoncées au chapitre précédent ;
- explorer les propriétés du modèle et vérifier les hypothèses explicites ou implicites que nous avons émises pendant la phase de construction.

Dans la section 6.1, nous déterminons la méthode d'exploration du modèle qui sera la nôtre. Dans la section 6.2, nous définissons un scénario de base qui sera un point de référence dans cette exploration. Dans la section 6.3, nous analysons les résultats de la simulation de ce scénario.

6.1 Une méthode d'exploration

6.1.1 Analyse individuelle

Il est techniquement possible, dans un modèle multi-agents, de suivre individuellement l'histoire de chacun des agents qui composent le modèle. Bien sûr, les agents sont trop nombreux pour pouvoir tous être suivis individuellement ; cette analyse n'apporte donc pas grand chose à la compréhension des dynamiques macroscopiques du modèle qui sont l'objet de notre étude. Nous ne l'utiliserons donc pas pour l'exploration du modèle.

Néanmoins, il fallait mentionner cette analyse, d'une part parce qu'elle est spécifique aux modèles multi-agents, d'autre part parce qu'elle nous a été très utile au cours de la construction du modèle, en particulier dans les phases de débogage. En effet, il est possible de tracer pas à pas chaque décision d'un agent, de comprendre ces décisions en fonction de son état et de son environnement, de vérifier que ce comportement est conforme aux spécifications du modèle de comportement choisi ¹.

6.1.2 Analyse matricielle

L'analyse matricielle est proche de l'analyse individuelle, dans la mesure où comme elle, elle permet de suivre pas à pas l'état de composants du modèle. Seulement, il ne s'agit plus de suivre l'état d'agents individuels, mais l'état d'agrégats d'agents, au niveau mésoéconomique. Cette analyse est similaire à l'analyse, dans le monde réel, des comptes de la comptabilité nationale.

L'exploration du modèle commencera donc naturellement par l'analyse, période après période, des matrices de stocks définies dans le chapitre précédent. Cette analyse permettra de vérifier la cohérence macroéconomique du modèle. Elle permettra aussi d'étudier, pas à pas, les interactions entre les groupes d'agents et les mécanismes de formation des grandeurs réelles et monétaires agrégées.

Néanmoins, cette analyse matricielle sera vite insuffisante : parce que ces matrices constituent une succession de photographies de l'état des stocks à intervalles réguliers, elles ne permettent pas de saisir les relations dynamiques unissant les variables macroéconomiques. Elles devront donc être complétées par des analyses d'un autre type.

1. Nous pensons que l'analyse individuelle jouera un rôle important lorsque la construction de modèles macroéconomiques multi-agents *de prévision et de décision* sera à l'ordre du jour, pour l'estimation des paramètres de tels modèles. Nous abordons cette question page 162.

6.1.3 Etudes dynamiques, chocs, expériences

Comme dans le monde réel, l'étude de la dynamique du système économique modélisé passe par l'analyse graphique des séries temporelles des principaux indicateurs macroéconomiques. Nous utiliserons donc fréquemment ce type d'analyse, qui permet de saisir les enchaînements causaux à travers la description de l'« histoire » d'une simulation. Surtout, pour faire apparaître plus clairement ces mécanismes, nous pourrions nous livrer à de véritables expériences.

Dans une expérience, deux simulations sont mises en route. Dans l'une des deux simulations, le facteur à étudier est présent — sous la forme d'une brutale variation d'un paramètre à un instant donné — et dans l'autre non. Tous les autres paramètres sont en tout point identiques pour chaque manipulation — y compris la graine du générateur de nombres pseudo-aléatoire² ; la seconde simulation constitue un dispositif témoin.

Cependant de telles études ne peuvent être menées de façon systématique, pour toutes les combinaisons de paramètres du modèle.

6.1.4 Exploration extensive

Les modèles multi-agents présentent généralement un grand nombre de paramètres. Ginot et Monod (2006) montrent qu'une exploration extensive d'un tel modèle est impossible. Reprenons rapidement leur démonstration avec les données de notre modèle.

Le scénario d'une simulation est défini par 27 paramètres (5 pour le secteur bancaire, 5 pour le secteur des ménages, 17 pour le secteur des entreprises). Si l'on discrétise chacune des dimensions représentant un paramètre du modèle en 10 classes (10 valeurs pour chaque paramètres), il faudra 10^{27} simulations pour explorer toutes les combinaisons — un milliard de milliards de milliards de simulations — ce qui représente, même avec un ordinateur très puissant, un temps de calcul très largement supérieur à l'âge de l'univers (et encore, nous n'avons pas pris en compte le caractère stochastique du modèle).

L'exploration de toutes les configurations de paramètres est donc impossible, et

2. Un ordinateur étant une machine déterministe, le hasard y est simulé au moyen d'un générateur de nombres pseudo aléatoires, c'est-à-dire au moyen d'un algorithme qui génère une séquence de nombres présentant certaines propriétés du hasard. La « graine » du générateur est un nombre qui définit l'état initial de l'algorithme. En fixant cette graine d'une simulation à une autre, on s'assure de pouvoir disposer de deux séquences de nombres pseudo aléatoires identiques. Le contrôle de cette *graine* est donc essentiel à la répliquabilité unitaire des simulations (Amblard, Rouchier, et Bommel 2006, p. 95).

c'est pour cela que Ginot et Monod jugent qu'il est toujours préférable d'analyser le modèle analytiquement — lorsque c'est possible. Dans le cas des modèles multi-agents, c'est généralement impossible.

6.1.5 Analyses de sensibilité

Ginot et Monod proposent alors de pratiquer des analyses de sensibilité locale. Il s'agit d'étudier les variations des sorties du modèle par rapport à une gamme de variation d'un paramètre unique, tous les autres restants fixés. Comme le font remarquer les auteurs :

« On constatera aisément que la sensibilité dépend non seulement de la sortie et du paramètre considéré, mais aussi, et en particulier pour les modèles non linéaires, de la valeur précise du paramètre, de la valeur des autres paramètres et de l'instant de la simulation. C'est donc une valeur locale, valable uniquement pour un point de fonctionnement particulier du modèle. » (Ginot et Monod 2006, p. 66)

Les analyses de sensibilité impliquent donc le choix d'un « point de fonctionnement de référence » à proximité duquel on va étudier le modèle. Les auteurs proposent alors d'explorer graphiquement l'évolution des coefficients de sensibilité lorsqu'on s'éloigne du point de référence.

« Une manière très simple est de s'intéresser à chaque paramètre à tour de rôle en construisant les graphes donnant la (les) sortie(s) du modèle en fonction de chaque paramètre, les autres paramètres étant fixés à leur valeur de référence. Et ceci pour une gamme assez large de valeurs pour chaque paramètre, bien souvent la gamme de valeurs biologiquement (ou sociologiquement) acceptables. » (Ginot et Monod 2006, p. 68)

Les auteurs nomment « signature individuelle » du paramètre le graphe ainsi construit — avec en abscisse le paramètre étudié, en ordonnée la variable dépendante observée — qui permet de visualiser la sensibilité de l'une par rapport à l'autre.

A partir de ces signatures individuelles, Ginot et Monod proposent de préparer des analyses de sensibilités globales. Ces études posent trois difficultés particulières : « il va falloir résumer chaque signature individuelle, explorer un très vaste espace de combinaisons de valeurs de paramètres, et estimer les interactions entre paramètres. » (Ginot et Monod 2006, p. 73).

Nous l'avons déjà dit, notre modèle ne prétend pas être un modèle *de prévision et de décision*. Suivant la démarche constructive propre à l'approche multi-agents, nous avons fait abstraction d'un très grand nombre d'éléments importants du monde

réel pour concentrer notre effort de modélisation sur quelques mécanismes simples de la production et du crédit. Une étude systématique et une mesure précise des sensibilités globales du modèle sont donc sans intérêt pour notre projet, au regard des difficultés techniques que cette étude et cette mesure impliquent.

Nous considérons notre modèle comme un *prototype* — c'est à dire un premier exemplaire destiné à subir des tests afin de valider les choix de conception de l'ensemble. Nous décidons d'un plan d'exploration limité à l'analyse des signatures individuelles des principaux paramètres du modèles, autour d'un point de référence de fonctionnement unique. L'étude d'une signature individuelle revenant à explorer le modèle le long d'une dimension de l'espace des paramètres, nous nous proposons donc de choisir un point de départ approximativement central dans cet espace, puis de « rayonner » méthodiquement à partir de ce point en privilégiant les directions qui paraissent les plus prometteuses.

Le modèle étant stochastique, nous devons lancer plusieurs fois une nouvelle simulation pour la même valeur du paramètre étudié en faisant varier à chaque fois la graine du générateur de nombres pseudo-aléatoires. Nous obtiendrons donc une mesure de la variabilité du modèle pour chaque valeur du paramètre (Ginot et Monod 2006, p. 68)³.

6.2 Définition du scénario de base

Nous devons définir un scénario de base, comme le point de fonctionnement de référence du modèle. C'est à partir de ce « camp de base » que nous pourrons ensuite lancer méthodiquement des « expéditions exploratoires » dans différentes directions de l'espace des paramètres.

Où placer ce « camp de base » ?

6.2.1 Le problème de l'estimation

Selon Axtell, l'immensité de l'espace des paramètres d'un modèle multi-agents est la source principale des critiques qui peuvent être adressées à cette approche.

« Against the [multi-agent system] macro research program I have outlined here the objection might be raised that until a systematic way to

3. Si l'on discrétise le paramètre étudié en 10 classes, et que pour chaque valeur de la gamme ainsi définie on lance 5 simulations en faisant varier la graine du générateur de nombres aléatoires, cela fait un total de 50 simulations. Si l'on compte 4 minutes en moyenne par simulation, le tracé des signatures individuelles d'un paramètre requerra environ 200 minutes de calcul, c'est-à-dire un peu plus de 3 heures.

estimate such models is developed there is no way to make such models truly relevant empirically, at least on a level with conventional macro-models. A different way to say this is that in the space of all possible models that can be created in software, only one or at most a few matter empirically, and until methods are developed that determine these from data [multi-agent system] macro will be less a scientific undertaking than a speculative enterprise. » (Axtell 2004, p. 13)

Axtell propose alors de répondre à cette critique au moyen une méthode d'« estimation par la simulation » : rechercher dans l'espace des paramètres les valeurs qui minimisent la différence entre les sorties du modèle et les données agrégées du monde réel. Cette méthode ne nous convainc pas : à force de chercher dans l'immensité de l'espace des paramètres, on peut peut-être tomber sur un système de valeurs qui donnent des résultats satisfaisants, mais cela ne signifie rien sur la validité du modèle⁴. On a justement souligné comment les brusques changements de régimes, les crises mêmes, dévoilent les faiblesses de modèles ajustés *ex post* pour correspondre aux données macroéconomiques⁵.

Pour nous, au contraire, la méthode d'« estimation par la simulation » doit se situer au niveau microéconomique. Nous proposons de prendre l'historique comptable d'agents du modèle ; de les présenter, pêle-mêle avec des historiques comptables réels d'agents réels du monde réel, à un comptable réel et lui demander : « Sauriez-vous distinguer les agents virtuels des agents réels, seulement à partir de ces historiques ? » Le jour où une telle question mettra le comptable dans l'embarras, le modèle sera correctement estimé⁶.

Nous n'en sommes évidemment pas là. Notre modèle n'est, on l'a dit, qu'un *prototype*, un modèle de recherche peuplé d'agents très rudimentaires, et qui concentre son objet sur le rôle de la structure réelle et monétaire dans la dynamique du modèle. Dans ce cadre, une estimation rigoureuse du modèle basée sur l'étude sociologique des agents réels n'a pas d'objet. Le scénario de base est donc défini par un ensemble de paramètres *ad hoc*.

4. « Bien entendu, un modèle ne peut être validé si la confrontation de ses résultats aux données d'origine expérimentales conduit à des contradictions. Mais la non-contradiction ne signifie pas que le modèle ne soit pas à repousser. Elle ne prouve ni que le modèle convienne, ni qu'il soit le meilleur possible » (Legay 1997, p. 54). Autrement dit, « [...] on peut facilement obtenir de bons résultats pour de mauvaises raisons » (Amblard, Rouchier, et Bommel 2006, p. 103).

5. Voir page 33.

6. Cette approche est en fin de compte celle préconisée par Cohen (et dans une certaine mesure, par Simon) : peupler le modèle de modèles individuels les plus fidèles possibles aux agents réels. Voir Cohen (1960), cité page 28.

6.2.2 Choix des paramètres

Les tableaux 6.1 à 6.3 (pages 165 à 166) donnent les paramètres du scénario de base pour chacun des secteurs. Deux propriétés principales nous ont conduit à sélectionner cet ensemble de paramètres pour définir le scénario de base :

- ce scénario atteint rapidement une dynamique présentant des régularités de long terme affirmées,
- il se situe relativement loin des situations extrêmes pouvant conduire à une crise systémique.

Ainsi, le scénario de base constitue une référence relativement stable et approximativement centrale pour l’exploration ultérieure du modèle, que ce soit par des analyses de sensibilité ou par des études dynamiques.

6.2.3 Etat initial du modèle

La question des paramètres exogènes réglée, reste la question des valeurs initiales des paramètres endogènes. Cette question, qui n’a pas d’importance dans des modèles d’équilibre unique, peut être très importante dans des modèles dynamiques et complexes susceptibles de présenter des phénomènes de « dépendance au sentier » (*hystérésis*).

Or le nombre de variables définissant l’état du système est bien plus grand que le nombre de paramètres, puisque l’état du système est rigoureusement défini par l’état de chacun des agents qui le composent, états dont nous savons qu’ils sont hétérogènes. Il est donc hors de question de pratiquer une étude systématique des conditions initiales, de même qu’il est inutile, compte tenu du caractère rudimentaire du modèle, d’aller chercher ces données dans le monde réel. Enfin, même une initialisation arbitraire du modèle pose problème : en effet, il paraît extrêmement difficile de concevoir une répartition cohérente des stocks de monnaie, de marchandises et de dettes entre les milliers d’agents composant le modèle.

Une solution beaucoup plus simple consiste à confier l’initialisation du modèle au modèle lui-même, par la mise en oeuvre des processus endogènes de production et de répartition, en partant de zéro. La matrice des bilans sectoriel B.1 (annexe B, page 353) donne une synthèse de l’état du modèle au début de la simulation, fin décembre 1999⁷. A ce moment, tous les stocks sont nuls : les agents ne détiennent ni marchandises, ni monnaie, ni dette. Cette hypothèse peu réaliste — une économie sans passé — va fortement marquer les premières années de la simulation.

7. La date de départ des simulations est évidemment complètement arbitraire. Néanmoins, il fallait choisir une date réelle pour pouvoir utiliser les outils (`TimeSeries...`) fournis par la bibliothèque logicielle *JFreeChart*.

r_B	0.05	le taux d'intérêt normal.
r'_B	0.10	le taux d'intérêt majoré.
d_B	12	le terme normal des crédits.
\hat{d}_B	24	le terme maximal des crédits.
κ_B^*	0.10	le ratio normal de fonds propres.
μ_B^K	0.50	la propension à distribuer l'excès de capital.

TABLE 6.1 – Scénario de base : Paramètres du secteur bancaire

n_H	5000	le nombre de ménages.
d_H^r	12	la durée normale de résistance à une baisse du salaire de réservation.
s_H	0.05	la propension à épargner.
$\nu_H^{W^*}$	0.07	la flexibilité mensuelle maximale du salaire de réservation.
μ_H^S	0.50	la propension à dépenser l'épargne excédentaire.

TABLE 6.2 – Scénario de base : Paramètres du secteur des ménages

n_F	680	le nombre d'entreprises.
m_F	10	le nombre de machines par entreprise.
d_F^p	6	durée d'un processus de production.
pr_F	100	la productivité moyenne du secteur des entreprises.
π_F^F	0	écart maximal de la productivité des entreprises à productivité moyenne du secteur).
π_F^M	25	écart maximal de la productivité des machines à la productivité moyenne de l'entreprise.
d_F^w	[6;18]	la durée des contrats de travail.
κ_F^*	0.50	le ratio normal d'autonomie financière.
in_F^*	4	le niveau normal des stocks d'inventaire.
ρ_F^*	0.03	le taux normal d'emplois vacants.
\bar{W}_F	0	le salaire minimum légal.
ν_F^P	0.10	la flexibilité mensuelle maximale du prix unitaire des biens produits.
ν_F^w	0.10	la flexibilité mensuelle maximale du niveau de production.
ν_F^{Wup}	0.06	la flexibilité à la hausse mensuelle maximale du salaire offert à l'embauche.
ν_F^{Wdown}	0.08	la flexibilité à la baisse mensuelle maximale du salaire offert à l'embauche.
μ_F^K	0.50	la propension à distribuer le capital excédentaire.
μ_F^{in}	0.50	la propension à écouler les stocks d'inventaires.
λ_F	2	le rapport des capacités de commercialisation aux capacités de production.

TABLE 6.3 – Scénario de base : Paramètres du secteur des entreprises

Dans les premières périodes de la simulation, les agents qui composent l'économie modélisée se trouvent dans une situation initiale extrême. Parce que la production prend du temps, les marchandises ne sont pas immédiatement disponibles. Au cours des premiers mois de la simulation, les entreprises vont devoir produire sans pouvoir vendre et le secteur des ménages va devoir travailler sans pouvoir consommer. Afin d'éviter une faillite généralisée du secteur des entreprises, puis de la banque et donc l'échec prématuré de la simulation, on impose à la banque un comportement parfaitement accommodant au cours des 5 premières années de la simulation.

On pourrait donc considérer que la simulation ne débute véritablement qu'à partir de janvier 2005, les périodes précédentes relevant du processus d'auto-initialisation du modèle. Cependant, plutôt que de masquer ce processus initial, nous choisissons de l'étudier comme faisant partie intégrante du modèle, car il permet d'en saisir certains aspects importants.

6.3 Première simulation

La première simulation a pour objet principal de constituer le point de référence de fonctionnement à partir duquel nous mènerons l'exploration du modèle. Il va cependant nous permettre de vérifier certaines conjectures émises au cours de sa construction.

6.3.1 Conjectures

La première question que l'on se pose est celle de la viabilité du modèle. Les entreprises parviendront-elles en moyenne à rembourser la banque dans les délais impartis ? Les faillites ne seront-elles pas si nombreuses que la banque sera elle-même poussée à la faillite dès les premières périodes de la simulation ?

Conjecture 1 *Clôture du modèle : le modèle est capable de se reproduire de période en période en respectant l'exigence de cohérence des stocks et des flux.*

La seconde question, étroitement liée à la première, est celle de la réalisation des profits. Est-ce que la construction d'un circuit dynamique permet effectivement de résoudre le paradoxe des profits constaté dans les modèles classiques du circuit de la monnaie ?

Conjecture 2 *Economie d'entrepreneurs : les entreprises font des profits, payent les intérêts sur les prêts, distribuent des dividendes et conservent une part pour l'auto-financement.*

La troisième question porte sur la capacité du système à se stabiliser. Bien qu'étant modélisée comme un système décentralisé, peuplé d'agent autonomes, hétérogènes et concurrents, l'économie considérée présente-t-elle de fortes régularités de comportement ou bien son fonctionnement est-il chaotique ?

Conjecture 3 *Homéostasie : le système présente une certaine stabilité sur le long terme, témoin d'une coordination macroscopique émergente.*

6.3.2 Analyse matricielle

Les matrices B.1 à B.73 (annexe B, page 352 et suivantes) donnent les bilans comptables sectoriels de l'économie simulée entre décembre 1999 et décembre 2005. L'étude de ces matrices permet de comprendre pas à pas comment les différents stocks réels et monétaires se constituent progressivement au cours des premières années de la simulation.

Premiers crédits (janvier 2000 – mai 2000)

La première période de la simulation voit se former les premiers stocks. Fin janvier 2000, les ménages possèdent une richesse nette de 11.226.000, déposée en totalité sous forme monétaire auprès de la banque. Ces dépôts correspondent au montant des salaires de la période, dont le paiement a permis la constitution de stocks de biens d'une valeur équivalente à l'actif des entreprises. Parce que la production prend du temps, ces biens sont des biens non-finis qui n'ont pu être proposés à la vente. Les ménages ont donc été contraints d'épargner la totalité des salaires reçus.

Le montant total de la dette des entreprises (11.271.584) dépasse la somme des actifs du secteur avec pour conséquence un capital négatif (-45.584). Ce montant correspond exactement à l'intérêt payé par les entreprises à la banque. Pour la banque au contraire ce paiement constitue une recette qui vient alimenter son capital. Au total, aucun profit net n'a été réalisé, les gains de la banque étant exactement compensés par les pertes du secteur des entreprises. Il en est de même au cours des quatre périodes suivantes.

Premières recettes (juin 2000 – décembre 2000)

En juin 2000, six mois après le début de la simulation, les premières marchandises sortent des machines et sont vendues par les entreprises aux ménages. La valeur des stocks des entreprises décroît, ainsi que celle des dépôts des ménages. Les entreprises réalisent des profits et le capital du secteur devient enfin positif.

Du coup, le capital détenu par les ménages devient positif (11.644.243). La richesse détenue par les ménages n'est plus seulement constituée par les dépôts monétaires. Néanmoins, l'égalité comptable entre la richesse nette de secteur des ménages et la valeur des stocks d'inventaire des entreprises reste respectée.

Le reflux de la monnaie des ménages vers les entreprises se traduit par un gonflement des dépôts des entreprises. En effet, la durée normale du crédit étant de 12 mois et les entreprises n'ayant pas la possibilité de rembourser par anticipation, elles se retrouvent avec des excès considérables de liquidités, atteignant 59.5 pour cent de l'actif du secteur en août 2000. Du coup, les besoins de financement des entreprises sont très faibles et leur dette ne croît plus que faiblement.

Premières échéances (janvier 2001 – juin 2001)

A partir de janvier 2001, 12 mois après le début de la simulation, les premiers crédits arrivent à échéance et sont remboursés par les entreprises. L'encours de la dette des entreprises, qui avait atteint 85.213.084 en décembre 2000, n'est plus que de 40.661.544 en juin 2001. Ces remboursements conduisent à un rapide dégonflement des dépôts des entreprises qui ne représentent plus que 18,9 pour cent de l'actif du secteur en juin 2001.

Le secteur des entreprises dépasse 50 pour cent de fonds propres dès mars 2001. Une analyse des données détaillées montre que certaines entreprises ont atteint leur objectif de fonds propres dès janvier et ont commencé à distribuer des dividendes dès le mois de février.

En mai 2001, le capital de la banque atteint 11,2 pour cent du passif total, dépassant son objectif de fonds propres (fixé à 10 pour cent). Dès le mois suivant, la banque va pouvoir distribuer l'excédent sous forme de dividende versé à son propriétaire.

Stabilisation (juillet 2001 – décembre 2005)

Même si le secteur des entreprises a réduit son endettement, toutes les entreprises ont contracté de nouveaux prêts prenant le relai de ceux arrivés à échéance. Dès juillet 2001, l'encours des crédits et la masse des dépôts repartent à la hausse.

Au fur et à mesure que se déroule la simulation, les états des agents diffèrent de plus en plus, leurs actions se désynchronisent peu à peu. Au niveau macroéconomique, flux et reflux se croisent à chaque période. Si les niveaux absolus des stocks continuent à évoluer dynamiquement, les fluctuations des stocks réels et monétaires s'atténuent et les rapports entre ces niveaux tendent à se stabiliser rapidement. Ainsi, la part du capital détenu dans la richesse totale des ménages, qui s'élevait à 24,7 en juin 2000, atteint 85,9% en décembre 2000, puis 86,3% en décembre 2001. Cette part atteint

89% fin 2005 — un niveau très proche des niveaux qui seront observés dans la suite de la simulation.

Depuis janvier 2005, la banque n'est plus accommodante avec les entreprises défaillantes. L'économie modélisée a pris son envol et n'a plus besoin de protection particulière.

6.3.3 Etude dynamique

Pour l'étude de la dynamique de long terme du scénario après 2006, nous nous appuyons sur l'étude graphique des principaux indicateurs macroéconomiques (figures 6.1, pages 175 à 177)⁸.

Passées les premières années, on observe une stabilisation très rapide des principaux indicateurs macroéconomiques de la simulation. En particulier, l'inflation, modérée, se stabilise entre 0% et 5% (fig. 6.1o) et le taux de chômage entre 8% et 12,5% (fig. 6.1r). Cette stabilité se traduit sur la courbe de Phillips par un nuage de points compact (fig. 6.1d).

Marché des biens

Au niveau du marché des biens, on observe une étroite correspondance entre la production et la consommation (fig. 6.1g)⁹. Les entreprises parviennent à stabiliser le niveau de leurs stocks (fig. 6.1e) en particulier en ajustant le niveau de la production (fig. 6.1f). Les prix des marchandises ne divergent que modérément de la tendance moyenne autour de laquelle ils semblent graviter (fig. 6.1a). Tous ces éléments témoignent du succès de la coordination de l'offre et de la demande sur un marché des biens complètement décentralisé.

D'ailleurs, les entreprises parviennent en moyenne à rembourser les crédits dans les délais requis, puisque les créances douteuses ne représentent qu'entre 25 et 30% de l'encours total de la banque (fig. 6.1k). Même ces créances douteuses sont pour la plupart remboursées dans le nouveau délai accordé par la banque. Seul un petit nombre échoue à tenir ses engagements : on enregistre seulement de 1 à 11 faillites

8. Néanmoins, nous gardons un oeil sur les matrices de bilan sectoriel afin de vérifier que le modèle reste à tout moment cohérent.

9. Cependant la courbe de la production, même très proche de celle de la consommation, se situe constamment au-dessus d'elle. Comment se fait-il alors que les entreprises parviennent à stabiliser leurs stocks d'inventaires ? Il semble y avoir là une fuite de marchandises hors du circuit réel *production-consommation*. En fait, ce sont les faillites d'entreprises qui expliquent cette fuite : les marchandises manquantes ne sont ni consommées par les ménages, ni stockées par les entreprises, elles sont détruites au moment de la disparition des entreprises défaillantes.

par an, nombre à rapporter aux 680 entreprises présentes dans le modèle (fig. 6.1m). Enfin, les entreprises parviennent à distribuer des dividendes à leurs propriétaires, ainsi qu'en témoigne le partage du revenu entre salaires et profits, dont on remarque au passage l'étonnante stabilité (fig. 6.1h).

Marché du travail

Les données relatives au marché du travail témoignent aussi d'une grande stabilité. Comme les prix sur le marché des biens, les salaires semblent graviter autour d'une moyenne guidée par une tendance très régulière. Les salaires sont même moins dispersés que les prix, cette stabilité s'expliquant sans doute par la présence de contrats de travail conclus pour plusieurs périodes. Cependant, la coexistence d'un nombre élevé de chômeurs avec un nombre élevé d'emplois vacants (fig. 6.1q et 6.1t) laisse penser que la coordination de l'offre et de la demande n'est pas parfaite sur ce marché.

En fait, tous ces chômeurs sont des « chômeurs volontaires » au sens néoclassique du terme (fig. 6.1u) : ces ménages ont trouvé des offres d'emploi sur le marché, mais ils ne les ont pas acceptées parce que les salaires proposés étaient inférieurs à leur salaire de réservation. Cette rigidité du marché du travail est illustrée par la forme compacte de la courbe de Beveridge (fig. 6.1s). Néanmoins, les chômeurs ne restent pas longtemps sans trouver un emploi qui correspond à leurs attentes, la durée moyenne passée au chômage n'étant que de deux mois (fig. 6.1v).

Banque

Du côté de la banque, la simulation se déroule aussi sans heurt majeur. Les faillites d'entreprises n'affectent que faiblement les fonds propres de la banque que celle-ci parvient à maintenir presque régulièrement au-dessus du niveau requis de 10% (fig. 6.1k). La banque dégage même très régulièrement un excédent puisqu'elle distribue d'importants dividendes à son propriétaire (fig. 6.1n), aux alentours de 100 fois le salaire médian. Au passif de la banque, la structure des dépôts reste remarquablement stable : environ 90% pour les dépôts des entreprises, 10% pour les dépôts des ménages (fig. 6.1l). Enfin, toujours dans la sphère monétaire, on voit aussi la vitesse de rotation de la monnaie se stabiliser dans l'intervalle [3.2; 3.4] (fig. 6.1p).

6.3.4 Interpretation

On peut à présent revenir aux conjectures définies au début de cette section pour les confronter à ces résultats.

Conjecture 1 : Le modèle parvient à se reproduire de période en période, en respectant les principes de cohérence comptable exprimés par les matrices de bilan sectoriel. La monnaie reflue vers la banque, qui parvient à maintenir un capital positif. La clôture du modèle est assurée alors même que les agents maintiennent des stocks de monnaie importants.

Conjecture 2 : Les entreprises parviennent à faire des profits. Elles distribuent des dividendes, elles paient les intérêts dus à la banque, qui elle-même distribue des dividendes. Aucune des difficultés du « paradoxe des profits¹⁰ » ne se manifeste. L'économie modélisée est une *économie d'entrepreneurs*.

Conjecture 3 : Bien que les marchés soient complètement décentralisés, bien que l'information des agents soit délibérément limitée, bien que leurs fonctions de comportement soit constitués de procédures d'ajustement très rudimentaires, on observe une convergence des prix et des salaires vers des valeurs qui permettent, non un apurement des marchés, mais une coordination certaine entre les forces de l'offre et de la demande. De plus, tous les grands indicateurs manifestent une grande stabilité de long terme, et cette stabilité peut être considérée comme l'expression d'une coordination macroscopique émergente, dans la mesure où elle ne peut être déduite du comportement assigné à chacun des agents.

Une émergence

Parmi les manifestations de la stabilité du modèle observées au cours de la simulation du scénario, il en est une qui attire particulièrement notre attention : la stabilité de la répartition du revenu entre part des salaires et part des profits (fig. 6.1h). Cette stabilité est étonnante, dans la mesure où on a vu que chaque entreprise déterminait de façon rigoureusement indépendante le prix accompagnant son offre sur le marché des biens et le salaire accompagnant son offre sur le marché du travail :

- le prix est déterminé selon un processus d'ajustement basé sur l'observation du niveau des stocks de l'entreprise¹¹ ;
- leur salaire d'embauche est déterminé selon un processus d'ajustement basé sur l'observation du niveau des emplois vacants dans l'entreprise¹².

L'observation d'une forte stabilité de la répartition du revenu entre part des salaires et part des profits témoigne donc de l'existence d'une *coordination macroscopique émergente* entre formation des prix sur le marché des biens et formation des salaires sur le marché du travail.

10. Voir la description de ce paradoxe, chapitre 3, page 68.

11. Voir la description de la procédure d'ajustement des prix, chapitre 4, page 118.

12. Voir la description de la procédure d'ajustement des salaires, chapitre 4, page 120.

Ce qui est particulièrement intéressant dans ce comportement imprévu du modèle, c'est qu'il renvoie à ce que Keynes considère comme un « phénomène statistique bien connu » du monde réel :

« [The stability of the proportion of the national dividend accruing to labour] is one of the most surprising, yet best-established, facts in the whole range of economic statistics, both for Great Britain and for the United States. » (Keynes 1939)

Et un peu plus loin :

« [...] the result remains a bit of a miracle. » (Keynes 1939)

La stabilité de long terme de la répartition du revenu est donc *aussi* une émergence des économies réelles.

Nous serons donc particulièrement attentif à la question de répartition du revenu entre salaires et profits lorsque, au cours des chapitres suivants, nous poursuivrons notre exploration du modèle. Nous essaierons à cette occasion de comprendre quels sont les facteurs explicatifs de cette stabilité, ainsi que les facteurs susceptibles d'expliquer le niveau auquel s'établit le partage du revenu.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un scénario de base choisi pour devenir le point de fonctionnement de référence du modèle pour son exploration future.

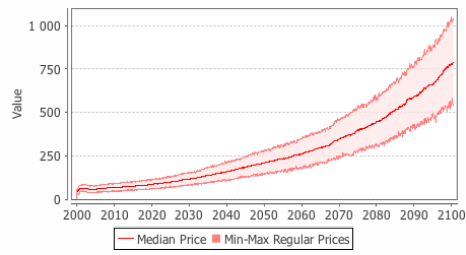
Dès cette première simulation, nous avons obtenu certains résultats importants, qui viennent nous encourager dans notre démarche :

- il est possible de construire un modèle macroéconomique d'économie de marché radicalement décentralisé, peuplé d'agents multiples, autonomes, hétérogènes et concurrents, capable de se reproduire de période en période en respectant la cohérence des stocks et des flux ;
- il est possible de construire un modèle de circuit monétaire dynamique et complexe, respectant les principes de base de la théorie monétaire de la production, et dans lequel les entreprises réalisent des profits, distribuent des dividendes, paient l'intérêt sur les prêts ;
- il est possible d'observer, dans le comportement d'un tel modèle, des manifestations de mécanismes homéostatiques émergents, c'est-à-dire des phénomènes de stabilisation non directement déductibles du comportement des agents.

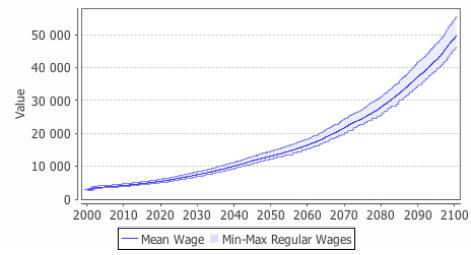
Bien sûr, la portée de ces trois résultats doit immédiatement être relativisée : ils n'ont été obtenus que pour un scénario, c'est-à-dire pour un point dans l'immensité de l'espace des paramètres ; de plus, nous avons justement *choisi* ce scénario pour

ses propriétés de stabilité. . . Les résultats du scénario de base ne sont donc vraiment, *pour le moment*, qu'un point de fonctionnement de référence du modèle.

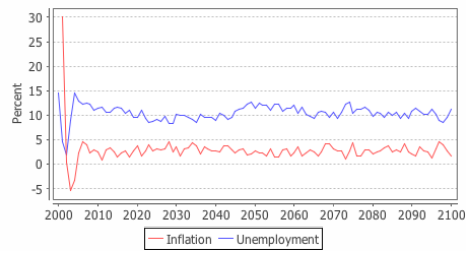
Inversement, il est tout à fait improbable que, dans un espace de paramètres aussi étendu, nous ayons réussi à trouver la seule combinaison de paramètres présentant des propriétés aussi remarquables. La question qui se pose à présent est celle de la stabilité de ces résultats lorsqu'on s'éloigne du point de référence, c'est-à-dire la question de l'étendue et du contour du domaine de reproductibilité et de stabilité du modèle.



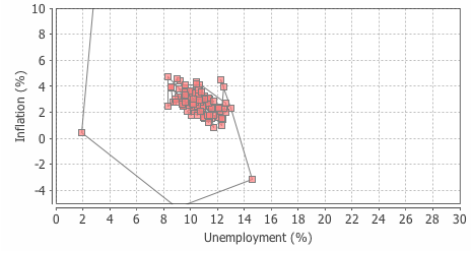
(a) Prix



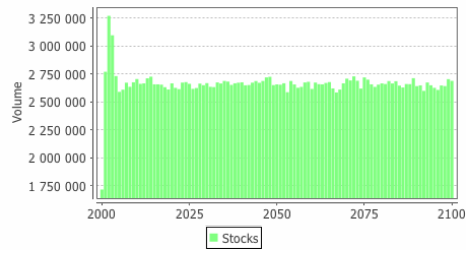
(b) Salaires



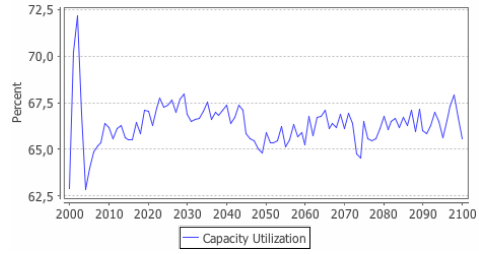
(c) Inflation et chômage



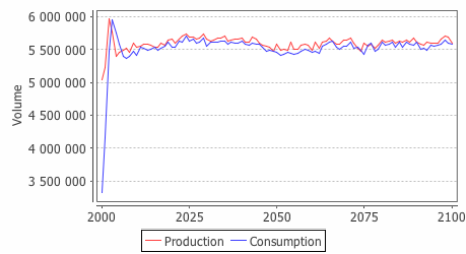
(d) Courbe de Phillips



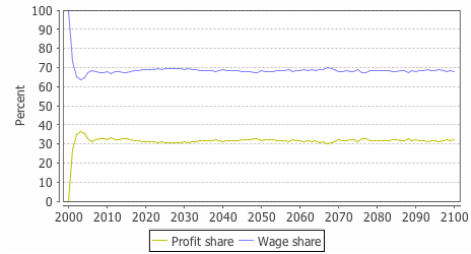
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

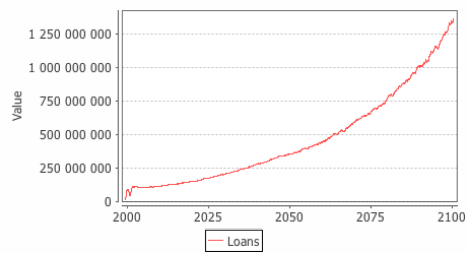


(g) Marché des biens (volume)

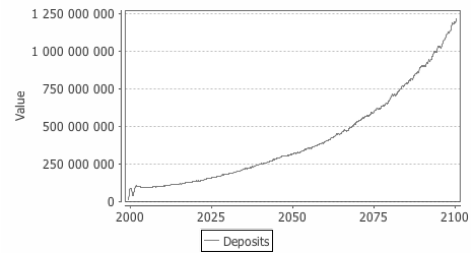


(h) Répartition des revenus

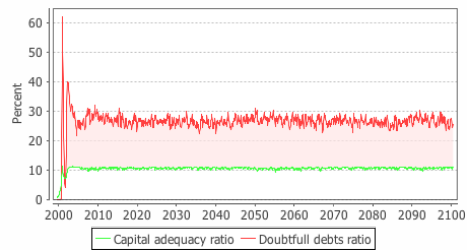
FIGURE 6.1 – Scénario de base – Principaux indicateurs macroéconomiques



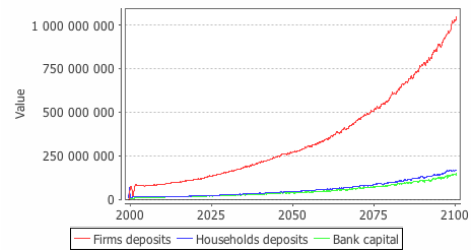
(i) Crédits



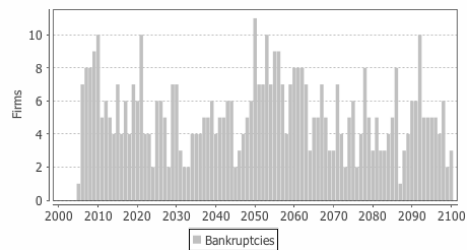
(j) Dépôts



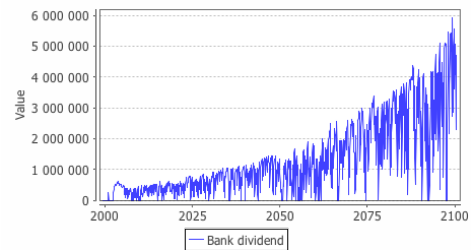
(k) Fonds propres et créances douteuses



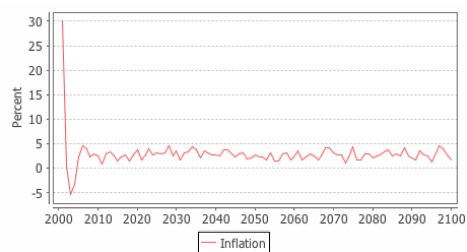
(l) Passif de la banque



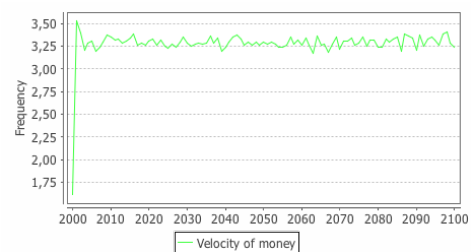
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires

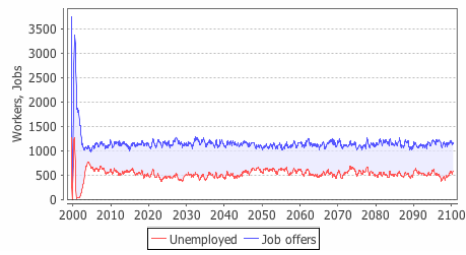


(o) Inflation

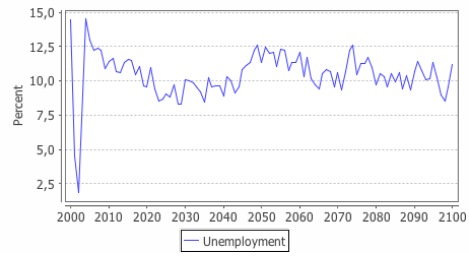


(p) Vitesse de la monnaie

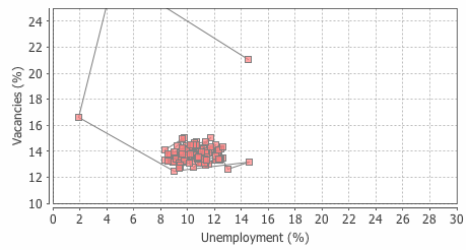
FIGURE 6.1 – Scénario de base – Indicateurs bancaires et monétaires



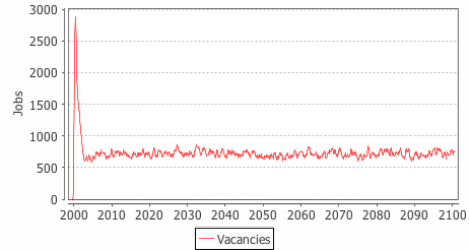
(q) Marché du travail



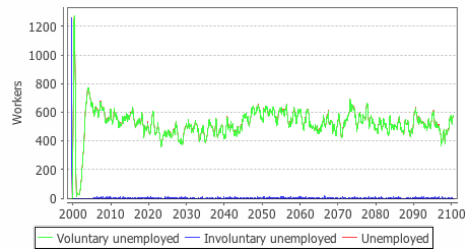
(r) Chômage



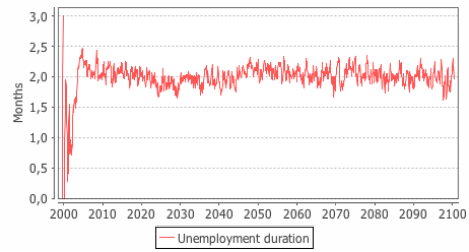
(s) Courbe de Beveridge



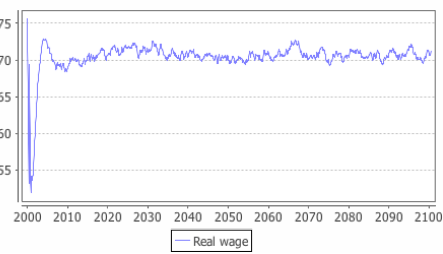
(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage



(v) Durée moyenne du chômage



(w) Salaire réel

FIGURE 6.1 – Scénario de base – Indicateurs du marché du travail

Chapitre 7

Vitesses de circulation

It will be a very important part of our story that firms initiate production, that the production process takes time and therefore that firms need finance in advance of their receiving anything from sales.

Godley et Lavoie (2007)

Dans le chapitre 3, nous avons émis l'hypothèse que, pour dépasser les difficultés du « paradoxe des profits », il fallait doter le modèle que nous voulions construire d'une structure réelle et monétaire dynamique et complexe, dans laquelle les vitesses de circulation des grandeurs réelles et monétaires seraient distinguées. Sur cette hypothèse nous avons construit un modèle dans lequel :

- la période de base est définie comme l'intervalle de temps séparant deux paiements consécutifs des revenus ;
- la production prend réellement du temps — durée définie par la durée d'un cycle de production ;
- la monnaie a une durée de vie limitée — durée définie par le terme du crédit bancaire.

Dans le chapitre 6, avec le scénario de base, nous avons effectivement constaté que les entreprises n'avaient pas, en moyenne, de difficulté à réaliser des profits, à distribuer ces profits sous forme de dividendes, à en conserver une part pour l'auto-financement de la production, à payer l'intérêt dû à la banque — toutes choses qui paraissaient impossibles dans le cadre du circuit classique doté d'une période unique.

Pour obtenir confirmation du rôle joué par les différentes vitesses de circulation, nous nous proposons dans le présent chapitre d’explorer le modèle en faisant varier systématiquement les différents paramètres qui définissent ces vitesses. Dans la section 7.1, nous commencerons par étudier le rôle de la durée du cycle de production. Dans la section 7.2, nous nous intéresserons au rôle joué par la durée d’immobilisation dans les stocks d’inventaire. Dans la section 7.3, nous étudierons enfin le rôle de la durée du crédit.

7.1 Durée du processus de production

L’idée que la production prend du temps est au centre de la théorie monétaire de la production¹. Dans le chapitre 3, nous avons montré que, dans les modèles classiques du circuit, la production ne prenait pas réellement du temps puisqu’elle ne durait pas plus que le temps pendant lequel les salariés pouvaient patienter sans consommer. La conséquence de cette représentation est que la dépense des salaires de la période se porte sur des marchandises qui ont été entièrement produites au cours de la période, au moyen du paiement de ces mêmes salaires.

Parce que cette représentation ne correspond pas à ce que nous savons du monde réel, parce qu’elle est contradictoire avec la notion d’économie monétaire de production, et parce que nous pensons qu’elle est à l’origine du « paradoxe des profits », nous avons décidé de modéliser les processus de production comme des processus qui prennent réellement du temps, c’est-à-dire qui s’étalent sur plusieurs périodes. Ainsi, dans le scénario de base, la durée d’un cycle de production est égale à 6 mois² et on observe effectivement que les entreprises parviennent à réaliser des profits et à distribuer des dividendes, la part des profits s’établissant à environ 30 % du revenu global³.

Que se passe-t-il si on réduit progressivement la valeur de ce paramètre ? Et si on l’allonge ? Quel est l’impact de ce paramètre sur la dynamique macroéconomique du modèle et en particulier sur le partage du revenu entre salaires et profits ? La présente section a pour objet de répondre à ces questions.

1. Voir la définition de la notion d’économie monétaire de production, chapitre 3, page 60.

2. Voir les paramètres du secteur des entreprises pour le scénario de base, chapitre 6, table 6.3, page 166.

3. Voir chapitre 6, figure 6.1h, page 175.

7.1.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle à la durée du cycle de production (d_F^p).

Paramètres

On fait varier la durée du processus de production (d_F^p) entre 1 et 24 mois⁴. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés. Pour chaque valeur du paramètre (d_F^p), on lance 10 fois la même simulation, en faisant varier la graine du générateur de nombres aléatoires entre 0 et 9. On laisse se dérouler la simulation pendant 50 ans (soit 600 itérations) et on enregistre les valeurs des principales variables macroéconomiques observées à la fin janvier 2050.

Le tableau 7.1 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Paramètre étudié	d_F^p
Intervalle des valeurs étudiées	[1; 24]
Valeur de référence (scénario de base)	6
Pas	1
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	240

TABLE 7.1 – Analyse de sensibilité du modèle à la variation de la durée du processus de production – Paramètres

Conjectures

A la limite, si on abaissait la durée du cycle de production jusqu'à 0 — la marchandise serait alors immédiatement disponible — il est raisonnable de penser qu'on retomberait dans le cas du circuit classique dans lequel le profit est impossible. En revanche, plus on allonge la durée du cycle de production, plus une unité monétaire a de temps pour circuler dans l'économie avant de se retrouver face à la marchandise

4. Cet intervalle encadre la valeur du paramètre dans le scénario de base ($d_F^p = 6$ mois). De plus, il faut que $d_F^p > 0$ pour que l'économie soit une *économie monétaire de production*, et que $d_F^p \leq 24$ puisque la durée maximale du crédit est fixée à 24 mois.

pour la production de laquelle elle a été créée. Allonger la durée du cycle de production revient à augmenter la vitesse de circuit *revenu–consommation* relativement à celle du circuit *force de travail–marchandise*. On s’attend à ce que cet allongement ait un rôle positif sur le niveau des profits relativement à celui des salaires :

Conjecture 4 *La part des profits s’élève avec l’allongement de la durée du processus de production.*

Dans le chapitre précédent, on a observé une remarquable stabilité de la répartition des revenus des ménages entre salaires et profits, stabilité qui témoigne, selon nous, de l’existence d’une coordination macroscopique émergente entre le marché des biens et le marché du travail⁵. On s’attend à ce que cette coordination macroscopique se manifeste par une corrélation positive entre le niveau des salaires et des prix lorsqu’on fait varier la durée de production :

Conjecture 5 *Il existe une corrélation positive entre le niveau des prix et celui des salaires.*

Les profits constituent une source de revenu supplémentaire dans le circuit ; ils entrent en concurrence avec les salaires pour l’achat du produit. Si la conjecture 4 est vérifiée, alors on doit observer aussi un renforcement de la demande et donc de l’activité :

Conjecture 6 *La demande et l’activité se renforcent avec l’allongement de la durée du processus de production.*

Si l’on observe effectivement un renforcement de la demande et de l’activité avec l’allongement de la durée du processus de production, alors les entreprises doivent pouvoir rembourser plus facilement leurs crédits. Cependant, si la durée de production se rapproche de la durée maximale du crédit, il sera de plus en plus difficile aux entreprises d’écouler leur production à temps pour pouvoir rembourser la banque. Si la durée de production est supérieure à la durée maximale du crédit, aucune entreprise ne peut réussir à rembourser la banque à temps et la clôture du modèle est impossible :

Conjecture 7 *L’allongement de la durée du processus de production entraîne une augmentation des difficultés des entreprises à l’approche de la durée maximale du crédit et conduit à une crise systémique pour toutes les durées supérieures.*

5. Voir l’analyse des résultats du scénario de base, chapitre 6, page 172.

Variables observées

Le comportement du modèle est étudié à travers l'observation de la sensibilité de 8 variables⁶ :

- prix (valeur nominale moyenne constatée le dernier mois),
- salaires (valeur nominale moyenne constatée le dernier mois),
- production (volume total constaté la dernière année),
- chômage (taux moyen constaté la dernière année),
- vitesse de la monnaie (rapport du revenu de la dernière année et de la masse monétaire du dernier mois),
- part des profits (rapport de la somme des profits distribués la dernière année et de le revenu total des ménages la dernière année),
- taux de créances douteuses (rapport de l'encours de créances douteuses et de l'encours total de la banque, le dernier mois),
- faillites (nombre de faillites depuis le début de la simulation).

L'analyse de la sensibilité est complétée par l'analyse graphique des corrélations entre certaines variables dépendantes :

- taux de chômage et taux d'inflation (courbe de Phillips),
- taux de chômage et taux d'emplois vacants (courbe de Beveridge),
- vitesse de la monnaie et inflation,
- nombre de faillites et taux de créances douteuses,
- niveau des prix et niveau des salaires.

Résultats

Les graphiques de la figure 7.1 (page 197) présentent les signatures individuelles⁷ du paramètre d_F^p pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

6. Lors du développement d'un modèle aussi complexe que le nôtre, l'immensité de la tâche force le modélisateur à parer sans cesse au plus pressé, et à laisser à plus tard le développement de certains points importants. Ainsi, une fois menées nos analyses de sensibilité, nous regrettons de ne pas avoir prêté plus d'attention à la définition des variables observées : certaines sont des variables annuelles, d'autres mensuelles, l'une d'elles (le nombre de faillites) est même définie sur 50 ans. Cela pose des problèmes de cohérence, en particulier pour les mesures de stabilité. Certaines variables sont très redondantes (taux de chômage et volume de la production) tandis que d'autres (taux d'épargne moyen, salaire réel moyen) font cruellement défaut. Malheureusement, développer ces nouveaux indicateurs et relancer les milliers de simulations nécessaires aux analyses de sensibilité était impossible compte tenu de nos contraintes. Nous devons donc prendre notre parti de ces limites, tout en les gardant à l'esprit dans la suite de l'analyse, avec la volonté d'améliorer ces points dans la prochaine version du modèle.

7. Voir la description de la méthode d'analyse de la sensibilité du modèle, chapitre 6, page 161.

Phases : On peut distinguer cinq phases selon la valeur du paramètre :

$d_F^p = 1$: Aucun résultat n'est disponible. La crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

$1 < d_F^p \leq 4$: L'économie est en crise. Le chômage est élevé (supérieur à 11%), la production est faible. La faiblesse des prix et des salaires nominaux indique une situation déflationniste. La part des profits est inférieure à 30%.

$4 < d_F^p \leq 10$: L'allongement de la durée du cycle de production entraîne la croissance de la part des profits, la hausse des prix et des salaires nominaux, ainsi que la hausse de la production et la baisse du chômage. La situation est favorable aux entreprises, ainsi qu'en témoigne le niveau modéré des créances douteuses et le faible nombre de faillites.

$10 < d_F^p \leq 17$: L'économie connaît un mouvement contradictoire. La part des profits poursuit sa progression, mais la production ralentit légèrement tandis que le chômage augmente. Les salaires nominaux stagnent, tandis que la croissance des prix est irrégulière. Les mouvements des prix et des salaires paraissent néanmoins fortement liés. Enfin, la hausse des créances douteuses et du nombre de faillites montre que la situation des entreprises devient de plus en plus difficile.

$17 < d_F^p$: Aucun résultat n'est disponible. La crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

Part des profits : Conformément à la conjecture 4, on observe que la part des profits dans la répartition du revenu s'élève avec l'allongement de la durée du cycle de production (fig. 7.1f) — c'est-à-dire avec l'augmentation de la vitesse du circuit *revenu-consommation* relativement à la vitesse du circuit *force de travail-marchandise*. La relation est très nettement linéaire, la variabilité très faible : il semble que l'on soit en présence d'une relation fondamentale du modèle.

Cependant, lorsque la durée du cycle de production est inférieure à 4 mois, cette relation n'est plus vérifiée ; des études plus poussées devront être menées sur ce point.

Vitesse de la monnaie : La relation entre la durée du cycle de production et la vitesse de la monnaie est elle aussi nettement linéaire (fig. 7.1e). On est alors tenté de mettre en relation l'évolution de la vitesse de la monnaie avec celle de la part des profits : si les profits constituent un revenu supplémentaire qui vient s'ajouter aux salaires dans la formation du revenu global, alors l'allongement de la durée du cycle de production doit se traduire par une augmentation du revenu global par rapport

à la masse monétaire, ce que reflète effectivement l'accélération de la vitesse de la monnaie.

Activité : La conjecture 6, selon laquelle l'allongement de la durée du cycle de production alimente la demande et l'activité à travers la hausse des profits, n'est vérifiée que tant que $4 < d_F^p \leq 10$. Lorsque $10 < d_F^p$, le comportement du modèle devient plus complexe. Bien que la part des profits continue à croître avec la durée du cycle de production, l'activité plafonne et le chômage repart à la hausse (fig. 7.1c et. 7.1d).

Faillites et crise : L'impact de la durée du cycle de production sur les faillites des entreprises (fig. 7.1h) apparaît comme contradictoire :

$d_F^p \leq 6$: le nombre de faillites croît très rapidement avec la baisse de la durée du cycle de production. Pour $d_F^p = 1$, les faillites sont si nombreuses que la crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

$6 < d_F^p$: le mouvement s'inverse, le nombre de faillites augmente avec la hausse de la durée du cycle de production. Cette hausse, nettement linéaire, conduit à une crise systémique pour $d_F^p > 17$.

Ces résultats sont l'expression de la contradiction dans laquelle se trouvent placées les entreprises qui composent le système :

- plus la production prend de temps, plus le système s'éloigne du cas limite des modèles classiques de circuit dans lesquels les entreprises ne peuvent réaliser de profits, ni payer les intérêts dus à la banque, plus la situation macroéconomique est favorable aux entreprises prises collectivement ;
- mais simultanément, plus la production prend de temps, moins chacune des entreprises dispose de temps pour parvenir à écouler le produit et rembourser la banque dans le délai requis — la durée maximale du crédit étant fixée à 24 mois.

Le minimum de la courbe des faillites indique la valeur de d_F^p pour laquelle — tous les autres paramètres étant fixés à leur valeur de référence — les effets de ces logiques contradictoires sur les faillites d'entreprises se compensent exactement. La conjecture 7, selon laquelle le système doit connaître la crise lorsque la durée du cycle de production tend vers la durée maximale du crédit semble ainsi confirmée ; cependant on remarque que le système entre en crise bien avant que la durée du cycle de production n'atteigne la durée maximale du crédit et cet écart reste à comprendre.

Corrélations : Les graphiques de la figure 7.1 (page 198) permettent de rechercher d'éventuelles corrélations entre certaines variables dépendantes du modèle lorsque l'on fait varier le paramètre d_F^p . Le graphique 7.1i (courbe de Phillips) montre l'existence d'une relation inverse entre le chômage et l'inflation. Sur le graphique 7.1j (courbe de Beveridge), la relation inverse entre taux de chômage et taux d'emplois vacants est beaucoup moins nette, ce qui reflète les rigidités du marché du travail⁸. La relation entre vitesse de la monnaie et inflation est complexe : alors que l'inflation et la vitesse de la monnaie paraissent corrélées pour les vitesses inférieures à 3.4, ce n'est plus le cas au-dessus de ce seuil (fig. 7.1k). L'absence de corrélation claire entre le nombre de faillites et le niveau des créances douteuses (fig. 7.1l) reflète l'influence contradictoire de l'allongement de la durée du cycle de production pour les entreprises.

En revanche, le graphique 7.1m montre qu'il existe une très forte corrélation entre les salaires et les prix. Cette corrélation vient confirmer l'existence d'une coordination macroscopique émergente entre la formation des salaires sur le marché du travail et la formation des prix sur le marché des biens (conjecture 5). Cependant, cette corrélation n'est pas linéaire, et au fur et à mesure que la durée du cycle de production s'allonge, les salaires s'élèvent à un rythme moins rapide que les prix, traduisant l'affaiblissement du salaire réel. Lorsque les prix dépassent 500, la corrélation est beaucoup moins marquée. Les graphiques 7.1a et 7.1b montrent que ce changement de régime intervient lorsque $d_F^p > 10$.

7.2 Niveau des stocks

L'analyse de sensibilité que nous venons de mener montre que la durée du cycle de production est, comme nous le pensions, un paramètre essentiel du modèle. Ce paramètre définit la durée minimale d'immobilisation du capital circulant, durée pendant laquelle la monnaie jetée par l'entreprise dans le processus de production va pouvoir circuler ailleurs dans l'économie avant de revenir à sa source.

Cependant, à cette durée minimale imposée par les caractéristiques techniques des unités de production doit être ajoutée une seconde durée : celle nécessaire à la commercialisation. En effet, si les entreprises constituent des stocks d'inventaires destinés à amortir les fluctuations imprévisibles de la production et de la vente, elles retardent ainsi la mise en vente de la production, en laissant volontairement les marchandises stationner un certain temps dans les entrepôts.

8. Nous avons déjà remarqué cette rigidité lors de l'étude du scénario de base (voir chapitre 6, page 171).

Par conséquent, on conjecture que le paramètre qui fixe le niveau des stocks que les entreprises considèrent comme normal doit jouer sur la dynamique du modèle un rôle proche de celui joué par le paramètre qui fixe la durée du cycle de production et les analyses de sensibilité de ces deux paramètres doivent donner des résultats semblables.

7.2.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau normal des stocks d'inventaire des entreprises (in_F^*).

Paramètres

On fait varier le niveau normal des stocks d'inventaires (in_F^*) entre 0 et 12 mois de production⁹. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés. Comme dans l'analyse de sensibilité précédente, on lance 10 simulations pour chaque valeur du paramètre étudié en faisant varier la graine du générateur de nombres pseudo-aléatoires, et la durée normale d'une simulation est de 50 ans.

Le tableau 7.2 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Paramètre étudié	in_F^*
Intervalle des valeurs étudiées	[0; 12]
Valeur de référence (scénario de base)	4
Pas	0.50
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	250

TABLE 7.2 – Analyse de sensibilité au niveau normal des stocks d'inventaire – Paramètres

9. Cet intervalle encadre la valeur du paramètre dans le scénario de base ($d_F^p = 4$ mois). La limite supérieure de l'intervalle à 12 mois est égale à la durée normale du crédit.

Conjectures

Notre conjecture générale est que les variations du niveau normal des stocks donneront des résultats semblables aux variations de la durée du cycle de production. On s'attend donc à ce qu'une durée de stockage plus longue entraîne une répartition des revenus plus favorable aux profits :

Conjecture 8 *La part des profits s'élève avec la hausse du niveau normal des stocks d'inventaire.*

Pour la même raison, on s'attend à retrouver entre les prix et les salaires la relation forte précédemment observée :

Conjecture 9 *Il existe une corrélation positive entre le niveau des prix et celui des salaires.*

On s'attend à ce que l'allongement des durées de stockage, en favorisant les profits, alimente la demande et l'activité :

Conjecture 10 *La demande et l'activité se renforcent avec la hausse du niveau normal des stocks d'inventaire.*

Comme avec la durée de production, un niveau normal des stocks trop élevé doit entraîner, au delà d'un certain seuil, un allongement des durées d'immobilisation tel que les entreprises ne pourront rembourser la banque dans les délais requis, rendant la clôture du modèle impossible :

Conjecture 11 *La hausse du niveau normal des stocks d'inventaire entraîne une augmentation des difficultés des entreprises et, au delà d'un certain niveau, conduit à une crise systémique.*

Résultats

Les graphiques de la figure 7.2 (page 199) présentent les signatures individuelles du paramètre in_F^* pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Phases : On peut distinguer cinq phases selon la valeur du paramètre :

$in_F^* = 0$: Aucun résultat n'est disponible. La crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

- $0 < in_F^* \leq 4$: L'économie est en crise. Le chômage est élevé (supérieur à 10%), la production est faible. La faiblesse des prix et des salaires nominaux indique une situation déflationniste. La part des profits est inférieure à 33%. Pourtant, le niveau des créances douteuses et le nombre de faillites sont très faibles.
- $4 < in_F^* \leq 7$: La hausse du niveau normal des stocks entraîne la croissance de la part des profits, la hausse des prix et des salaires nominaux, ainsi que la hausse de la production et la baisse du chômage. Le niveau des créances douteuses et le nombre de faillites restent à peu près stables à des niveaux modérés.
- $7 < in_F^* \leq 9$: L'économie connaît un mouvement contradictoire. La part des profits poursuit sa progression, mais la production ralentit légèrement tandis que le chômage augmente. Les salaires nominaux sont affaiblis, tandis que la croissance des prix est interrompue. Enfin, la hausse des créances douteuses et du nombre de faillites montre que la situation des entreprises devient de plus en plus difficile.
- $9 < in_F^*$: Aucun résultat n'est disponible. La crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

Part des profits : La conjecture 8 est vérifiée sur l'ensemble de l'intervalle $[1; 9]$: comme prévu, la part des profits augmente avec l'augmentation du niveau normal des stocks (fig. 7.2f). Comme pour la durée du cycle de production, la relation de la part des profits au niveau normal des stocks est linéaire ; cette relation semble même encore plus solide que celle qui lie la part des profits à la durée du cycle de production.

Vitesse de la monnaie : La relation qui lie la vitesse de la monnaie au niveau normal des stocks est particulièrement intéressante (fig. 7.2e). Dans la section 7.1, on a observé une relation positive entre durée du cycle de production et vitesse de la monnaie, et nous avons proposé d'expliquer cette relation par l'augmentation des revenus des ménages impliqués par l'augmentation des profits. Ici, la courbe de la vitesse de la monnaie en fonction du niveau normal des stocks prend une forme convexe avec un minimum global pour $in_F^* \approx 4$. La dynamique de la vitesse de la monnaie apparaît donc beaucoup plus complexe que nous ne l'avions pensé tout d'abord. L'effet contradictoire du niveau normal des stocks sur la vitesse de la monnaie reste à expliquer et devra faire l'objet de recherches plus poussées.

Demande et activité : La conjecture 10 d'une croissance de la demande et de l'activité avec l'augmentation du niveau normal des stocks est vérifiée sur une large

partie de l'intervalle des résultats disponibles :

- sur l'intervalle $[1; 7]$, on observe bien que la hausse du niveau normal des stocks s'accompagne d'un renforcement de la demande et de l'activité qui se manifeste par un taux de chômage plus faible (fig. 7.2d), un volume de production plus élevé (fig. 7.2c), un niveau des prix et des salaires plus élevé (fig. 7.2a et 7.2b).
- pour des niveaux normaux de stocks égaux à 8 et 9 mois de production, la tendance s'inverse : l'économie simulée connaît un net ralentissement lorsque le paramètre in_F^* approche les valeurs maximales supportées par le système.

Difficulté des entreprises et crise : La conjecture 11 — selon laquelle l'augmentation du niveau des stocks, en allongeant la durée d'immobilisation des marchandises dans les entreprises, entraîne une augmentation des difficultés des entreprises — est vérifiée dans l'ensemble (fig. 7.2g et 7.2h) même si la relation n'est pas monotone, puisqu'on observe un retournement de tendance dans l'intervalle $[4; 7]$. Lorsque le niveau normal de stocks est supérieur à 9 mois de production, les faillites des entreprises deviennent si fréquentes qu'elles entraînent la faillite de la banque et donc l'interruption prématurée des simulations.

A l'autre extrémité de l'intervalle, les entreprises rencontrent de moins en moins de difficultés lorsque le niveau normal des stocks se rapproche de 0, malgré l'affaiblissement parallèle de l'activité et des profits. Cependant, pour un objectif de stock nul, toutes les simulations échouent prématurément. Cet échec systématique peut être interprété de deux façons différentes selon le niveau considéré :

- au niveau macroéconomique : en dessous d'un certain seuil, l'affaiblissement de l'activité et des profits consécutif à l'abaissement du niveau normal des stocks entraîne brusquement une hausse des faillites telle que la banque n'est pas capable d'y faire face ;
- au niveau microéconomique : se privant complètement des stocks, les entreprises se privent de l'élément central sur lequel sont fondées leurs procédures d'adaptation homéostatique ; elles ne peuvent éviter la faillite ; elles entraînent le système dans leur chute.

Corrélations : Comme nous l'avons fait pour la durée de production, nous recherchons à présent d'éventuelles corrélations entre certaines variables dépendantes du modèle lorsque l'on fait varier le paramètre in_F^* (figure 7.2, page 200). Certains résultats sont très semblables à ceux obtenus précédemment : la courbe de Phillips est bien marquée (fig. 7.2i), nettement mieux que la courbe de Beveridge (fig. 7.2j). Aucune relation entre la vitesse de la monnaie et le niveau de l'inflation n'est perceptible (fig. 7.2j). En revanche, on trouve une nette corrélation entre le nombre de

faillite et le niveau des créances douteuses (fig. 7.2l). Enfin, la relation qui unit prix et salaires (fig. 7.2m) est très proche de celle observée lorsqu'on faisait varier la durée du cycle de production : une forte relation unit les prix aux salaires, ces derniers progressant toutefois moins vite que les premiers, et on observe un décrochage lorsque le paramètre étudié se rapproche des limites maximales supportées par le système.

Durée normale d'immobilisation du capital circulant : La conjecture générale qui était la nôtre — selon laquelle le niveau normal des stocks des entreprises joue dans le modèle un rôle très proche de la durée du cycle de production, parce que ces deux paramètres participent à la durée d'immobilisation du capital circulant — est validée. Cependant, il reste des différences de sensibilité importantes du modèle à chacun des deux paramètres. Ainsi, si l'on calcule la sensibilité locale de la part des profits à la durée du cycle de production on trouve approximativement un coefficient de 2.6, tandis que la sensibilité locale de la part des profits au niveau normal des stocks a un coefficient de 6.5. Pourquoi une telle différence ? Nous voyons deux raisons à cela :

- Tout d'abord, la durée moyenne d'immobilisation du capital circulant dans le processus de production n'est pas égale à la durée de ce processus, mais à un peu moins de la moitié de cette durée¹⁰. La sensibilité de la part des profits à la durée moyenne d'immobilisation dans le processus de production est donc environ égale à 5.3, ce qui est beaucoup plus proche de la sensibilité constatée de la part des profits au niveau normal des stocks.
- Ensuite, la durée minimale du cycle de production est une grandeur physique qui s'impose aux entreprises, tandis que le niveau normal des stocks est une grandeur psychologique, une norme qui va guider les entreprises dans l'ajustement des décisions relatives au prix et au niveau de production, et dont s'écartera nécessairement le niveau réel des stocks.

10. Un processus de production d'une durée de 6 mois réclamera la dépense consécutive de la force de travail de 6 ménages, et donc le paiement consécutif de 6 salaires. La dernière force de travail dépensée (la sixième) entraîne la fin du processus de production : l'immobilisation du salaire correspondant est donc inférieur à l'unité — mettons 0 ; l'avant dernier salaire (le cinquième) est immobilisé un mois ; le quatrième est immobilisé deux mois ; le troisième est immobilisé trois mois ; le deuxième est immobilisé quatre mois ; le premier est immobilisé cinq mois. La durée moyenne d'immobilisation est donc égale à $(0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5)/6$, soit 2.5 mois.

7.3 Durée du crédit

Les analyses de sensibilité précédentes ont montré l'une et l'autre le rôle essentiel joué par les vitesses de circulation dans la dynamique macroéconomique. Plus longue est la période pendant laquelle les entreprises doivent attendre le retour de la monnaie qu'elles ont lancée dans le processus de production, plus les profits sont élevés. Pour le modélisateur, il y a deux façons d'allonger cette durée : allonger la durée du processus de production ou augmenter le niveau normal des stocks. Cependant, malgré l'augmentation des profits, cet allongement entraîne une augmentation des difficultés des entreprises (créances douteuses et faillites) — lesquelles, au delà d'un certain niveau, conduisent à la faillite de la banque et à la crise systémique.

Nous conjecturons que les difficultés des entreprises, malgré la hausse des profits, sont liées à l'exigence de remboursement des crédits à l'échéance : plus la durée d'immobilisation du capital avancé dans le processus de production est longue, plus il est difficile aux entreprises de parvenir à rembourser la banque à temps ; à la limite, si la durée d'immobilisation dépasse la durée du crédit, le circuit ne peut être bouclé, les entreprises sont toutes en faillite, la banque de même et le système avec.

7.3.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle aux durées normale (d_B) et maximale (\hat{d}_B) du crédit bancaire.

Paramètres

On fait varier la durée normale du crédit (d_B) entre 1 et 24 mois. On fait varier simultanément et proportionnellement la durée maximale du crédit (\hat{d}_B) entre 2 et 48 mois. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés. Comme d'habitude, pour chaque valeur du paramètre on mène 10 simulations avec 10 séries différentes de nombres pseudo-aléatoires et la durée normale d'une simulation est de 50 ans.

Le tableau 7.3 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Conjecture

Tant que la durée du crédit est nettement supérieure à la durée d'immobilisation du capital circulant (durée de production + durée de stockage), nous ne voyons pas de raison pour laquelle cette durée devrait jouer un rôle sur la dynamique du système, et en particulier sur la répartition des revenus :

Paramètres étudiés	d_B	\hat{d}_B
Intervalle des valeurs étudiées	[1; 24]	[2; 48]
Valeurs de référence (scénario de base)	12	24
Pas	1	2
Nombre de simulations par valeur	10	
Nombre total de simulations	240	

TABLE 7.3 – Analyse de sensibilité à la variation de la durée normale du crédit – Paramètres

Conjecture 12 *La dynamique macroéconomique n'est pas sensible aux variations de la durée du crédit.*

Conjecture 13 *La part des profits n'est pas sensible aux variations de la durée du crédit.*

Le corollaire de la stabilité de la part des profits est la stabilité du salaire réel. On s'attend donc à une relation linéaire entre salaires et prix :

Conjecture 14 *Il existe une corrélation entre les prix et les salaires.*

En revanche, on s'attend à ce que la durée du crédit, en se rapprochant de la durée d'immobilisation du capital circulant, entraîne pour les entreprises des effets négatifs similaires à ceux de l'allongement de la durée de production ou du niveau normal des stocks :

Conjecture 15 *La réduction de la durée du crédit entraîne une augmentation des difficultés des entreprises et, en dessous d'un certain niveau, conduit à une crise systémique.*

Résultats

Les graphiques de la figure 7.3 (page 201) présentent les signatures individuelles du paramètre d_B pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Phases : On peut distinguer trois phases principales selon la valeur du paramètre d_B :

$d_B \leq 8$: Aucun résultat n'est disponible. La crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

$8 < d_B \leq 15$: La part des profits est sensible à la durée normale du crédit, elle s'élève avec la réduction de cette durée. L'activité est soutenue, les prix et les salaires sont élevés, ainsi que la vitesse de la monnaie. L'allongement de la durée du crédit se traduit par une hausse modérée des créances douteuses. Le nombre de faillites d'entreprises est très sensible à la durée du crédit : les faillites deviennent de plus en plus fréquentes au fur et à mesure que l'on raccourcit la durée du crédit.

$15 < d_B$: La part des profits est stabilisée à 30% du revenu global. L'activité est faible, le chômage élevé, les prix et les salaires nominaux sont faibles, ainsi que la vitesse de la monnaie. Cette tendance déflationniste s'accroît avec l'allongement de la durée du crédit. La part des créances douteuses à l'actif de la banque s'accroît, tandis que le nombre de faillites se maintient à un niveau très faible.

Part des profits : L'influence de la durée du crédit sur la part des profits n'est pas simple. Contrairement à nos attentes, la part des profits n'est pas totalement insensible à la durée du crédit (fig. 7.3f). En effet, on voit la part des profits passer de 35% à 31% quand la durée du crédit passe de 9 à 13 mois. En revanche, au-dessus d'une durée de crédit de 13 mois, la part des profits semble à peu près stable, ce qui est conforme à la conjecture 13. La part des profits semble donc globalement insensible à la durée du crédit, sauf à l'approche de la limite inférieure de cette durée. Nous n'avons pas d'explication à donner à ce phénomène, mais une intuition nous pousse à le rapprocher du redressement inattendu de la courbe de la part des profits observée à l'approche de la limite inférieure de la durée du cycle de production (fig. 7.1f) ; on remarque que dans les deux cas, ce mouvement inattendu de la courbe des profits accompagne une hausse brutale du nombre de faillites. Des recherches plus avancées devront être menées sur ce point.

Vitesse de la monnaie : La courbe de la vitesse de la monnaie montre une sensibilité marquée à la durée du crédit (fig. 7.3e). Si la relation n'est pas linéaire, elle reste assez simple : la courbe est convexe, strictement décroissante sur l'intervalle des résultats disponibles. Nous interprétons cette relation de la façon suivante : plus la durée du crédit est longue, moins il est facile pour les entreprises d'adapter le

niveau de leur trésorerie à leurs besoins. Les entreprises qui réduisent leur niveau d'activité ne peuvent rembourser les crédits par anticipation ; elles se retrouvent avec une trésorerie excédentaire. Cela génère une augmentation du montant de dépôts monétaires inactifs qui explique le ralentissement de la vitesse de la monnaie.

Demande et activité : Plus la durée du crédit augmente, plus les prix et les salaires nominaux sont faibles (fig. 7.3a et 7.3b). On observe une relation linéaire marquée de la production et du chômage avec la durée du crédit (fig. 7.3c et 7.3d) ; plus la durée du crédit est courte, plus l'activité est soutenue. La conjecture 12 n'est pas confirmée : au contraire, la dynamique macroéconomique paraît très sensible à la durée du crédit, sans que nous ne soyons capable de construire une explication à ce qui apparaît comme une relation forte du modèle. Compte tenu de la sensibilité marquée de tous les indicateurs de la demande et de l'activité, la part des profits paraît finalement très stable, et cette différence de sensibilité ne manque pas de nous étonner.

Difficultés des entreprises et crise : Sur un large intervalle des valeurs étudiées (pour $d_B < 20$) nous constatons que la réduction de la durée du crédit entraîne une augmentation des faillites des entreprises (fig. 7.3h) et, en dessous d'une certaine limite, des crises systémiques qui viennent interrompre prématurément les simulations.

Durée normale d'immobilisation du capital circulant : Rapprochons la durée du crédit de la durée normale d'immobilisation du capital circulant que nous définissons (on l'a vu, approximativement) comme la somme de la durée moyenne d'immobilisation dans le processus de production ($d_F^p/2$) et de la durée normale de stockage (in_F^*). Avec les valeurs des paramètres du scénario de base — et donc dans toutes les simulations de la présente analyse de sensibilité — la durée normale d'immobilisation du capital circulant ainsi définie est $6/2 + 4$ soit 7 mois. Or, nous observons que les crises interviennent pour toutes les valeurs de d_B inférieures ou égales à 8 mois.

La conjecture 15 selon laquelle il existe un niveau en dessous duquel l'abaissement de la durée du crédit s'oppose au bouclage du circuit semble confirmée, et ce niveau paraît bien lié à la durée normale d'immobilisation du capital circulant. Vérifions si cette conjecture s'applique aux résultats des analyses de sensibilité précédentes :

Dans la section 7.1, nous avons observé un échec de toutes les simulations pour une durée du cycle de production supérieure à 17 mois. Dans toutes ces simulations,

le niveau normal des stocks était fixée à 4 mois de production. Selon notre définition, la durée maximale d’immobilisation supportée par le système est alors $17/2 + 4$ soit 12.5 mois, pour une durée normale du crédit fixée à 12 mois.

Dans la section 7.2, nous avons observé un échec de toutes les simulations pour un niveau de stocks supérieur à 9 mois de production. Dans toutes ces simulations, la durée du cycle de production était fixé à 6 mois. Selon notre définition, la durée maximale d’immobilisation supportée par le système est alors $6/2 + 9$ soit 12 mois, toujours pour une durée normale du crédit fixée à 12 mois.

Il semble bien que pour que l’économie soit viable, il faut que la durée normale d’immobilisation du capital circulant soit (approximativement) inférieure ou égale à la durée normale du crédit, c’est-à-dire qu’il faut que :

$$\frac{d_F^p}{2} + in_F^* \lesssim d_B \quad (7.1)$$

Pour asseoir plus solidement cette conjecture, il faudrait conduire une étude systématique en faisant varier les trois paramètres simultanément, ce qui réclamerait un minimum de 1000 simulations, ce qui n’est pas hors de portée¹¹. Cependant, le rôle de la durée maximale du crédit — que nous avons jusqu’ici fixé dans un rapport constant à la durée normale du crédit — devrait être aussi exploré, ce qui rendrait la tâche beaucoup plus difficile.

Corrélations : Les corrélations observées entre les variables dépendantes sont marquées (fig. 7.3, page 202). La courbe de Phillips et la courbe de Beveridge sont toutes les deux bien affirmées (fig. 7.3i et 7.3j). Pour la première fois, on observe une nette corrélation entre vitesse de la monnaie et inflation (fig. 7.3k). Une nouvelle fois, la relation entre faillites et créances douteuses paraît beaucoup plus complexe que ce que l’on pouvait anticiper (fig. 7.3l). En revanche, on observe une corrélation linéaire marquée entre les salaires et les prix (fig. 7.3m) comme on pouvait l’anticiper au vu de la forte stabilité de la part des profits, ce qui vient confirmer la conjecture 14.

7.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé à explorer le modèle en nous intéressant aux paramètres qui définissent la structure temporelle du système : durée du cycle de production, niveau normal des stocks d’inventaire, durée du crédit. Ces paramètres constituent des *facteurs primaires* du modèle — c’est-à-dire des facteurs

11. Cela représente environ une trentaine d’heures de calcul avec un microordinateur puissant.

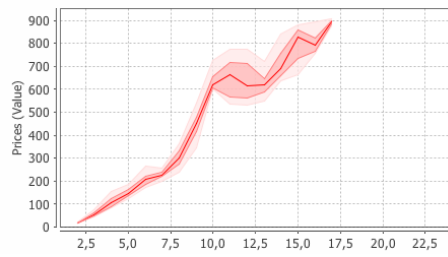
qui concernent les hypothèses importantes du modèle. Selon Amblard *et al.* (2006, p. 104), « le travail d'étude de la dynamique du modèle est principalement une recherche de ces facteurs primaires, et de la détermination de l'espace des paramètres à l'intérieur duquel ils peuvent varier tout en conservant la structure du système. »

Dans notre modèle, la durée du cycle de production et le niveau normal des stocks, en définissant la vitesse de rotation du capital circulant, jouent un rôle déterminant sur la capacité du système à se reproduire de période en période. Comme nous l'avons anticipé, plus longue est la période pendant laquelle les entreprises doivent attendre le retour de la monnaie qu'elles ont lancée dans le processus de production, plus de fois de la monnaie peut entrer dans la formation d'un revenu avant de refluer vers sa source, et plus les profits sont élevés. Ce résultat est contre-intuitif : il est clair qu'au niveau individuel, chaque entreprise a plutôt intérêt à voir la monnaie refluer le plus rapidement possible vers elle. En revanche, au niveau macroéconomique, les entreprises ont *collectivement* intérêt à ce que la vitesse moyenne de rotation du capital circulant soit la plus faible possible¹² — la vitesse du circuit *revenu-consommation* étant fixée.

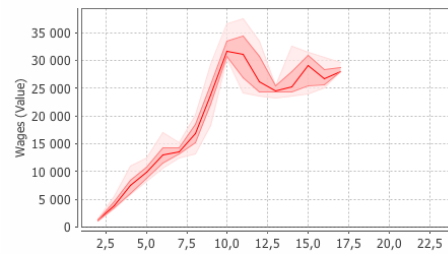
Surtout, ces premières explorations viennent valider notre démarche dans la mesure où elles démontrent l'importance de la structure monétaire sur la dynamique du système. Les différents paramètres qui définissent les vitesses de rotation des circuits réels et monétaires constituent des « paramètres de structure »¹³ du modèle ; en étudiant les réactions macroscopiques à leurs variations, nous avons mis en évidence le rôle essentiel que cette structure joue sur les propriétés du modèle — en particulier sur le niveau des profits — *indépendamment* du comportement des agents. Cela ne signifie pas pour autant que la dynamique du système est totalement déterminée par sa structure réelle et monétaire ; on peut penser que le comportement des agents joue aussi un rôle important. C'est avec l'objectif de distinguer ce qui relève de la structure de ce qui relève de l'autonomie des agents que nous allons poursuivre l'exploration des propriétés du modèle.

12. Comme dirait Kalecki, « ce qui est avantageux pour un entrepreneur isolé ne l'est pas nécessairement pour l'ensemble des entrepreneurs considérés comme une classe » (Kalecki 1971, cité par Lavoie 2004, p. 96). L'observation de tels phénomènes vient démontrer *a posteriori* la pertinence du paradigme multi-agents pour la modélisation des économies de marché décentralisées.

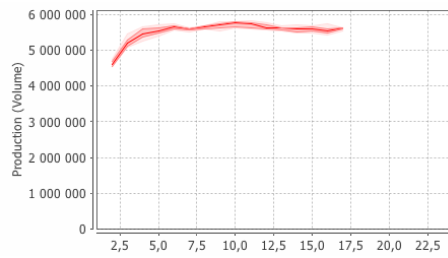
13. On a vu (chapitre 3, p. 73) que dans les modèles classiques du circuit de la monnaie, la structure dynamique du modèle est figée et impose l'égalité des vitesses de rotation des différents circuits (circuit *revenu-consommation*, circuit *force de travail-marchandise*, circuit *crédit-remboursement*). Parce que nous avons fait de ces vitesses des paramètres, nous pouvons aisément explorer différentes configurations : c'est en cela que ces vitesses sont des *paramètres de structure* (Ginot et Monod 2006, p. 62–63).



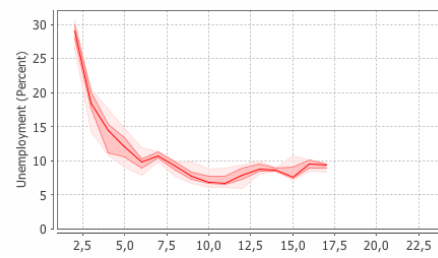
(a) Prix



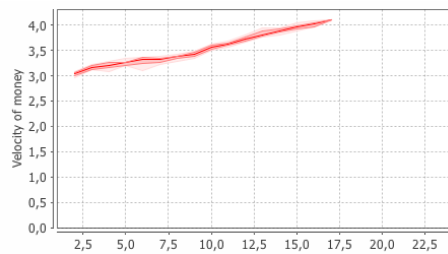
(b) Salaires



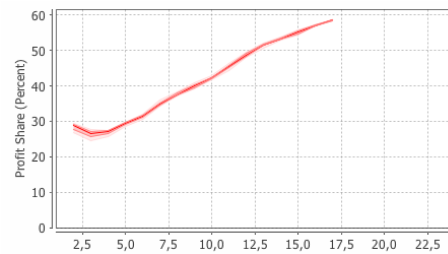
(c) Production



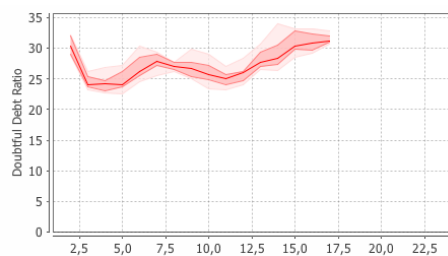
(d) Chômage



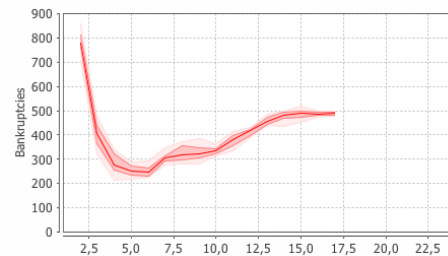
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

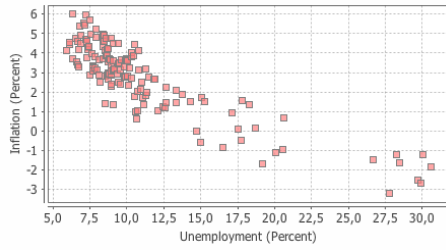


(g) Créances douteuses

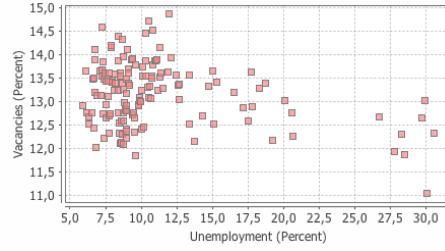


(h) Faillites

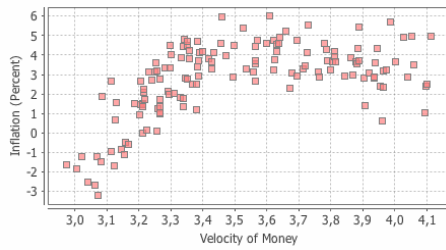
FIGURE 7.1 – Durée du processus de production – Sensibilités



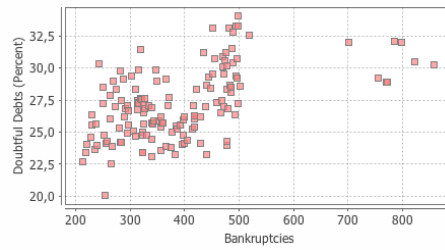
(i) Courbe de Phillips



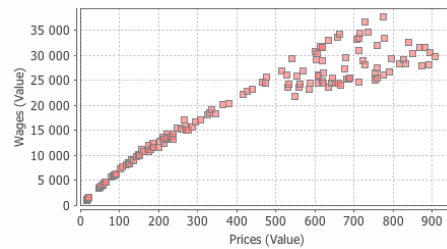
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

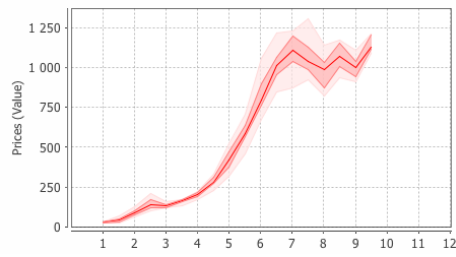


(l) Faillites et créances douteuses

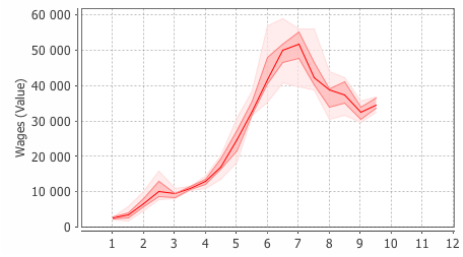


(m) Prix et salaires

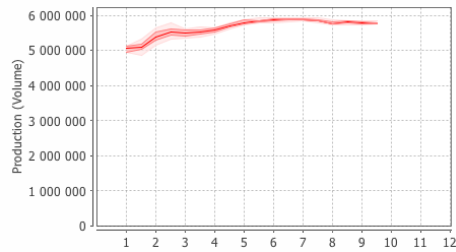
FIGURE 7.1 – Durée du processus de production – Corrélations



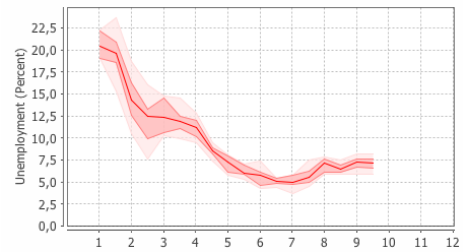
(a) Prix



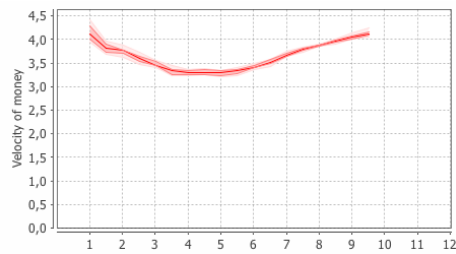
(b) Salaires



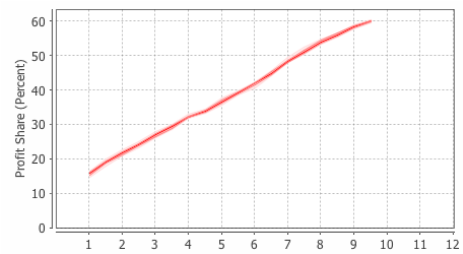
(c) Production



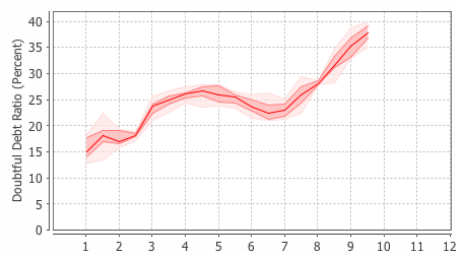
(d) Chômage



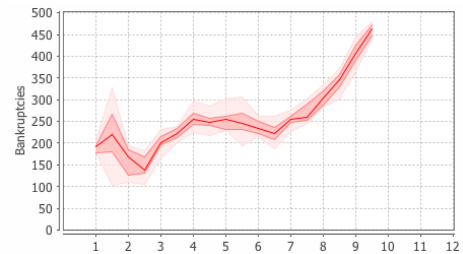
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

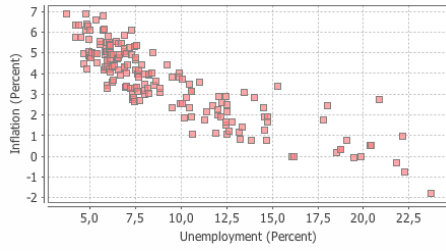


(g) Créances douteuses

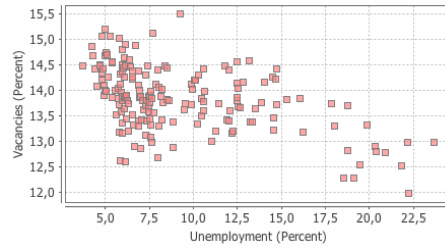


(h) Faillites

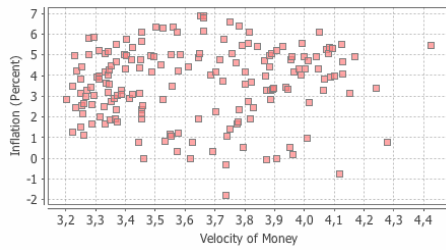
FIGURE 7.2 – Niveau normal des stocks – Sensibilités



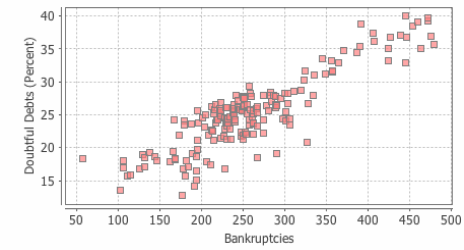
(i) Courbe de Phillips



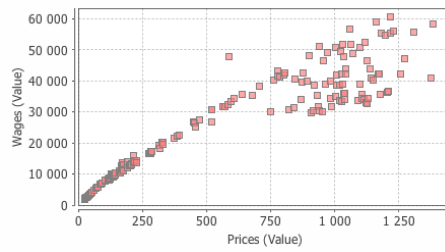
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

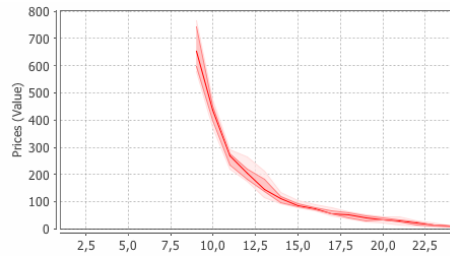


(l) Faillites et créances douteuses

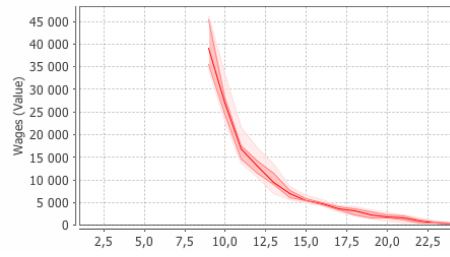


(m) Prix et salaires

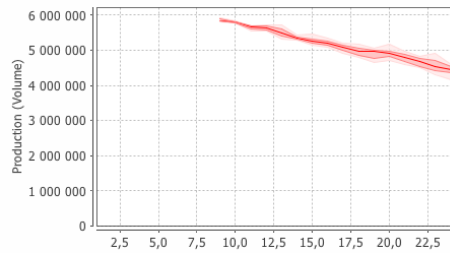
FIGURE 7.2 – Niveau normal des stocks – Corrélations



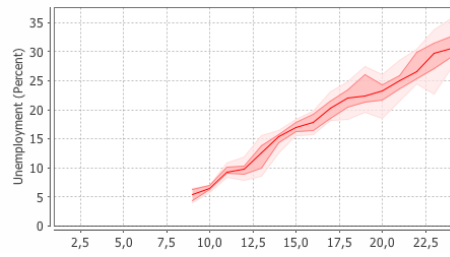
(a) Prix



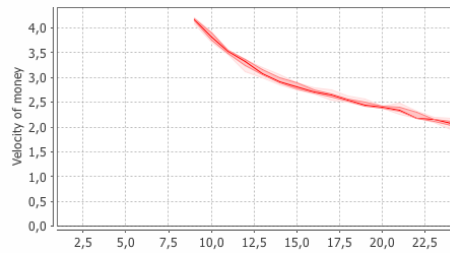
(b) Salaires



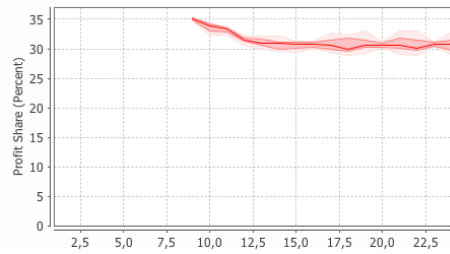
(c) Production



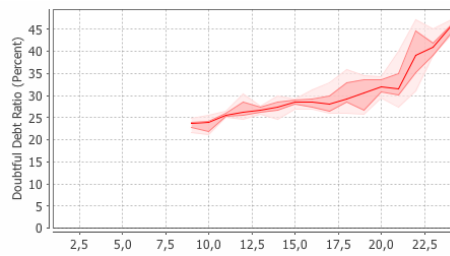
(d) Chômage



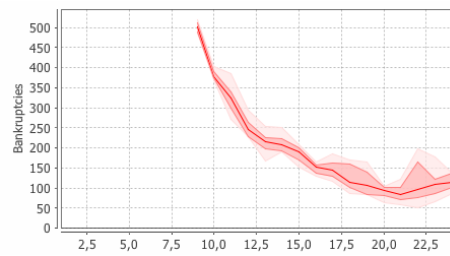
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

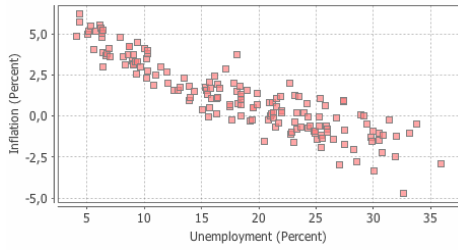


(g) Créances douteuses

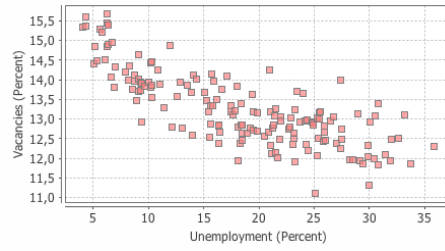


(h) Faillites

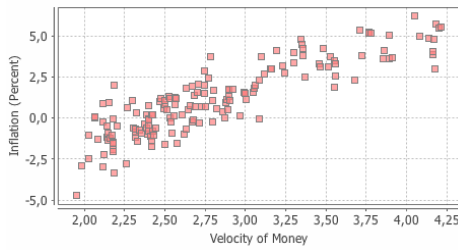
FIGURE 7.3 – Durée du crédit – Sensibilités



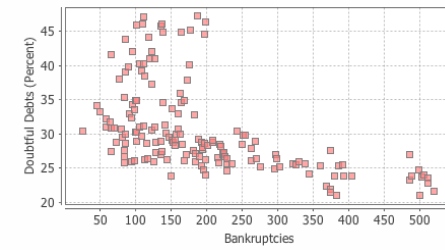
(i) Courbe de Phillips



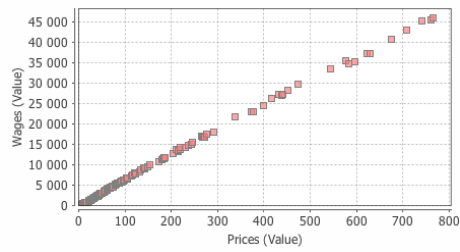
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation



(l) Faillites et créances douteuses



(m) Prix et salaires

FIGURE 7.3 – Durée du crédit – Corrélations

Chapitre 8

L'épargne

Money in its significant attributes
is, above all, a subtle device for
linking the present to the future.

Keynes (1936)

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié le rôle de différentes vitesses de circulation, réelles et monétaires, sur la dynamique macroéconomique du modèle. Nous avons montré que plus la durée d'immobilisation du capital circulant est longue, plus la part des profits est élevée dans le revenu global. Nous expliquons cette relation de la façon suivante : plus longue est la durée d'immobilisation du capital circulant, plus de fois la monnaie avancée dans le processus de production peut entrer dans la formation d'un circuit *revenu-consommation*.

Une des caractéristiques essentielles de notre modèle est que la monnaie y est créée pour la production de biens qui seront disponibles dans le futur mais qu'elle est dépensée dans la consommation de biens disponibles dans le présent. C'est en cela que dans ce modèle la monnaie est « un lien entre le présent et l'avenir »¹ (Keynes 1936 [1998], p. 297). La monnaie confère au circuit *revenu-consommation* une vitesse de rotation supérieure à celle du circuit *force de travail-marchandise*, et ce différentiel permet la formation des profits. Dans ce modèle, la monnaie n'est donc pas neutre puisque ce sont les propriétés de la monnaie qui expliquent la formation des profits.

Pour confirmer cette interprétation, nous nous proposons à présent de fixer la vitesse de rotation du circuit *force de travail-marchandise* et de faire varier celle du

1. Et c'est aussi en cela que notre modèle est le modèle d'une *économie monétaire de production*.

circuit *revenu–consommation*. Nous ne pouvons pour cela modifier la périodicité du versement des revenus aux ménages parce que cette périodicité est structurellement fixée et égale à un mois par la définition de la période de base du modèle. En revanche, nous pouvons jouer indirectement sur la vitesse à laquelle les agents dépendent leurs revenus en modifiant les paramètres qui définissent leur comportement d'épargne.

On se souvient que, dans les modèles classiques du circuit de la monnaie, toute tentative de constituer un stock d'encaisses monétaires vient interrompre le reflux de la monnaie vers le secteur des entreprises et de là vers la banque, empêchant la clôture du circuit². Or, nous savons déjà que notre modèle ne connaît pas ce genre de difficultés — du moins pour les paramètres du scénario de base. Cela ne signifie pas pour autant que le système modélisé est capable de supporter n'importe quel niveau d'épargne : on s'attend à rencontrer des niveaux d'épargne au-delà desquels le ralentissement de la circulation de la monnaie est tel que la clôture du modèle ne peut plus être assurée.

Il s'agit donc à présent d'étudier le comportement du modèle lorsque l'on fait varier les paramètres gouvernant le comportement d'épargne des agents, jusqu'à en découvrir les limites. Dans la section 8.1, nous étudierons les conséquences du comportement d'épargne de la banque. Dans la section 8.2, nous nous intéresserons au comportement d'épargne des entreprises. Dans la section 8.3, nous nous arrêterons un peu plus longuement sur le rôle du comportement d'épargne des ménages.

8.1 Fonds propres de la banque

On se souvient que dans notre modèle, le comportement d'épargne de la banque est gouverné par le paramètre (κ_B^*) qui définit son objectif de fonds propres (de capital) par rapport à l'encours des crédits accordés par la banque. Nous rappelons que le capital de la banque est égal à l'excès des crédits accordés par la banque aux agents du secteur non bancaire sur les dépôts de ces mêmes agents auprès de la banque. Le capital de la banque est alimenté par les intérêts payés par les entreprises sur les crédits qui leur ont été accordés : c'est le revenu de la banque. Les dépenses de la banque sont constituées par les dividendes distribués à ses propriétaires et par d'éventuelles pertes consécutives aux faillites d'entreprises³. Le capital de la banque, formé par la différence entre un flux de revenu et un flux de dépenses, est donc un stock d'épargne. Il est constitué par la banque pour pouvoir faire face aux pertes causées par les faillites d'entreprises.

2. Voir chapitre 3, page 77.

3. Voir la description de l'objet **Bank**, chapitre 4, page 103 et suivantes.

On se souvient encore que dans les modèles classiques du circuit, le paiement de l'intérêt en monnaie est impossible⁴. Au mieux, il est payé en nature :

« [...] the firms have only two ways of paying interest to the banks, namely acknowledging the debt while letting it increase without limit over time, or paying it in kind. » (Graziani 2003b, p. 118)

Dans le modèle de circuit de Zezza, si l'intérêt est effectivement payé en monnaie à la banque, c'est à la condition d'être immédiatement dépensé par les banquiers dans l'achat de biens de consommation⁵. En revanche, dans le scénario de base de notre modèle, la banque n'a eu aucune difficulté à constituer un stock de capital conforme à l'objectif que nous lui avons fixé : 10% de l'encours des crédits⁶. Quelle est l'influence de cet objectif d'épargne sur la dynamique macroéconomique du modèle ? C'est la question à laquelle nous allons essayer de répondre dans la présente section.

8.1.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau de l'objectif de fonds propres de la banque (κ_B^*).

Paramètres

On fait varier l'objectif de fonds propres entre 0 et 1. Comme d'habitude, tous les autres paramètres sont fixés aux valeurs du scénario de base, on exécute 10 simulations différentes avec 10 séries de nombres pseudo-aléatoires différentes pour chaque valeur du paramètre étudié, et chaque simulation est prévue pour durer 50 ans, durée au bout de laquelle les résultats sont enregistrés.

Le tableau 8.1 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Conjectures

A la limite, si le capital de la banque est nul, elle n'est pas capable de faire face à la moindre défaillance d'entreprise⁷. On s'attend donc à ce que, en dessous d'un

4. Voir la présentation du paradoxe des profits, chapitre 3, page 68.

5. Voir la discussion du modèle de Zezza, chapitre 3, page 70.

6. Voir l'analyse des résultats du scénario de base, chapitre 6, page 171, ainsi que la figure 6.1k, page 176.

7. C'est d'ailleurs la situation de la banque dans les premières périodes des simulations, et c'est cette faiblesse temporaire de la banque qui nous a contraint à la rendre parfaitement accommodante pendant cette phase de transition.

Paramètre étudié	κ_B^*
Intervalle des valeurs étudiées	[0; 1]
Valeur de référence (scénario de base)	0.10
Pas	0.05
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	210

TABLE 8.1 – Analyse de sensibilité à l’objectif de fonds propres de la banque – Paramètres

certain niveau de fonds propres, la fragilité financière de la banque débouche sur des crises systémiques venant interrompre prématurément les simulations :

Conjecture 16 *Il existe un niveau d’objectif de fonds propres en dessous duquel la banque n’est plus capable de faire face aux faillites des entreprises.*

Cependant, si l’augmentation du niveau de fonds propres de la banque vient renforcer sa stabilité, ces fonds propres constituent un « bassin de rétention » qui vient ralentir la circulation dans la sphère monétaire. On s’attend donc à un affaiblissement de la part des profits, une baisse de la demande et de l’activité, une augmentation des difficultés des entreprises :

Conjecture 17 *La part des profits décroît avec l’augmentation de l’objectif de fonds propres de la banque.*

Conjecture 18 *La demande et l’activité s’affaiblissent avec l’augmentation de l’objectif de fonds propres de la banque.*

Conjecture 19 *Les difficultés des entreprises croissent avec l’augmentation de l’objectif de fonds propres de la banque.*

A la limite, si le capital de la banque est égal à 100% de l’encours de la dette, il n’y a plus de monnaie dans l’économie. On s’attend donc à ce qu’un tel niveau ne puisse pas être atteint :

Conjecture 20 *Il existe un niveau au delà duquel l’augmentation de l’objectif de fonds propres de la banque conduit à une crise systémique.*

Résultats

Les graphiques de la figure 8.1 (page 220) présentent les signatures individuelles du paramètre κ_B^* pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Phases : Nous distinguons deux phases dans le comportement de l'économie selon la valeur du paramètre étudié :

$\kappa_B^* \leq 0.5$: Le comportement du modèle est conforme au comportement attendu.

L'absence de résultats pour $\kappa_B^* = 0$ montre qu'en l'absence de fonds propres, la banque n'est pas capable de faire face à la moindre défaillance d'entreprise. La part des profits dans le revenu global chute de 34% à 16% du revenu global quand l'objectif de fonds propres de la banque passe de 5% à 50% de l'encours de la dette (fig. 8.1f). La baisse de la demande et de l'activité accompagne celle des profits (fig. 8.1a, 8.1b, 8.1c et 8.1d) et les entreprises rencontrent des difficultés croissantes (8.1g et 8.1h). Les conjectures 16, 17, 18 et 19 sont vérifiées. On remarque que la vitesse de la monnaie n'est pas affaiblie par l'augmentation de l'objectif de fonds propres de la banque ; elle augmente même légèrement (fig. 8.1e). En fait, si on se rappelle que les fonds propres de la banque ne sont pas pris en compte dans le calcul de la masse monétaire⁸, ce résultat est beaucoup moins surprenant.

$0.5 < \kappa_B^*$: Le résultat est tout à fait inattendu, toutes les sorties du modèle sont identiques. Le modèle est devenu complètement insensible au niveau de l'objectif de fonds propres de la banque. La conjecture (20) d'une crise systémique qui surviendrait avec l'augmentation de l'objectif de fonds propres de la banque n'est pas vérifiée.

Cependant, là encore, la difficulté ne résiste pas longtemps à l'analyse. En effet, le paramètre que nous faisons varier n'est pas le niveau effectif de fonds propres de la banque, mais seulement son objectif ; l'identité des résultats pour toutes les valeurs de $\kappa_B^* > 0.5$ signifie simplement que la banque *ne parvient pas* à élever ses fonds propres au-dessus de ce niveau. Pour quelle raison ? Sans aucun doute parce qu'à ce niveau de fonds propres, les pertes consécutives aux faillites des entreprises sont telles qu'elles compensent les recettes tirées du paiement de l'intérêt. Finalement, nous n'avons donc pas tort lorsque nous conjecturons l'impossibilité d'élever les fonds propres jusqu'à 100% de l'encours de la dette.

Corrélations : Les relations qui s'établissent entre certaines des principales variables du modèle lorsqu'on fait varier κ_B^* sont assez simples (figures 8.1, page 221).

8. Voir la discussion sur la nature du capital de la banque, chapitre 4, page 105.

On retrouve une courbe de Phillips relativement marquée (fig. 8.1i) et une courbe de Beveridge beaucoup moins nette (fig. 8.1j). La relation entre vitesse de la monnaie et inflation n'apparaît pas clairement, ce qui est normal au vu de la faible sensibilité de la vitesse de la monnaie aux variations du paramètre κ_B^* (fig. 8.1k). En revanche, une corrélation positive entre nombre de faillites d'entreprises et niveau des créances douteuses apparaît très nettement, reflétant l'effet franchement négatif de la hausse de la préférence pour la liquidité de la banque sur la santé des entreprises (fig. 8.1l). Enfin, la corrélation linéaire très marquée entre salaires et prix montre que la coordination du marché du travail et du marché des biens n'est pas affectée par les variations de κ_B^* (fig. 8.1m).

8.2 Autofinancement des entreprises

Dans notre modèle, les entreprises ne cherchent pas à conserver sur leur compte un stock de monnaie inutilisée. Néanmoins elles épargnent dans le sens où une partie des revenus des entreprises n'est pas distribuée aux propriétaires mais conservée (« retained earnings ») pour former un stock de capital conforme aux objectifs de chacune. De même que pour la banque, cet objectif est proportionnel à l'actif de l'entreprise et le ratio objectif est un paramètre du modèle : le ratio objectif d'autonomie financière (κ_F^*)⁹.

Là encore, le modèle se distingue des modèles classiques du circuit de la monnaie, puisque dans ces modèles l'autofinancement de la production paraît impossible :

« [...] if we consider the initial financial requirement of the firms (namely the means of payment required for purchasing the means of production), self-financing can be ruled out, since initial finance can only come from bank debt. » (Graziani 2003b, p. 153)

Il est vrai que dans les premières périodes de la simulation de base les entreprises se trouvent effectivement incapables de financer elles-mêmes les coûts de production. Cependant, ainsi que l'a montré l'analyse des matrices de bilan sectoriels, elles parviennent très rapidement à constituer des stocks de capital¹⁰.

La présente section a pour objet d'explorer la dynamique du modèle lorsqu'on fait varier le paramètre définissant l'objectif d'autonomie financière des entreprises.

9. Voir chapitre 4, page 111, la section dans laquelle nous décrivons comment les entreprises gèrent le niveau de leurs fonds propres en décidant du montant des dividendes qu'elles versent à leur propriétaire.

10. Voir chapitre 6, page 168, l'analyse des matrices correspondant aux premières périodes du scénario de base.

8.2.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau de l'objectif d'autonomie financière des entreprises (κ_F^*).

Paramètres

On fait varier l'objectif de fonds propres entre 0 et 1. Le tableau 8.2 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Paramètre étudié	κ_F^*
Intervalle des valeurs étudiées	[0; 1]
Valeur de référence (scénario de base)	0.50
Pas	0.05
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	210

TABLE 8.2 – Analyse de sensibilité à l'objectif d'autonomie financière des entreprises – Paramètres

Conjectures

Si les entreprises, au lieu de verser à leurs actionnaires la totalité des profits de chaque période, en conservent une partie pour financer — ne serait-ce que partiellement — la constitution des stocks de biens finis et non finis, la demande sur le marché des biens sera nécessairement plus faible que dans le cas contraire. Nous pensons que le capital des entreprises — comme le capital de la banque — va jouer le rôle d'un « bassin de rétention » des flux de monnaie : plus ce bassin sera grand, plus la circulation sera ralentie dans la sphère monétaire. Par conséquent, on s'attend à retrouver avec l'augmentation de l'objectif d'indépendance financière des entreprises les mêmes effets dépressifs que pour l'objectif de fonds propres de la banque.

Conjecture 21 *La part des profits décroît avec l'augmentation de l'objectif d'autonomie financière des entreprises.*

Conjecture 22 *La demande et l'activité s'affaiblissent avec l'augmentation de l'objectif d'autonomie financière des entreprises.*

Si, au niveau macroéconomique, la demande et l'activité s'affaiblissent, alors les difficultés des entreprises doivent augmenter. Cependant, au niveau microéconomique, l'augmentation de l'autonomie financière des entreprises réduit leur dépendance vis-à-vis de la banque. Le rôle de ce paramètre sur la santé des entreprises est donc contradictoire et on attend que cette contradiction s'exprime par une dynamique complexe des créances douteuses et du nombre de faillites.

Conjecture 23 *L'augmentation de l'objectif d'autonomie financière des entreprises entraîne une dynamique complexe du taux de créances douteuses et du nombre de faillites.*

Enfin, on sait que dans notre modèle le financement de la production est le seul motif du crédit bancaire, et donc de la création monétaire — conformément au principe d'économie monétaire de production complété par celui de monnaie endogène¹¹. A la limite, si les entreprises parviennent à être complètement autonomes financièrement, elles n'ont plus recours au crédit et il n'y a plus de monnaie dans l'économie. On s'attend donc à ce qu'un tel niveau d'autonomie financière ne puisse pas être atteint.

Conjecture 24 *Il existe un niveau au-delà duquel l'augmentation de l'objectif d'autonomie financière des entreprises conduit à une crise systémique.*

Résultats

Les graphiques de la figure 8.2 (page 222) présentent les signatures individuelles du paramètre κ_F^* pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Phases : On peut distinguer trois phases selon la valeur du paramètre étudié :

$\kappa_F^* \leq 0.45$: L'économie est en situation de quasi plein emploi et la production atteint un plafond. Les prix et les salaires nominaux ainsi que la vitesse de la monnaie et la part des profits s'élèvent avec la baisse de κ_F^* . Logiquement, l'affaiblissement de leur objectif d'autonomie financière conduit les entreprises à connaître des difficultés croissantes qui se manifestent par la hausse du niveau des créances douteuses et du nombre de faillites, sans que cette hausse vienne menacer la stabilité du système.

11. Voir la présentation de ces principes, chapitre 3, page 60 et suivante.

$0.45 < \kappa_F^* \leq 0.65$: Le chômage dépasse 10 % et s'élève rapidement avec la hausse de κ_F^* . La production s'affaisse, et avec elle, les prix et les salaires nominaux. La part des profits passe en dessous de 35 %. Le niveau des créances douteuses se stabilise légèrement au-dessus de 25 %. Les faillites croissent rapidement avec la hausse de κ_F^* , jusqu'à atteindre un niveau critique pour $\kappa_F^* = 0.65$.

$0.65 < \kappa_F^*$: Aucun résultat n'est disponible. La crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

Part des profits, demande et activité : Sur l'ensemble de l'intervalle des valeurs pour lesquelles les résultats sont disponibles, les conjectures 21 et 22 sont vérifiées : l'augmentation de l'objectif d'autonomie financière des entreprises entraîne une diminution rapide de la part des profits (fig. 8.2f) et affaiblit la demande et l'activité — ce qui se manifeste par des prix et des salaires moins élevés (fig. 8.2a et 8.2b) ainsi que par un chômage plus fort et une production plus faible (fig. 8.2c et 8.2d). On remarque la réduction très régulière de la vitesse de la monnaie (fig. 8.2e).

Difficultés des entreprises, crise : Malgré cet effet dépressif sur la situation macroéconomique, l'augmentation de l'objectif d'autonomie financière des entreprises se traduit par une réduction marquée du niveau des créances douteuses (fig. 8.2g) : l'effet microéconomique l'emporte nettement sur l'effet macroéconomique et la conjecture 23 n'est pas confirmée sur ce point. Il n'en est pas de même pour le nombre des faillites (fig. 8.2h). Certes, tant que $\kappa_F^* < 0.45$, le nombre de faillites diminue avec l'augmentation de l'objectif d'autonomie financière des entreprises et avec la baisse du niveau des créances douteuses. Mais lorsque κ_F^* s'élève au-dessus de 0.45, on observe un retournement de tendance avec une hausse brutale du nombre de faillites. Ainsi, pour ce qui est du nombre de faillites, la conjecture d'un effet contradictoire de l'augmentation de l'objectif d'autonomie financière est pleinement confirmée (conjecture 23).

Enfin, au-delà d'un objectif d'autonomie financière de 0.65, la dégradation des conditions macroéconomiques entraîne une telle augmentation de la fréquence des faillites que la banque ne parvient plus à y faire face. Pour toutes les valeurs de $\kappa_F^* > 0.65$, les crises systémiques viennent interrompre les simulations avant terme, confirmant la conjecture 24.

Il est intéressant de constater la proximité de ces résultats avec ceux de Dupont et Reus (1989) dans leur tentative pionnière de construire un modèle dynamique du circuit de la monnaie¹² :

12. Voir note 13, page 76.

« Le profit perd la faculté de se reproduire lorsqu’au lieu d’acheter un produit, il s’emploie à former un revenu [...] Dans un premier temps, les revenus qui s’emploient à former des revenus détruisent le supplément de monnaie susceptible de faire naître un profit macroéconomique. Puis passé un certain seuil, ils provoquent des pertes. » (Dupont et Reus 1989, p. 104–105)

En somme, dans un modèle de circuit dynamique, les profits présents sont *essentiellement* formés de la dépense des profits antérieurs sur le marché des biens¹³.

Corrélations : On observe que les relations entre certaines des principales variables significatives du modèle sont plus nettement marquées lorsqu’on fait varier l’objectif d’autonomie financière des entreprises (figures 8.2 page 223) que lorsqu’on faisait varier l’objectif de fonds propres de la banque. Courbe de Phillips et courbe de Beveridge sont bien tracées (fig. 8.2i et 8.2j) ; on remarque une nette corrélation entre vitesse de la monnaie et inflation, au moins pour $\kappa_F^* > 0.35$ (fig. 8.2k) ; Même si la corrélation positive entre prix et salaires n’est plus tout à fait linéaire, elle reste une relation forte (fig. 8.2m). Enfin, la complexité de la relation entre le nombre de faillites et les créances douteuses témoigne des effets contradictoires de l’élévation du paramètre κ_F^* sur la santé des entreprises.

8.3 Epargne des ménages

Dans notre modèle, la propriété du capital est figée. A la naissance d’une entreprise, un ménage est désigné au hasard pour représenter le propriétaire de cette entreprise, et le restera jusqu’à la faillite de cette entreprise. De plus, dans ce modèle, il n’y a pas d’investissement au sens où le stock de capital productif est donné — on pourrait dire « tombe d’un hélicoptère ». Ces simplifications sont considérables ; elles ne sont justifiées que par l’approche d’*abstraction décroissante*¹⁴ que nous avons adoptée. Autrement dit, il est dans nos priorités d’intégrer à une prochaine version du modèle ces éléments essentiels dont nous avons dû faire abstraction jusqu’ici.

Cependant, dans le modèle tel qu’il est, le fait que la propriété et le volume du capital productif soient fixés interdit d’intégrer la sphère financière en complément des sphères réelle et monétaire déjà modélisées. Par conséquent, si les ménages veulent épargner une part de leur revenu, ils n’ont pas à se poser de question de choix de

13. Selon l’aphorisme attribué à Kalecki, alors que « les salariés dépendent ce qu’ils gagnent, les capitalistes gagnent ce qu’ils dépendent. » (Graziani 2003b, p. 104)

14. Voir Phan (2006), cité page 51.

portefeuille ; ils ne peuvent conserver leur épargne que sous forme monétaire, c'est-à-dire thésauriser¹⁵.

On sait que dans les modèles classiques du circuit de la monnaie, cette thésaurisation des ménages vient interrompre le reflux de la monnaie des ménages vers les entreprises et de là vers les banques, s'opposant ainsi à la clôture du circuit :

« La thésaurisation engendre un déficit pour les entreprises qui sont incapables de rembourser les banques à concurrence de son montant. »
(Parguez 2003, p. 134)

Rien de tel en revanche dans notre modèle — ou du moins dans le scénario de base — puisqu'on a vu que les ménages parvenaient à constituer et à maintenir une épargne monétaire sans que pour autant la capacité du modèle à se reproduire de période en période soit menacée¹⁶. En sera-t-il de même quel que soit le niveau du paramètre réglant le comportement d'épargne des ménages ? Comment va réagir la dynamique macroéconomique du modèle aux variations de ce paramètre ? Ce sont les questions auxquelles nous essaierons de répondre dans la présente section.

8.3.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau de la propension à épargner des ménages (s_H).

Paramètres

On fait varier la propension à épargner des ménages entre 0 et 0.40. Comme d'habitude, tous les autres paramètres sont fixés aux valeurs du scénario de base, on exécute 10 simulations différentes avec 10 séries de nombres pseudo-aléatoires différentes pour chaque valeur du paramètre étudié, et chaque simulation est prévue pour durer 50 ans, durée au bout de laquelle les résultats sont enregistrés.

Le tableau 8.3 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Conjectures

On a déjà bien compris, avec la banque et les entreprises, quel est le rôle de l'épargne des agents dans le modèle. Pour ce qui est de l'épargne des ménages, on ne s'attend pas à ce qu'elle donne des résultats bien différents de l'épargne des autres

15. Voir la description du comportement d'épargne des ménages, chapitre 4, page 133.

16. Voir l'évolution des dépôts des ménages dans le scénario de base, chapitre 6, figure 6.11, page 176.

Paramètre étudié	s_H
Intervalle des valeurs étudiées	[0; 0.4]
Valeur de référence (scénario de base)	0.05
Pas	0.02
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	210

TABLE 8.3 – Analyse de sensibilité à la propension à épargner des ménages – Paramètres

agents. En effet, plus l'épargne des ménages sera élevée, plus lent sera le reflux de la monnaie vers les entreprises, moins grand sera le différentiel de vitesse entre le circuit *revenu-consommation* et le circuit *force de travail-marchandises*. Or on sait que ce différentiel est essentiel, dans notre modèle, à la réalisation des profits et par là au bouclage du circuit.

Les conjectures sont donc pratiquement les mêmes que pour les deux analyses de sensibilités précédentes, sauf qu'on s'attend à ce que le niveau de la propension à épargner des ménages joue un rôle purement négatif sur la santé des entreprises peuplant le modèle.

Conjecture 25 *La part des profits décroît avec l'augmentation de la propension à épargner des ménages.*

Conjecture 26 *La demande et l'activité s'affaiblissent avec l'augmentation de la propension à épargner des ménages.*

Conjecture 27 *Les difficultés des entreprises croissent avec l'augmentation de la propension à épargner des ménages.*

Conjecture 28 *Il existe un niveau au delà duquel l'augmentation de la propension à épargner des ménages conduit à une crise systémique.*

Résultats

Les graphiques des figures 8.3 (page 224) présentent les signatures individuelles du paramètre s_H pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Phases : On peut distinguer deux phases selon la valeur du paramètre étudié :

$s_H \leq 0.28$: Les conjectures 25, 26 et 27 sont vérifiées : une propension à épargner des ménages plus élevée entraîne la baisse de la part des profits (fig. 8.3f) et un ralentissement de la demande et de l'activité qui se manifeste par la baisse de la production (fig. 8.3c), la hausse du chômage (fig. 8.3d), une pression déflationniste sur les salaires et les prix (fig. 8.3b et 8.3a), un ralentissement de la vitesse de la monnaie (fig. 8.3e), une hausse du niveau des créances douteuses (fig. 8.3g) et du nombre de faillites (fig. 8.3h).

$0.28 < s_H$: La multiplication des faillites d'entreprises conduit à la faillite de la banque et donc à une crise systémique qui vient interrompre prématurément les simulations (conjecture 28).

Corrélations : Les conséquences des variations de la propension à épargner des ménages sur la dynamique macroéconomique du modèle sont directes, et cette simplicité se reflète dans le caractère univoque des graphiques de corrélation des figures 8.3 de la page 225 : courbe de Phillips (fig. 8.3i), de Beveridge (fig. 8.3j), relation de la vitesse de la monnaie et de l'inflation (fig. 8.3k), des faillites et des créances douteuses (fig. 8.3l), des prix et des salaires (fig. 8.3m), toutes ces relations sont relativement bien marquées et ne recèlent aucune surprise.

8.3.2 Etude dynamique : choc négatif de la dépense

Puisque la propension à épargner des ménages est un paramètre dont les effets sur la dynamique système sont relativement directs, nous nous proposons à présent d'utiliser ce paramètre pour infliger au système un choc exogène en cours de simulation et d'étudier ses réactions. En effet, si les analyses de sensibilité permettent de comparer les résultats d'un grand nombre de simulations et par là de dégager certaines relations fortes entre paramètres et variables dépendantes, voire entre les variables dépendantes elles-mêmes, elles présentent l'inconvénient de masquer les enchaînements causaux susceptibles d'expliquer ces relations. En soumettant le système à un choc exogène et en observant ses réactions dans le temps historique de la simulation, nous espérons pouvoir mettre en évidence certains des mécanismes de propagation des déséquilibres à travers le système ainsi que l'existence de capacités « spontanées » d'adaptation.

Paramètres

Comme pour les analyses de sensibilité, on part du point de fonctionnement de référence du modèle, c'est-à-dire du scénario de base. On laisse le scénario se dérouler normalement pendant les 40 premières années, puis on crée un choc négatif de la dépense en augmentant brutalement la propension à épargner de tous les ménages (s_H) en janvier 2040.

Le tableau 8.4 présente les paramètres de l'étude dynamique. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés.

Paramètre étudié	s_H
Valeur avant le choc (scénario de base)	0.05
Valeur après le choc	0.15
Date du choc	janvier 2040

TABLE 8.4 – Etude dynamique – Choc négatif de la dépense – Paramètres

Conjectures

La dernière analyse de sensibilité nous a montré qu'à chaque niveau de la propension à épargner des ménages s_H était associée une part des profits dans le revenu global. Ainsi, la lecture de la figure fig. 8.3f (page 224) nous montre que pour $s_H = 0.05$, la part des profits est d'environ 32%, tandis que pour $s_H = 0.15$ la part des profits est de 20%. Lorsque l'on va brusquement modifier le paramètre s_H en janvier 2040, l'ancienne répartition des revenus ne sera plus compatible avec la nouvelle vitesse du circuit *revenu-dépense*. On s'attend donc à une brutale déstabilisation des prix et des salaires, et avec eux de toutes les variables macroéconomiques dépendantes :

Conjecture 29 *Le changement soudain de la propension à épargner des ménages déstabilise l'ancien système des valeurs et l'économie connaît une crise.*

Parce que le système a déjà fait preuve de ces capacités à trouver spontanément un *équilibre* — pris au sens d'un ensemble de valeurs compatibles entre elles et permettant la reproduction du système de période en période avec une certaine stabilité — pour une large gamme de valeurs du paramètre s_H , nous supposons que le système va réussir à atteindre un ensemble de valeurs et à surmonter la crise :

Conjecture 30 *Le système retrouve l'équilibre par la production d'une nouvelle répartition des revenus compatible avec la nouvelle propension à épargner des ménages.*

Résultats

Les graphiques des figures 8.4 (pages 226 à 228) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années de la simulation. Les 40 premières années sont strictement identiques à celles du scénario de base ; puis, en janvier 2040, intervient un choc provoqué par l'augmentation soudaine de la propension à épargner des ménages.

Le premier effet de ce choc se manifeste au niveau monétaire par une hausse des dépôts des ménages (fig. 8.4l). Simultanément, on observe sur le marché des biens une baisse de la consommation des ménages (fig. 8.4g). Cette chute de la consommation en dessous de la production se traduit par une augmentation des stocks d'inventaire des entreprises (fig. 8.4e).

L'augmentation de leurs stocks conduit les entreprises à réduire leurs prix (fig. 8.4a, 8.4o) et le niveau d'utilisation des capacités de production (fig. 8.4f) ce qui se traduit par une baisse de la production (fig. 8.4g) ainsi que par une augmentation du chômage (fig. 8.4r). L'économie simulée est en crise (conjecture 29).

A l'actif de la banque, l'augmentation de la propension à épargner des ménages entraîne tout d'abord une légère augmentation de l'encours des crédits, suivie d'un recul (fig. 8.4i). Puis, rapidement, la masse des crédits retrouve son rythme de croissance antérieur. En revanche, le passif de la banque reste durablement affecté, l'augmentation des dépôts des ménages se traduisant par une réduction équivalente, voir légèrement supérieure, des dépôts des entreprises (fig. 8.4l). L'augmentation du niveau des dépôts inactifs des ménages entraîne un ralentissement de la vitesse de la monnaie (fig. 8.4p).

Parce que la monnaie met plus de temps à refluer vers les entreprises — ou, ce qui revient au même, parce que la demande est plus faible — celles-ci ont plus de mal à rembourser la banque à l'échéance normale des crédits et les créances douteuses augmentent (fig. 8.4k). Le nombre de faillites s'élève (fig. 8.4m) affectant les résultats de la banque qui distribue moins de dividendes (fig. 8.4n).

Néanmoins, après quelques années, l'économie simulée se redresse progressivement. Le taux d'utilisation des capacités de production augmente, le chômage baisse, l'inflation redevient positive. Cependant, l'économie ne retrouve pas les niveaux d'activités antérieurs : le chômage reste élevé (entre 10 et 15%, contre 9 à 10% avant le choc). Surtout, et conformément à ce que nous attendions, l'augmentation de la propension à épargner des ménages modifie durablement la répartition des revenus entre

salaires et profits, avec une part des profits qui se stabilise aux alentours de 20%. On remarque que les nouvelles valeurs de la vitesse de la monnaie, du niveau de chômage et de la part des profits sont les mêmes que celles obtenues pour $s_H = 0.15$ lors de l'analyse de sensibilité du modèle à ce paramètre¹⁷. Bien que l'économie modélisée soit une économie de marché complètement décentralisée, bien que les agents soient des agents autonomes, concurrents, dont la rationalité et l'accès à l'information sont limités, bien que les entreprises prennent leurs décisions d'ajustement des prix et des salaires de façon complètement indépendante, cette économie réussit à surmonter la crise en produisant un nouveau système de valeurs cohérentes permettant la reproduction du système de période en période avec une certaine stabilité (conjecture 30).

8.4 Conclusion

Le modèle que nous avons construit est doté d'une structure réelle et monétaire originale qui découle directement de l'articulation dynamique de deux prémisses : *économie monétaire de production* et *économie avec monnaie endogène*. Dans le chapitre 7, nous avons montré que dans ce modèle le niveau des profits dans le revenu global est en relation directe avec la durée d'immobilisation du capital circulant, c'est-à-dire avec la durée du circuit *force de travail-marchandise*.

Dans le présent chapitre, nous avons cherché à montrer que la durée du circuit *revenu-consommation* jouait un rôle inverse sur la dynamique du modèle. Pour le montrer, nous avons fait varier les paramètres dirigeant le comportement d'épargne des différents types d'agents qui peuplent le modèle. Les résultats, relativement simples à interpréter, viennent confirmer pleinement nos conjectures. L'épargne des agents — en l'absence de sphère financière et avec un stock de capital productif donné — constitue dans le circuit dynamique de la monnaie autant de bassins de rétention qui viennent ralentir la circulation de la monnaie, affaiblir la demande, réduire le niveau relatif des profits¹⁸.

La dynamique du modèle est donc effectivement dominée par le lien inter-temporel constitué par la monnaie : créée pour la production du bien futur, la monnaie doit être dépensée dans la consommation des biens présents. En renvoyant la consommation vers l'avenir, l'épargne rapproche la dépense de la monnaie du produit futur. A la limite, si les agents entretiennent des stocks d'épargne tels que la vitesse du circuit

17. Voir les figures 8.3e, 8.3d et 8.3e page 224.

18. Le rôle dépressif des encaisses liquides des agents pouvait déjà être déduit des modèles classiques du circuit de la monnaie : « [...] the depression originates precisely from the formation of liquid holdings of savers or of firms making profits. » (Graziani 2003b, p. 159)

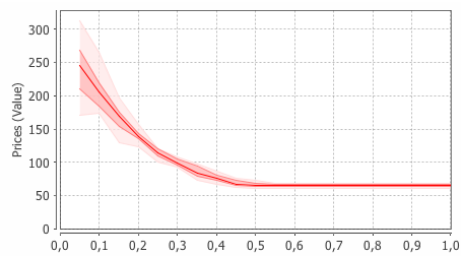
revenu-consommation tombe sous la vitesse du circuit *force de travail-marchandise*, alors le circuit n'est plus bouclé et la crise est systémique.

En dotant les agents de comportement d'épargne très simples, on a pu expérimenter leurs effets sur la dynamique du modèle par la manipulation des paramètres qui les guident. Dans un modèle plus proche du monde réel, la propension à épargner des agents devrait sans doute être une variable endogène, répondant au « motif de liquidité » et dont la valeur serait déterminée en fonction des craintes des agents vis-à-vis de l'avenir.

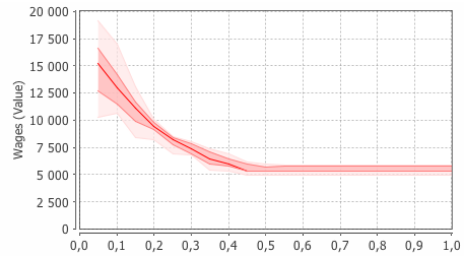
Imaginons par exemple une façon très simple d'endogénéiser le paramètre κ_B^* qui fixe l'objectif de fonds propres de la banque : au lieu d'être constant, ce paramètre reflèterait les anticipations de la banque relativement à la situation macroéconomique — laquelle pourrait être évaluée, mettons, en fonction du nombre de faillites enregistrées lors des 12 derniers mois. Si on se souvient de l'effet dépressif d'une augmentation de l'objectif du niveau de fonds propres de la banque¹⁹, on comprend facilement le caractère pro-cyclique que peut revêtir un tel comportement. Une généralisation aux autres types d'agents de l'endogénéisation des paramètres fixant le comportement d'épargne serait donc susceptible de complexifier considérablement la dynamique macroéconomique du modèle avec, notamment, l'apparition de phénomènes de cycles et/ou d'hystérèse²⁰.

19. Voir les résultats de l'analyse de sensibilité du paramètre κ_B^* , page 207.

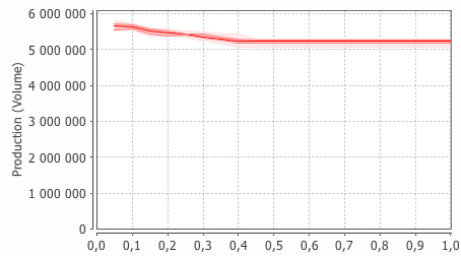
20. La mise en oeuvre de telles extensions fait évidemment partie de nos projets.



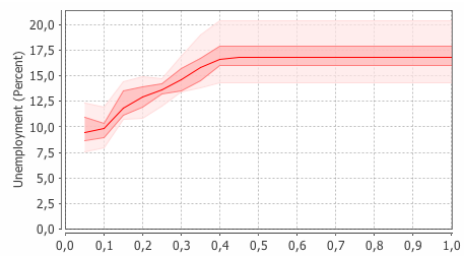
(a) Prix



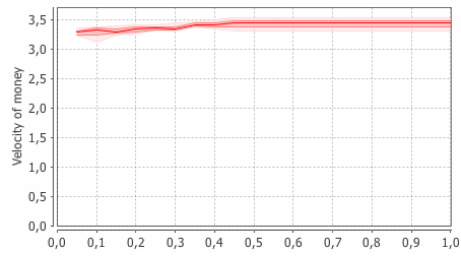
(b) Salaires



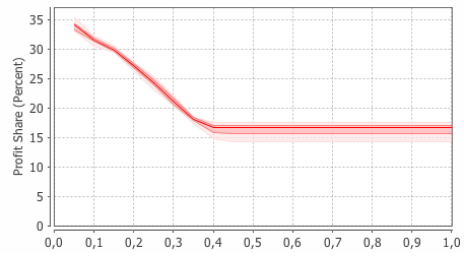
(c) Production



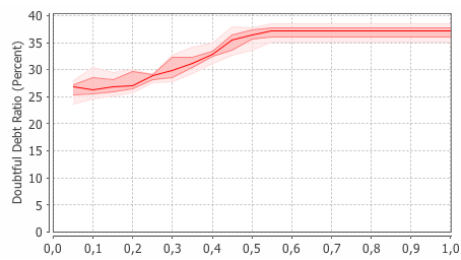
(d) Chômage



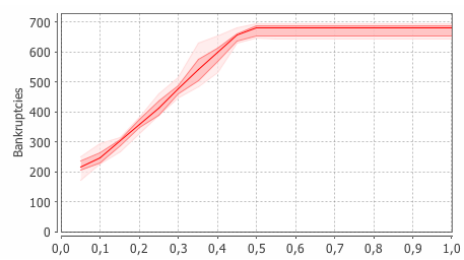
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

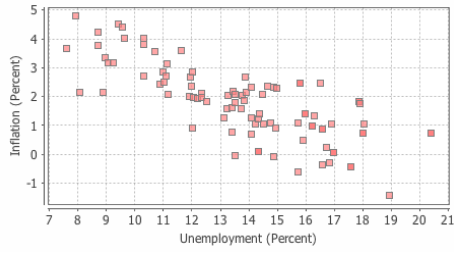


(g) Créances douteuses

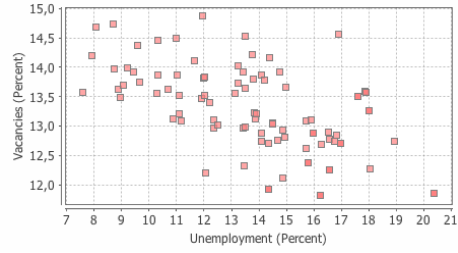


(h) Faillites

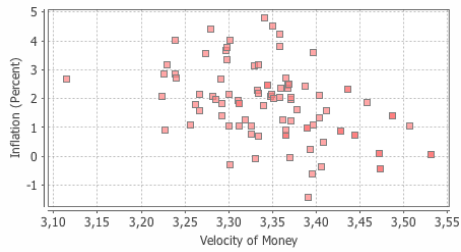
FIGURE 8.1 – Objectif de fonds propres de la banque – Sensibilités



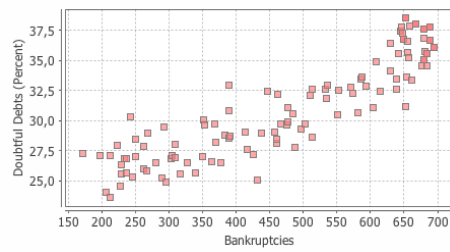
(i) Courbe de Phillips



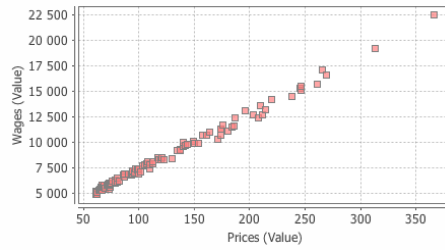
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

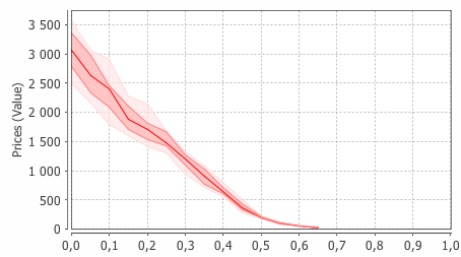


(l) Faillites et créances douteuses

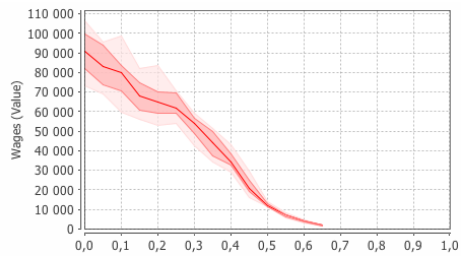


(m) Prix et salaires

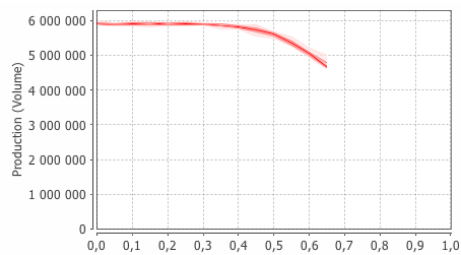
FIGURE 8.1 – Objectif de fonds propres de la banque – Corrélations



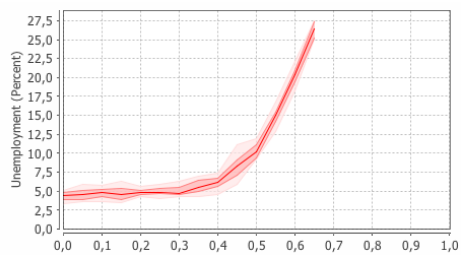
(a) Prix



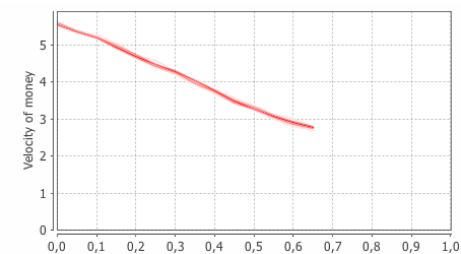
(b) Salaires



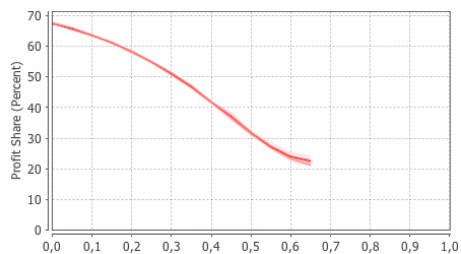
(c) Production



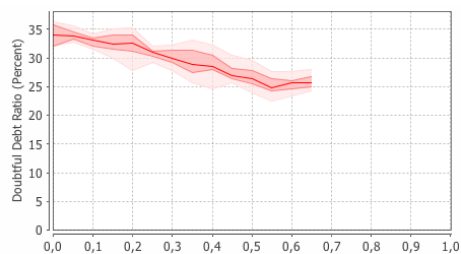
(d) Chômage



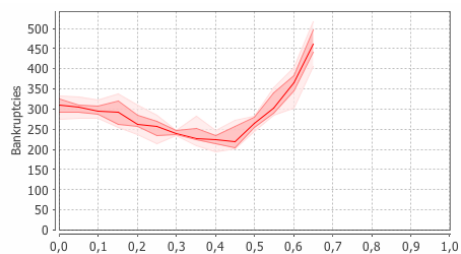
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

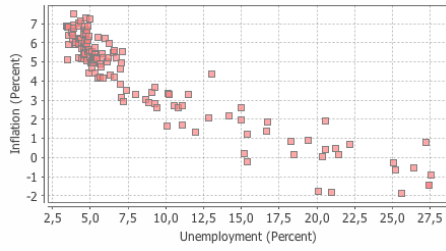


(g) Créances douteuses

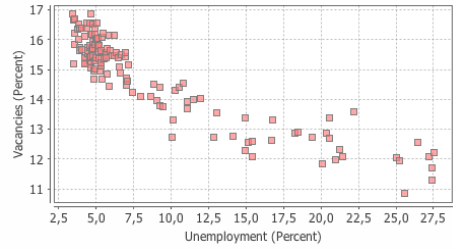


(h) Faillites

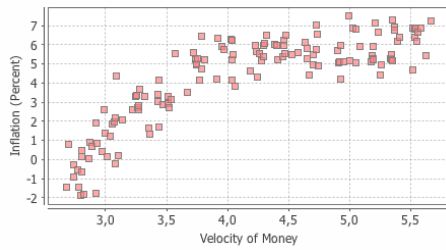
FIGURE 8.2 – Objectif d'autofinancement des entreprises – Sensibilités



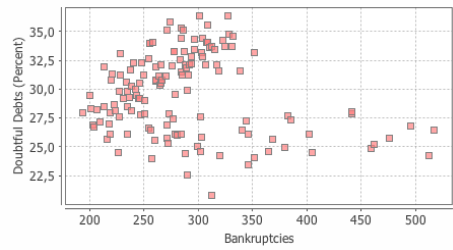
(i) Courbe de Phillips



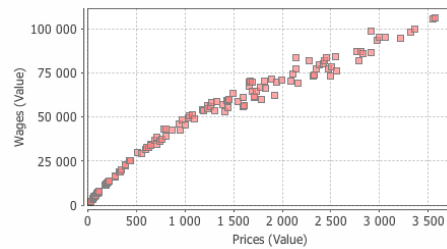
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

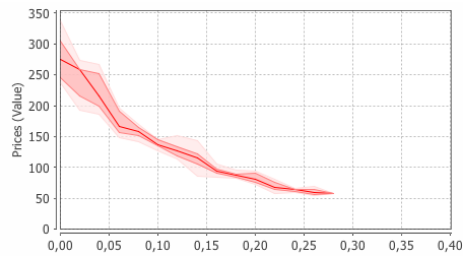


(l) Faillites et créances douteuses

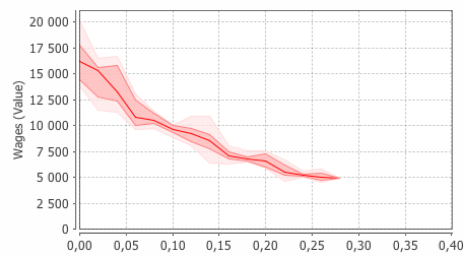


(m) Prix et salaires

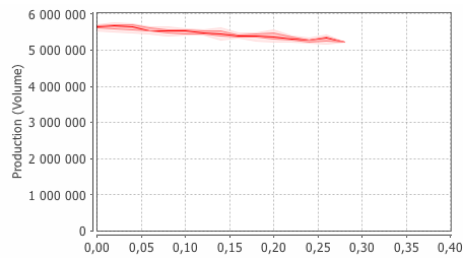
FIGURE 8.2 – Objectif d'autofinancement des entreprises – Corrélations



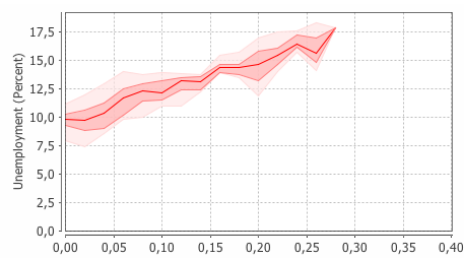
(a) Prix



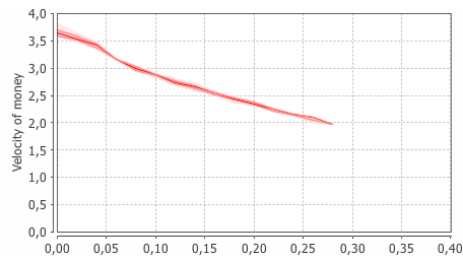
(b) Salaires



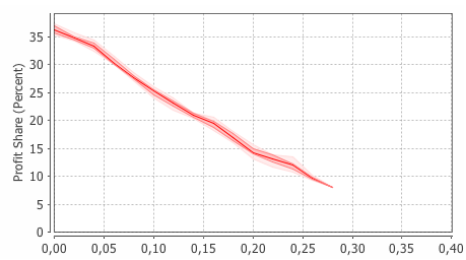
(c) Production



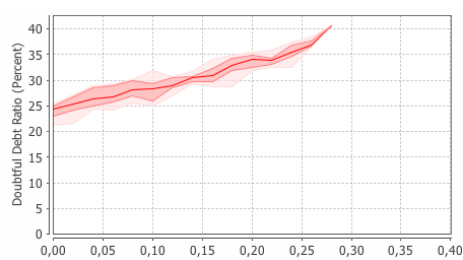
(d) Chômage



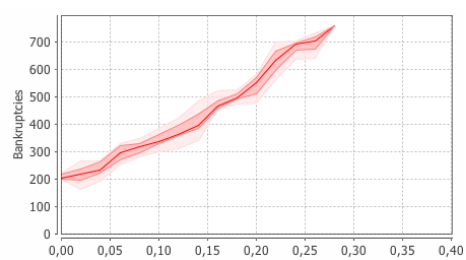
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

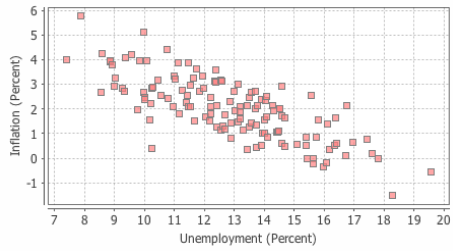


(g) Créances douteuses

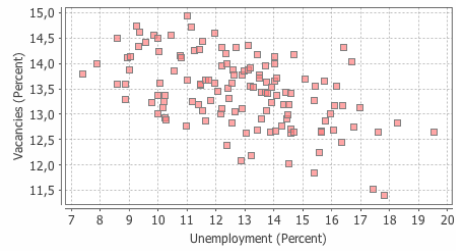


(h) Faillites

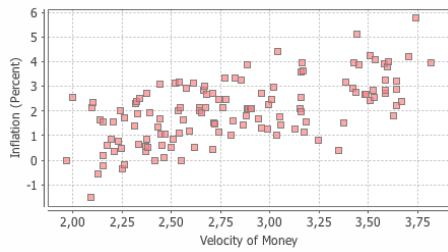
FIGURE 8.3 – Propension à épargner des ménages – Sensibilités



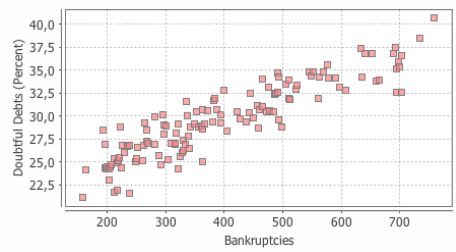
(i) Courbe de Phillips



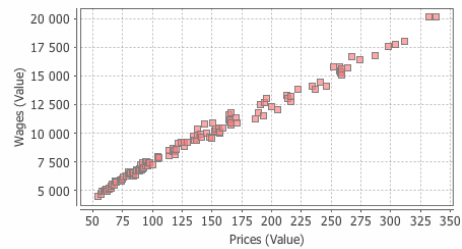
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

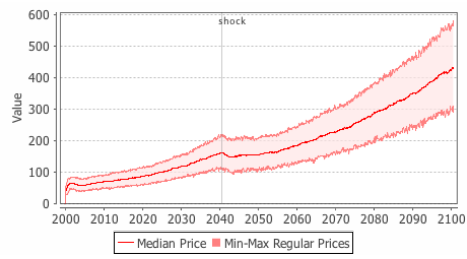


(l) Faillites et créances douteuses

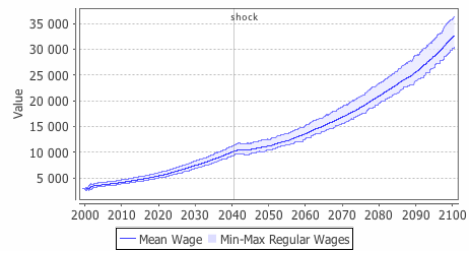


(m) Prix et salaires

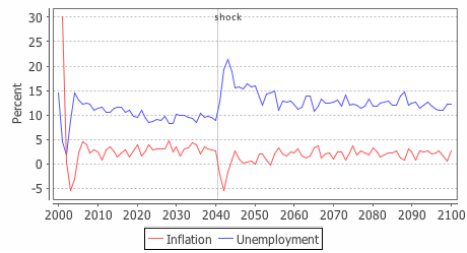
FIGURE 8.3 – Propension à épargner des ménages – Corrélations



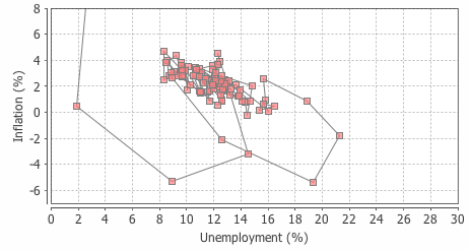
(a) Prix



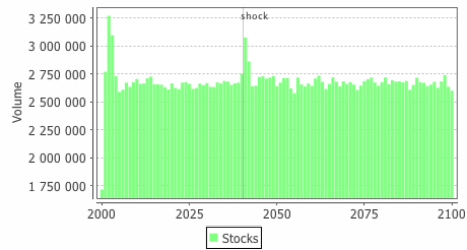
(b) Salaires



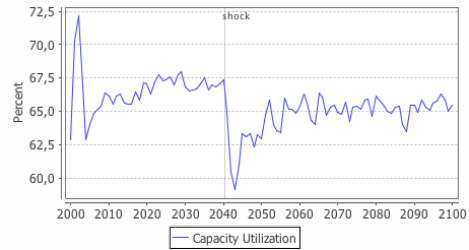
(c) Inflation et chômage



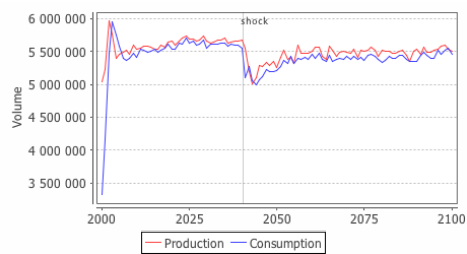
(d) Courbe de Phillips



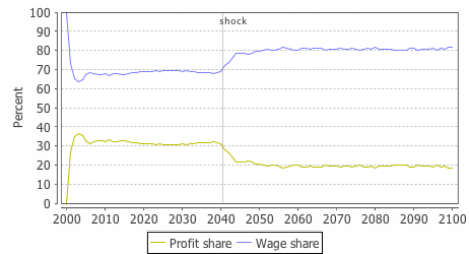
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

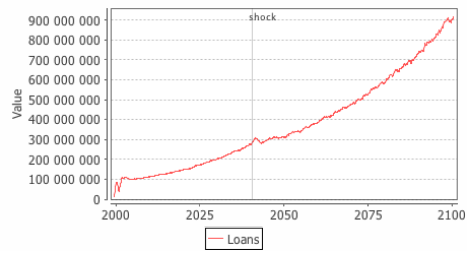


(g) Marché des biens (volume)

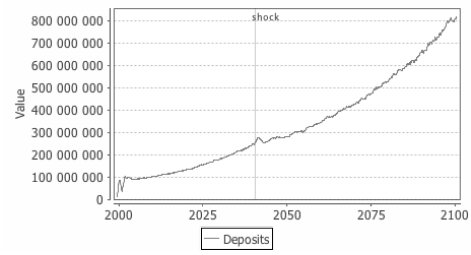


(h) Répartition des revenus

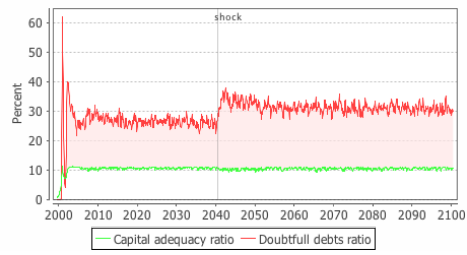
FIGURE 8.4 – Choc négatif de la dépense – Principaux indicateurs macroéconomiques



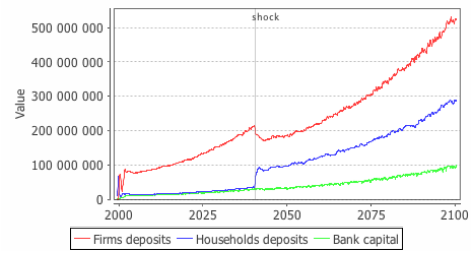
(i) Crédits



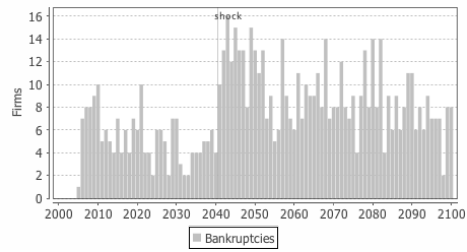
(j) Dépôts



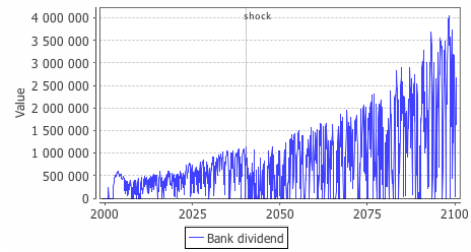
(k) Fonds propres et créances douteuses



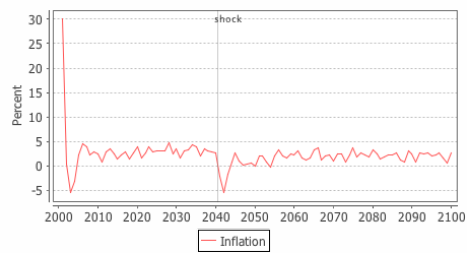
(l) Passif de la banque



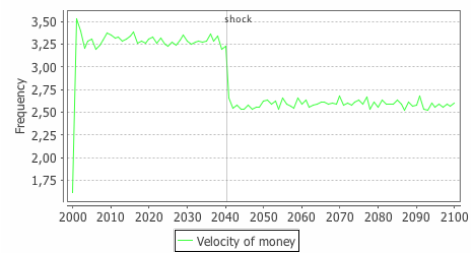
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires



(o) Inflation

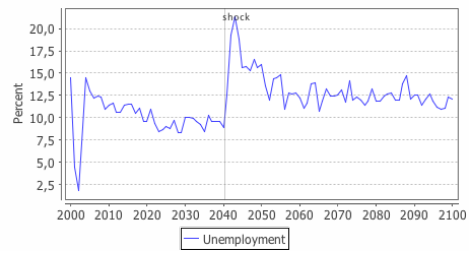


(p) Vitesse de la monnaie

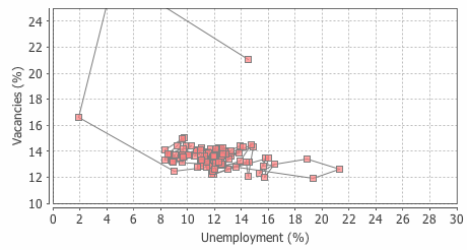
FIGURE 8.4 – Choc négatif de la dépense – Indicateurs bancaires et monétaires



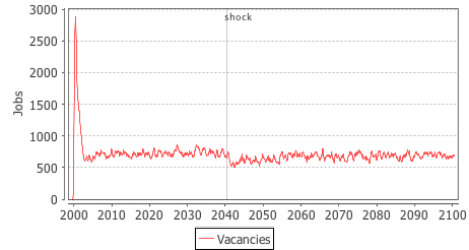
(q) Marché du travail



(r) Chômage



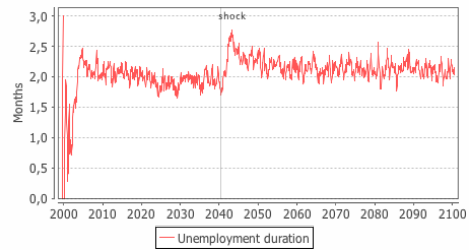
(s) Courbe de Beveridge



(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage



(v) Durée moyenne du chômage



(w) Salaire réel

FIGURE 8.4 – Choc négatif de la dépense – Indicateurs du marché du travail

Chapitre 9

La productivité

It is preferable to regard labour [...] as the sole factor of production, operating in a given environment of technique, natural resources, capital equipment and effective demand.

Keynes (1936)

Nous avons choisi de modéliser le processus de production comme un lent processus de transformation des forces de travail en marchandises. Dans cet effort de modélisation, nous avons fait abstraction de toutes les différences d'habileté, de compétence, d'énergie et de volonté qui auraient permis de distinguer les forces de travail les unes des autres. Par conséquent, toutes les forces de travail sont considérées comme également productives¹.

Cependant, les forces de travail isolées ne sont pas capables de se transformer en marchandises. Parce que la production de marchandises nouvelles réclame la dépense successive de plusieurs forces de travail, nous avons besoin d'un objet extérieur aux ménages capable d'abriter le processus d'accumulation des forces de travail jusqu'à la délivrance du produit fini : c'est cet objet que nous avons appelé *machine* et qui représente, dans notre modèle, une unité de capital productif.

Comme dans la version actuelle du modèle le capital productif est exogène, il n'y a pas de progrès technologique endogène. Nous aurions donc pu, comme nous l'avons fait pour les forces de travail, considérer toutes les machines comme également productives. Cependant, parce que le modèle dans sa version actuelle n'est

1. Voir la description de l'objet `LabourPower`, chapitre 4, page 91.

qu'une étape intermédiaire du processus de construction d'un modèle que nous voulons plus complet et plus réaliste, et parce que la prochaine étape que nous envisageons est justement l'intégration de l'investissement productif, nous avons choisi de préparer ce développement futur en encapsulant au niveau de chaque machine le taux de conversion de la force de travail en quantité de marchandises, c'est-à-dire la *productivité*².

L'hypothèse de l'exogénéité de la productivité des machines est, on le répète, une simplification considérable. Elle présente cependant l'avantage de permettre au modélisateur de manipuler librement la productivité, ce qui ne sera plus possible lorsque la productivité dépendra d'un investissement endogène. Dans le présent chapitre nous nous proposons donc de profiter de cet inachèvement pour explorer, selon la démarche expérimentale qui nous est à présent familière, le rôle de la productivité des machines sur la dynamique macroéconomique du modèle.

9.1 Niveau moyen de la productivité

Dans chaque scénario, les paramètres pr_F , π_F^F et π_F^M définissent respectivement la productivité moyenne du secteur des entreprises, l'hétérogénéité de la productivité moyenne des entreprises et l'hétérogénéité de la productivité des machines au sein de chaque entreprise. Ainsi, dans le scénario de base qui nous sert de point de fonctionnement de référence du modèle, la productivité moyenne du secteur est égale à 100 ($pr_F = 100$), la productivité moyenne de chacune des entreprises est égale à la productivité moyenne ($\pi_F^F = 0$) et au sein de chaque entreprise les machines ont des productivités hétérogènes uniformément réparties dans l'intervalle $[75; 125]$ ($\pi_F^M = 25\%$)³.

Dans la présente section, nous nous intéressons au rôle du paramètre pr_F sur la dynamique macroéconomique du modèle.

9.1.1 Etude de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau général moyen de la productivité des entreprises (pr_F).

2. Voir la description de l'objet `Machine`, chapitre 4, page 92.

3. Voir les paramètres du secteur des entreprises dans le scénario de base, chapitre 6, table 6.3, page 166.

Paramètres

On fait varier le niveau général de la productivité entre 25 et 250⁴. Comme d’habitude, tous les autres paramètres sont fixés aux valeurs du scénario de base; on exécute 10 simulations différentes avec 10 séries de nombres pseudo-aléatoires différentes pour chaque valeur du paramètre étudié; chaque simulation est prévue pour durer 50 ans, durée au bout de laquelle les résultats sont enregistrés.

Le tableau 9.1 présente les paramètres de l’analyse de sensibilité.

Paramètre étudié	pr_F
Intervalle des valeurs étudiées	[25; 250]
Valeur de référence (scénario de base)	100
Pas	25
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	100

TABLE 9.1 – Etude de sensibilité à la productivité moyenne – Paramètres

Conjectures

Dans le scénario de base, lorsqu’on définit la productivité générale moyenne comme égale à 100, on dit que chaque dépense de force de travail donnera en moyenne naissance à un volume de marchandises égal à 100. Or, nulle part dans le modèle n’est définie une grandeur de référence réelle à laquelle ce nombre 100 pourrait être comparé — en particulier, on n’a pas introduit de niveau de consommation de subsistance qui définirait en termes réels les besoins minimaux des ménages et donnerait une échelle au niveau de la productivité.

Autrement dit, on pourrait tout aussi bien poser $pr_F = 10$ ou $pr_F = 1000$ sans que la dynamique macroéconomique du modèle ne soit altérée :

Conjecture 31 *La part des profits n’est pas sensible au niveau de la productivité moyenne.*

4. C’est un intervalle encadrant la valeur de référence ($pr_F = 100$ dans le scénario de base) et suffisamment large pour que la sensibilité du système à ce paramètre soit sérieusement éprouvée.

Conjecture 32 *La vitesse de la monnaie n'est pas sensible au niveau de la productivité moyenne.*

Conjecture 33 *La demande et l'activité ne sont pas sensibles au niveau de la productivité moyenne.*

Cependant, si le niveau de l'activité reste stable, le volume total de la production doit être proportionnel à la productivité moyenne :

Conjecture 34 *Le volume de la production s'élève avec l'augmentation de la productivité moyenne.*

Enfin, si la part des profits reste stable alors que la production augmente, le salaire réel doit augmenter avec la hausse de la productivité. Comme le niveau des salaires nominaux n'a pas de raison d'être affecté par le niveau de la productivité puisque l'activité est supposée stable, on s'attend donc à ce que ce soit le prix unitaire des marchandises qui supporte l'ajustement :

Conjecture 35 *Le prix unitaire diminue avec l'augmentation de la productivité moyenne.*

Résultats

Les graphiques de la figure (9.1) (page 248) présentent les signatures individuelles du paramètre pr_F pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Les résultats sont disponibles sur l'ensemble de l'intervalle [25; 250] et plusieurs phases ne semblent pas pouvoir être distinguées. Ces résultats viennent pleinement confirmer toutes nos conjectures :

Conjecture 31 : La part des profits dans le revenu global reste comprise entre 30 et 33% (fig. 9.1f) ;

Conjecture 32 : La vitesse de la monnaie reste comprise entre 3.1 et 3.4 (fig. 9.1e) ;

Conjecture 33 : Le taux de chômage oscille autour de 10.5% (fig. 9.1d), le taux de créances douteuses autour de 26.5% (fig. 9.1g), le nombre total de faillites autour de 260 (fig. 9.1h) ;

Conjecture 34 : Le volume de la production est strictement proportionnel à la productivité (fig. 9.1c) ;

Conjecture 35 : Le prix unitaire du produit est en relation inverse avec la productivité (fig. 9.1a).

Les graphiques des figures 9.1 de la page 249 reflètent la très grande stabilité du modèle devant les variations de la productivité moyenne : comme les variables dépendantes varient peu, les corrélations ne peuvent apparaître (fig. 9.1j, 9.1k et 9.1l) ou n'apparaissent que faiblement (fig. 9.1i). Enfin, la relation très forte observée jusqu'ici entre salaires et prix disparaît, brouillée par les variations du salaire réel causées par les variations de la productivité (fig. 9.1m)⁵.

9.1.2 Etude dynamique : choc de productivité

On aura compris que lorsqu'on parle des variations de la productivité, dans l'analyse de sensibilité précédente, ces variations se situent dans un *temps logique* très éloigné du temps réel : on lance une simulation avec une productivité donnée, on enregistre les résultats, on repart à zéro, on change la productivité, on lance une nouvelle simulation avec cette productivité modifiée, *etc.* C'est un avantage des méthodes de simulation que de permettre de rejouer un très grand nombre de fois la même histoire en ne faisant varier qu'un seul paramètre pour mieux en isoler les effets. C'est ainsi que nous avons pu mettre en évidence la *neutralité* du niveau de la productivité moyenne des entreprises sur la dynamique du modèle.

Nous nous proposons à présent d'éprouver cette *neutralité* dans le *temps historique*, en simulant un choc de productivité au cours d'une simulation, puis en étudiant — comme nous l'avons fait pour le choc négatif de la dépense — la capacité du système à retrouver un équilibre.

Paramètres

Comme d'habitude, on part du scénario de base. On crée un choc de productivité exogène en augmentant brutalement la productivité de chacune des machines en janvier 2040, de façon à obtenir une variation brutale du paramètre (pr_F) .

Le tableau 9.2 présente les paramètres de l'analyse dynamique. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés ; en particulier, l'hétérogénéité de la productivité des machines au sein de chaque entreprise est maintenue, le taux d'augmentation de la productivité étant uniforme.

5. Cependant, en étudiant plus attentivement le nuage de points on s'aperçoit qu'il est formé de dix groupes formés chacun de dix points plus ou moins alignés. Chacun de ces alignements correspond à une valeur distincte de pr_F , et la pente de la droite donne le salaire réel moyen pour ce niveau de productivité. Pour que ce résultat soit plus visible, il aurait fallu faire varier la couleur des points en fonction de la valeur du paramètre étudié.

Paramètre étudié	pr_F
Valeur avant le choc	100
Valeur après le choc	130
Date du choc	janvier 2040

TABLE 9.2 – Etude dynamique – Choc de productivité – Paramètres

Conjectures

Le salaire réel est défini par le rapport des salaires et des prix ; son niveau détermine le partage du produit entre salaires et profits. Après le changement brutal du niveau général de la productivité, la persistance de l'ancien système de valeurs — et en particulier du rapport des salaires et des prix — doit déboucher sur une nouvelle répartition du revenu global beaucoup plus favorable aux profits. Cette nouvelle répartition est en contradiction avec le rapport des vitesses de circulation du circuit *revenu-dépense* et du circuit *force de travail-marchandises* qui, elles, sont restées constantes. On s'attend donc à une crise de l'économie modélisée et à une déstabilisation de l'ancien système de valeurs :

Conjecture 36 *Le changement soudain de la productivité moyenne déstabilise l'ancien système des valeurs et l'économie connaît une crise.*

Compte tenu de ses capacités d'adaptation déjà éprouvées, nous supposons que cette fois-ci encore le système réussira à surmonter la crise par la production d'un nouveau système de valeurs compatibles entre elles ainsi qu'avec la nouvelle valeur de la productivité. L'analyse de sensibilité du modèle aux variations du paramètre pr_F a montré l'insensibilité de la répartition du revenu au niveau de la productivité moyenne sur un grand nombre de simulations. Nous émettons la conjecture que l'ajustement se fera par la formation d'un nouveau rapport entre les salaires et les prix — c'est-à-dire par la formation d'un nouveau salaire réel moyen — permettant le retour à la répartition des revenus observée avant le choc — répartition qui découle du rapport inchangé des vitesses des circuits *revenu-dépense* et *force de travail-marchandises* :

Conjecture 37 *Le système retrouve l'équilibre par la production d'un nouveau rapport des salaires et des prix compatible avec la nouvelle productivité et on observe un retour à l'ancienne répartition des revenus.*

Résultats

Les graphiques des figures 9.2 (pages 250 à 252) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années de la simulation. Les 40 premières années sont strictement identiques à celles du scénario de base ; puis, en janvier 2040, intervient un choc provoqué par l'augmentation soudaine de la productivité moyenne des entreprises.

Effets immédiats : Dans les six premiers mois qui suivent le choc, alors que les nouveaux processus plus productifs ne sont pas encore achevés, la production se maintient au niveau antérieur. Cependant, comme les entreprises calculent déjà le niveau normal de leurs stocks d'inventaire sur la base de la nouvelle productivité⁶, elles constatent que le niveau effectif des stocks est insuffisant et réagissent immédiatement par une hausse des prix (fig. 9.2a) et du niveau de production (fig. 9.2f) — et donc des offres d'emplois (fig. 9.2q). Cette réaction se traduit par un brusque mouvement inverse de l'inflation (en hausse, à 9%, fig. 9.2o) et du chômage (en baisse, à 7%, fig. 9.2r) pour l'année 2040 et le point correspondant se distingue clairement sur la courbe de Phillips (fig. 9.2f).

Au niveau monétaire, la hausse du niveau d'activité se traduit pour les entreprises par des besoins de financement accrus et l'on voit s'élever brusquement le niveau des crédits (fig. 9.2i) et des dépôts (fig. 9.2j) — essentiellement du fait de la hausse de la trésorerie des entreprises (fig. 9.2l).

Contre choc : Dès la seconde moitié de l'année 2040, les nouveaux processus de production, beaucoup plus productifs que les anciens, s'achèvent, ce qui se traduit par une hausse brutale de la production en termes réels qui vient se cumuler à celle provoquée par la hausse récente du niveau de l'activité (fig. 9.2g). La consommation, limitée par le niveau des revenus monétaires des agents — et en particulier par le niveau des salaires qui n'a pas progressé (fig. 9.2b) — ne parvient pas à suivre et l'écart entre les deux se traduit par l'explosion des stocks d'inventaire des entreprises (fig. 9.2e).

L'augmentation excessive du niveau des stocks signifie que les entreprises ne parviennent plus à écouler leur production dans les délais normaux ; elles ont donc plus de difficultés à rembourser la banque au terme normal des crédits et le taux de créances douteuses s'élève dangereusement tandis que la multiplication des faillites vient creuser les fonds propres de la banque (fig. 9.2k et 9.2m), laquelle ne parvient plus à distribuer de dividendes (fig. 9.2n).

6. Voir le calcul du niveau normal des stocks d'inventaires, chapitre 4, page 117.

Correction : Devant le niveau excessif de leurs stocks, les entreprises corrigent brutalement leurs plans de production et licencient massivement. Le taux d'utilisation des capacités de production chute (fig. 9.2f), les prix baissent (fig. 9.2a), le chômage atteint jusqu'à 25% des ménages (fig. 9.2r), au point que les salaires eux-mêmes — malgré la résistance des ménages — fléchissent légèrement (fig. 9.2b). Au niveau monétaire, les entreprises réduisent leur endettement (fig. 9.2i) et la masse monétaire décroît pour la première fois depuis la fin de la phase de transition des premières années de la simulation (fig. 9.2j).

L'économie simulée connaît une crise profonde, la conjecture 36 est confirmée.

Stabilisation : Malgré la profondeur de la crise que connaît l'économie, celle-ci parvient lentement à se redresser. Peu à peu, les faillites se font moins nombreuses, les entreprises augmentent prudemment le niveau de la production (fig. 9.2f), le chômage diminue progressivement et les prix recommencent à croître (fig. 9.2c). La courbe de Phillips trace péniblement le chemin du retour de l'économie à l'équilibre (fig. 9.2d). A la fin de la simulation, 60 ans après le choc, les niveaux de chômage et d'inflation ont enfin rejoint des niveaux proches de ceux du scénario de base.

Surtout, on observe que ce retour à la normale n'est atteint que lorsque la répartition des revenus entre salaires et profits, profondément affectée par le choc de productivité, parvient enfin à retrouver les niveaux qui prévalaient avant le choc (fig. 9.2h). La conjecture 37 est pleinement confirmée.

9.2 Hétérogénéité de la productivité des machines au sein des entreprises

Parmi les paramètres fixant les niveaux de productivité dans le secteur des entreprises, le paramètre π_F^M permet de régler l'hétérogénéité des machines au sein de l'entreprise. Dans le cas du scénario de base, où la productivité moyenne est égale à 100 ($pr_F=100$) et les entreprises sont toutes également productives ($\pi_F^F=0$), le fait que le paramètre π_F^M soit égal à 25% signifie qu'au sein de chacune des entreprises, les machines ont des productivités différentes et que ces productivités sont régulièrement réparties dans l'intervalle [75; 125] (entre -25% et +25% autour de la productivité moyenne de l'entreprise).

Pourquoi avoir introduit un tel paramètre ? A l'origine, simplement pour pouvoir tester la procédure qui permet à l'usine, lorsqu'elle travaille en dessous de la pleine utilisation de ses capacités de production, de choisir les machines sur lesquelles affecter la main d'oeuvre disponible. On se souvient peut-être que la direction de l'usine

choisit prioritairement d'affecter la main d'oeuvre sur les machines contenant un processus de production inachevé. Mais lorsque deux machines abritent des processus également avancés, la direction de l'usine choisira systématiquement d'affecter la main d'oeuvre disponible à la machine la plus productive⁷. Par conséquent, plus le parc de machines de l'usine sera hétérogène, plus le rendement de l'usine sera décroissant.

Dans une version future, lorsque l'investissement productif et le progrès technologique auront été intégrés au modèle, l'hétérogénéité de la productivité des machines au sein de l'entreprise sera une variable endogène. Pour le moment, c'est un paramètre exogène que nous pouvons librement manipuler et nous en profitons pour en explorer le rôle dans la dynamique macroéconomique du modèle.

9.2.1 Etude de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau de l'hétérogénéité de la productivité des machines au sein des entreprises (π_F^M).

Paramètres

On laisse le niveau de productivité moyen (pr_F) fixé à 100, on fait varier le paramètre π_F^M entre 0 et 50% :

- pour $\pi_F^M = 0$, toutes les machines d'une même entreprise ont la même productivité égale à 100 ;
- pour $\pi_F^M = 0.25$, la productivité des machines de chaque entreprise est répartie entre 75 et 125 (cas du scénario de base) ;
- pour $\pi_F^M = 0.50$, la productivité des machines de chaque entreprise est répartie entre 50 et 150.

Comme d'habitude, tous les autres paramètres sont fixés aux valeurs du scénario de base, on exécute 10 simulations différentes avec 10 séries de nombres pseudo-aléatoires différentes pour chaque valeur du paramètre étudié, et chaque simulation est prévue pour durer 50 ans, durée au bout de laquelle les résultats sont enregistrés.

Le tableau 9.3 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Conjectures

Nous ne nous attendons à aucune influence importante de ce paramètre que nous jugeons secondaire. En particulier, puisque les modifications de ce paramètre ne sont

7. Voir la description de l'objet **Factory**, chapitre 4, page 91.

Paramètre étudié	π_F^M
Intervalle des valeurs étudiées	[0;0.5]
Valeur de référence (scénario de base)	0.25
Pas	0.02
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	260

TABLE 9.3 – Analyse de sensibilité de l’hétérogénéité de la productivité des machines – Paramètres

pas sensées affecter les différentes vitesses de circulation réelles et monétaires, la répartition du revenu doit rester inchangée.

Cependant, dans la mesure où les entreprises fonctionnent en général (du moins dans le scénario de base) à moins de 70% de leurs capacités de production, on s’attend à ce qu’une hétérogénéité de la productivité des machines croissante se traduise par un volume de production croissant, puisque les machines les moins productives seront moins souvent utilisées :

Conjecture 38 *La dynamique macroéconomique du modèle est globalement insensible au niveau d’hétérogénéité de la productivité des machines au sein des entreprises. En particulier, la répartition du revenu reste insensible aux variations du paramètre fixant cette hétérogénéité.*

Conjecture 39 *Le volume de la production augmente avec l’hétérogénéité de la productivité des machines au sein des entreprises.*

Résultats

Les graphiques des figures 9.3 (page 253) présentent les signatures individuelles du paramètre π_F^M pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Les résultats sont disponibles sur l’ensemble de l’intervalle [0;0.5] et plusieurs phases ne semblent pas pouvoir être distinguées.

La conjecture 39 d’une certaine corrélation positive du volume de la production avec l’hétérogénéité de la productivité des machines au sein des entreprises est confirmée : on observe bien une certaine croissance de la production avec l’élévation du paramètre π_F^M (fig. 9.3c).

En revanche, on ne peut pas tenir la conjecture 38 (insensibilité de la dynamique macroéconomique) pour pleinement confirmée. Certes, la stabilité générale du modèle n'est pas affectée ; les salaires et les prix comme le taux de chômage paraissent dans l'ensemble insensibles aux variations du paramètre π_F^M ; cependant, à la limite supérieure de la gamme des valeurs étudiées (pour $\pi_F^M > 0.46$), un mouvement semble s'amorcer (fig. 9.3a, 9.3b et 9.3d). De plus, sur l'ensemble de l'intervalle étudié, on observe une très légère sensibilité positive de la vitesse de monnaie et une très légère sensibilité négative de la part des profits aux variations du paramètre π_F^M (fig. 9.3e et 9.3f). Enfin, et de façon très inattendue, on observe une nette sensibilité négative des créances douteuses et surtout du nombre des faillites d'entreprises à l'hétérogénéité de la productivité des machines (fig. 9.3g et 9.3h).

La seule explication que nous ayons à proposer pour ce dernier résultat se situe au niveau microéconomique : les entreprises dont la productivité du parc des machines est hétérogène sont plus résistantes aux difficultés accidentelles puisque lorsque ces difficultés les conduisent à réduire le niveau d'utilisation des capacités de production leur rendement augmente.

9.3 Hétérogénéité de la productivité des entreprises

Jusqu'à présent, dans toutes les simulations que nous avons menées, toutes les entreprises étaient dotées d'un capital productif identique : même nombre de machines, même productivité. C'est bien sûr une simplification considérable par rapport au monde réel et lorsque l'investissement productif et le progrès technologique auront été intégrés au modèle, on s'attend à observer d'intéressantes dynamiques dans la répartition de la population des entreprises sur ces deux axes.

Nous n'en sommes pas là et pour le moment, nous nous proposons simplement de manipuler directement le paramètre fixant l'hétérogénéité de la productivité des entreprises pour en mesurer l'impact sur la dynamique macroéconomique du modèle.

9.3.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau de l'hétérogénéité de la productivité des entreprises (π_F^F).

Paramètres

On fait varier le paramètre π_F^F entre 0 et 68, le niveau de productivité moyen de l'économie restant fixé à 100 :

- pour $\pi_F^F = 0$, toutes les entreprises ont la même productivité égale à 100 (cas du scénario de base) ;
- pour $\pi_F^F = 25$, la productivité des entreprises est uniformément répartie entre 75 et 125 ;
- pour $\pi_F^F = 68$, la productivité des entreprises est uniformément répartie entre 32 et 168.

Comme d’habitude, tous les autres paramètres sont fixés aux valeurs du scénario de base ; on exécute 10 simulations différentes avec 10 séries de nombres pseudo-aléatoires différentes pour chaque valeur du paramètre étudié ; chaque simulation est prévue pour durer 50 ans, durée au bout de laquelle les résultats sont enregistrés.

Le tableau 9.4 présente les paramètres de l’analyse de sensibilité.

Paramètre étudié	π_F^F
Intervalle des valeurs étudiées	[0 ;68]
Valeur de référence (scénario de base)	0
Pas	4
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	180

TABLE 9.4 – Analyse de sensibilité de l’hétérogénéité de la productivité des entreprises – Paramètres

Conjectures

Comme pour l’hétérogénéité de la productivité des machines au sein des entreprises, l’hétérogénéité de la productivité entre les entreprises ne semble pas, *a priori*, devoir jouer un rôle important sur la dynamique du modèle. Dans la mesure où les modifications de ce paramètre ne sont pas sensées affecter les différentes vitesses de circulation, la répartition du revenu doit rester inchangée :

Conjecture 40 *La dynamique macroéconomique du modèle est globalement insensible au niveau d’hétérogénéité de la productivité entre les entreprises. En particulier, la répartition du revenu reste insensible aux variations du paramètre fixant cette hétérogénéité.*

Cependant, l'accroissement de l'hétérogénéité de la productivité des entreprises signifie que certaines entreprises vont être constamment moins rentables que d'autres. Plus π_F^F sera grand, plus les entreprises les moins productives se rapprocheront du seuil de rentabilité, voire passeront sous ce seuil. On s'attend donc à voir augmenter les difficultés des entreprises avec l'augmentation du paramètre π_F^F :

Conjecture 41 *Les difficultés des entreprises augmentent avec l'augmentation de l'hétérogénéité de leur productivité.*

Résultats

Les graphiques de la figure 9.4 (page 255) présentent les signatures individuelles du paramètre π_F^F pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Phases : On distingue trois phases dans le comportement de l'économie selon la valeur du paramètre étudié :

$\pi_F^F \leq 35$: La dynamique macroéconomique du modèle est insensible au niveau d'hétérogénéité de la productivité entre les entreprises (conjecture 40). Salaires et prix évoluent ératiquement de conserve, maintenant un rapport apparemment constant et gravitant autour de niveaux moyens stables (fig. 9.4a et 9.4b). La production (fig. 9.4c), le chômage (fig. 9.4d), la vitesse de la monnaie (fig. 9.4e), le niveau des créances douteuses (fig. 9.4g), toutes ces variables paraissent insensibles au niveau d'hétérogénéité des entreprises. Comme nous l'avions prévu (conjecture 41), le nombre de faillites (fig. 9.4h) augmente avec π_F^F .

Cependant, contrairement à nos attentes, la part des profits n'est pas complètement insensible à l'hétérogénéité de la productivité des entreprises (fig. 9.4h) : on observe une légère augmentation de la part des profits sur l'intervalle étudié.

$35 < \pi_F^F \leq 52$: Les difficultés des entreprises s'accroissent fortement avec l'augmentation de l'hétérogénéité de la productivité des entreprises, ce qui se traduit à la fois par une augmentation de la part des créances douteuses à l'actif de la banque et par une accélération du nombre des faillites d'entreprises (fig. 9.4g et 9.4h).

Mais le résultat le plus intéressant est aussi le plus inattendu : l'augmentation de l'hétérogénéité de la productivité des entreprises entraîne une hausse marquée de la part des profits (fig. 9.4h).

$52 < \pi_F^F$: Les faillites des entreprises sont si nombreuses qu'elles entraînent la faillite de la banque et l'interruption prématurée des simulations.

Part des profits : L'explication de la hausse de la part des profits au-dessus d'un certain seuil d'hétérogénéité de la productivité des entreprises exigerait des investigations plus poussées, au moyen d'un plan d'expérience spécifique. Pour le moment, nous pouvons seulement émettre la conjecture suivante :

- nous savons que l'augmentation de l'hétérogénéité de la productivité des entreprises entraîne la distinction entre des entreprises structurellement moins rentables (les moins productives) que d'autres (les plus productives) — pour le moment la somme des deux mouvements paraît être nulle ;
- mais il est vraisemblable qu'au-dessus d'un certain seuil d'hétérogénéité, les entreprises les moins rentables sont incapables d'atteindre le ratio normal d'indépendance financière alors que dans le même temps, les entreprises les plus rentables n'élèvent pas leur ratio d'indépendance financière au-dessus du ratio normal : cette dissymétrie croissante doit se traduire par une baisse du niveau moyen d'autonomie financière des entreprises ;
- or nous savons que la baisse du ratio d'autonomie financière est favorable à l'élévation de la part des profits⁸.

Cette explication se heurte cependant à une difficulté : elle revient à expliquer la hausse de la part des profits par une baisse du taux d'épargne moyen dans l'économie simulée, mais dans ce cas-là, on devrait observer une hausse de la vitesse de la monnaie, ce qui n'est pas le cas (fig. 9.4e).

9.3.2 Etude dynamique : dysfonctionnement bancaire

Nous venons de constater que la répartition du revenu était plus favorable aux profits dans une économie peuplée d'entreprises dont la productivité était fortement hétérogène que dans une économie peuplée d'entreprises dont la productivité était faiblement hétérogène. Nous avons émis la conjecture que l'explication de ce phénomène se trouvait dans la sphère monétaire, à travers une réduction du niveau d'autofinancement des entreprises — ou, autrement dit, une augmentation de leur taux d'endettement.

Nous nous proposons à présent de pousser ce scénario à l'extrême dans le cadre d'une étude dynamique⁹. Nous ne partons pas du scénario de base, mais de l'un des scénarios de l'analyse de sensibilité précédente, avec une économie peuplée d'entreprises de productivité très hétérogène. Nous laissons ce scénario se dérouler norma-

8. Voir les résultats de l'analyse de sensibilité à l'objectif d'autonomie financière des entreprises, chapitre 8, page 210.

9. La présente section reprend, avec quelques modifications, une étude déjà présentée dans Seppecher (2010a).

lement pendant les 40 premières années; puis, pour simuler un dysfonctionnement bancaire, nous modifions le comportement de la banque de telle sorte qu'elle devienne parfaitement accommodante.

Paramètres

Nous partons d'un des scénarios de l'analyse de sensibilité précédente. Dans ce scénario, la productivité des entreprises est très hétérogène ($\pi_F^F = 50$)¹⁰. En janvier 2040, nous modifions le comportement de la banque, qui devient parfaitement accommodante avec les entreprises en difficulté.

Le tableau 9.5 présente les paramètres de l'analyse dynamique. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés.

Paramètre étudié 1	π_F^F
Valeur avant le choc	50
Valeur après le choc	50
Paramètre étudié 2	Comportement de la banque
Valeur avant le choc	Non accommodante
Valeur après le choc	Accommodante
Date du choc	janvier 2040

TABLE 9.5 – Etude dynamique – Dysfonctionnement bancaire – Paramètres

Conjectures

Pendant les 40 premières années, la simulation doit donner des résultats cohérents avec les observations de la précédente analyse de sensibilité dont elle est tirée. On s'attend à ce que la présence d'entreprises trop peu productives pour être rentables se traduise par un fort taux de créances douteuses à l'actif de la banque ($\approx 35\%$) et un nombre élevé de faillites (≈ 11 par an), ainsi qu'un niveau élevé des profits

10. Contre $\pi_F^F = 0$ dans le scénario de référence. Avec $\pi_F^F = 50$, la productivité des entreprises est uniformément répartie dans l'intervalle $[50; 150]$: l'entreprise la moins productive a une productivité égale à 50 unités de marchandises par machine et par mois, la plus productive a une productivité égale à 150 unités de marchandises par machine et par mois.

($\approx 41\%$). A part ces modifications, on s'attend à un comportement relativement proche de celui du scénario de base.

En revanche, après le changement de comportement de la banque, les règles de la sphère monétaire sont profondément modifiées : les entreprises non rentables ne sont plus condamnées à la faillite, et si la contrainte d'annulation de leurs créances à l'échéance du crédit est toujours respectée, ce n'est plus par une ponction sur les fonds propres de la banque, mais grâce à une création de monnaie nouvelle correspondant aux nouveaux prêts accordés. Les entreprises défailtantes ne parvenant à rembourser les prêts anciens que grâce aux prêts nouveaux, elles se trouvent engagées dans un « schéma de Ponzi » et leur dette ne cesse de s'accroître. Cette croissance doit être perceptible au bilan de la banque à la fois par une accélération de la croissance des crédits et par une augmentation de la part des créances douteuses dans ces crédits :

Conjecture 42 *L'attitude accommodante de la banque entraîne une augmentation progressive du niveau des créances douteuses à l'actif de la banque.*

Si la conjecture 42 est vérifiée, la dette croissante des entreprises non rentables doit avoir pour contrepartie une création monétaire croissante qui va venir s'ajouter à celle normalement suscitée par l'activité économique normale. On s'attend donc à observer une accélération de la croissance des dépôts :

Conjecture 43 *L'attitude accommodante de la banque entraîne une accélération de la croissance des dépôts au passif de la banque.*

Si la conjecture 43 est vérifiée, c'est que les entreprises non rentables jettent sans cesse dans l'économie de la monnaie que leur faible productivité leur interdit de récupérer par l'écoulement de leur production. Cette monnaie va circuler indéfiniment dans l'économie et on s'attend à ce qu'elle vienne alimenter la demande sur le marché des biens, soutenir l'activité. Cette hausse de la demande et de l'activité doit être favorable aux profits :

Conjecture 44 *L'attitude accommodante de la banque entraîne une hausse de la demande et de l'activité.*

Conjecture 45 *L'attitude accommodante de la banque entraîne une hausse de la part des profits dans le revenu global.*

Résultats

Les graphiques des figures 9.5 (pages 257 à 259) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années

de la simulation. Les 40 premières années sont conformes au comportement déduit de l'analyse de sensibilité de la section précédente ; puis, en janvier 2040, on modifie le comportement de la banque.

Le choc : Le changement de comportement de la banque a pour effet direct la disparition des faillites (fig. 9.5m). Les entreprises les moins productives, qui jusque là étaient à intervalle plus ou moins régulier rejetées hors de la sphère économique par la banque, peuvent à présent s'y maintenir, malgré leur incapacité à rembourser leur dette.

On observe un gonflement des actifs bancaires qui atteignent 2.5 milliards en 2100 (fig. 9.5i), soit le double de l'encours constaté à la même date dans le scénario de base¹¹ (conjecture 43). Ce gonflement s'explique en grande partie par la croissance des créances douteuses qui atteignent, à la même date, 70 % de l'encours total (fig. 9.5k). Une analyse détaillée des comptes des entreprises¹² montre que cette mauvaise dette est essentiellement le fait d'un petit nombre d'entreprises, celles dont la trop faible productivité ne leur permet pas de rembourser normalement leurs dettes (conjecture 42).

Une bulle du crédit : L'accumulation des créances douteuses à l'actif de la banque forme une bulle d'une telle ampleur que le système bancaire ne saurait supporter son apurement sur ses seuls fonds propres. Cette bulle se traduit simultanément par une création monétaire indue, dont l'effet sur l'économie réelle n'est pas neutre. En alimentant la demande de biens, elle soutient l'activité économique qui atteint des niveaux exceptionnels (fig. 9.5g). Pour faire face à la demande, les entreprises augmentent leur niveau de production sans parvenir à maintenir le niveau des stocks (fig. 9.5f et 9.5e). Le nombre de chômeurs diminue et le nombre d'emplois vacants s'élève (fig. 9.5q, 9.5t et 9.5s). La conjecture 44 est confirmée.

La surchauffe : Les prix et les salaires augmentent à un rythme élevé (fig. 9.5c et 9.5d) ; cependant, l'affaissement du salaire réel (fig. 9.5w) montre que l'augmentation des prix est plus rapide que celle des salaires. Le mouvement inverse du taux de chômage et du taux d'inflation (fig. 9.5c) dessine une courbe de Phillips bien marquée, illustrant le cheminement de l'économie vers la surchauffe (fig. 9.5d). L'effondrement des salaires réels et l'augmentation du taux de marge des entreprises se

11. Voir la figure 6.1i, chapitre 6, page 176.

12. On se souvient que c'est un des atouts des modèles multi-agents que de permettre de suivre pas à pas l'état de chacun des agents, chaque fois que le besoin s'en fait sentir.

traduisent par l'explosion de la part des profits dans le revenu global (fig. 9.5h). La conjecture 45 est confirmée.

Et la crise ? Ce scénario permet de mettre en évidence le rôle essentiel joué par le système bancaire dans la stabilité économique et sociale d'une économie monétaire. Cependant, on s'étonne de voir la bulle des créances douteuses enfler ainsi sans limites et on se demande alors quels sont les mécanismes, présents dans le monde réel mais absents de notre modèle, susceptibles d'empêcher — ou du moins d'interrompre — le développement d'un tel schéma de Ponzi à l'échelle d'une économie entière.

Pour nous, sans aucun doute, l'utilisation d'un agent représentatif du secteur bancaire vient expliquer la possibilité d'un scénario aussi extrême. Si au contraire le secteur bancaire était représenté par plusieurs agents bancaires, autonomes et concurrents, en interaction par l'intermédiaire d'un marché monétaire, le dysfonctionnement d'un des agents bancaires serait sanctionné par sa faillite entraînant, selon les circonstances, soit un retour à l'ordre antérieur, soit une crise bancaire généralisée.

Bien sûr, il ne s'agit là que d'une conjecture nouvelle qui demande à être vérifiée par la simulation. Le relâchement de l'hypothèse simplificatrice d'un agent représentatif du secteur bancaire fait donc partie de nos projets.

9.4 Conclusion

Nos premières explorations ont montré que, pour chaque combinaison des vitesses du circuit *revenu-consommation* et du circuit *force de travail-marchandise*, il existait une répartition du revenu global entre salaires et profits vers laquelle tendait l'économie considérée et qui permettait sa stabilisation¹³. Le niveau moyen de la productivité, parce qu'il ne joue aucun rôle dans la vitesse des deux circuits, ne doit pas avoir d'effet sur la dynamique de long terme du modèle et c'est ce que nous avons vérifié par une première série de simulations.

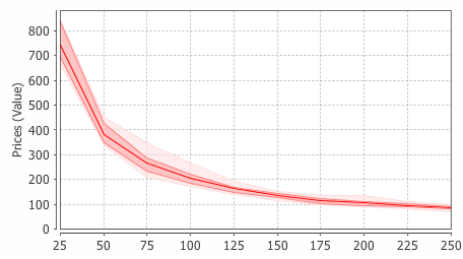
En revanche, nous avons ensuite observé qu'une brusque variation de la productivité moyenne peut entraîner une déstabilisation de l'économie modélisée. L'ancien rapport des salaires et des prix, combiné avec la nouvelle productivité, entraîne un déséquilibre : les entreprises produisent beaucoup plus pour des coûts de production inchangés, la répartition du revenu global est déstabilisée en faveur des profits ; cependant, compte tenu de la faiblesse des salaires relativement au produit global, la

13. Chapitre 7 (page 178 et suivantes) et chapitre 8 (page 203 et suivantes).

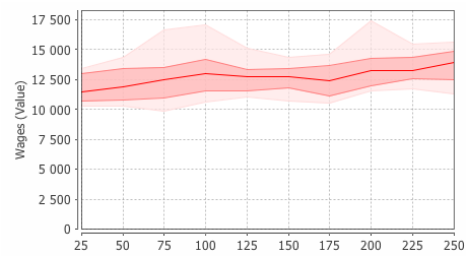
demande ne suit pas et l'économie entre en crise. C'est par l'émergence d'un nouveau rapport des salaires et des prix permettant le rétablissement de la répartition du revenu à son niveau d'avant la crise que l'économie parvient finalement à retrouver la stabilité. Le rapport des vitesses des circuits *revenu–consommation* et *force de travail–marchandise* semble donc définir une sorte de *répartition du revenu d'équilibre* vers laquelle l'économie tend spontanément à long terme, malgré les perturbations de court terme.

Les expériences suivantes, qui portent sur l'hétérogénéité de la productivité au sein des entreprises et entre les entreprises, ne remettent pas en cause ces résultats mais viennent les complexifier. Au sein des entreprises, l'hétérogénéité de la productivité des machines joue un rôle stabilisateur. Entre les entreprises, au-dessus d'un certain seuil d'hétérogénéité de la productivité, la présence d'entreprises peu productives modifie les conditions moyennes d'autofinancement du secteur, l'accroissement des difficultés de quelques unes se révélant profitable à l'ensemble.

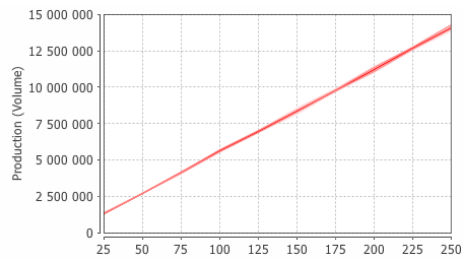
Cependant, tant que le système bancaire reste vigilant, contrôlant la rentabilité des entreprises, sanctionnant les moins rentables et limitant la croissance des créances douteuses, le lien entre monnaie et production est maintenu et l'équilibre macroéconomique du modèle est préservé. En revanche, si la banque ne mesure pas les risques encourus et accorde sans cesse de nouveaux crédits qui ne pourront être remboursés, alors les règles de fonctionnement de la sphère monétaire sont profondément altérées. La destruction monétaire n'est plus assurée qu'au prix d'une création monétaire sans cesse croissante. Cette monnaie nouvelle n'a pas de contrepartie dans la sphère réelle et se traduit par la formation d'une bulle de créances douteuses. Le risque croissant supporté par le système bancaire, au-delà de ce que ses fonds propres lui permettent, traduit une disjonction croissante des sphères réelle et monétaire. La monnaie indûment créée alimente l'inflation des profits, lesquels soutiennent la demande et l'activité, donnant l'illusion d'une économie en bonne santé. En réalité, loin de refléter une plus grande efficacité du système, cette hausse des profits constitue avec la baisse du salaire réel la manifestation la plus sensible d'un dérèglement profond.



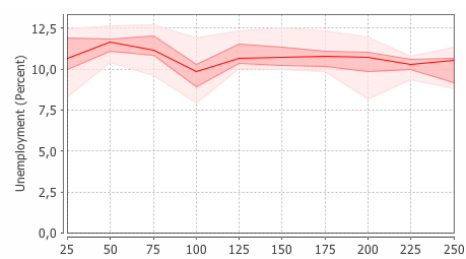
(a) Prix



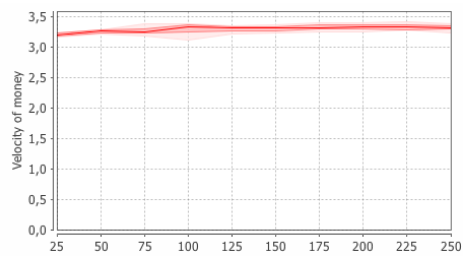
(b) Salaires



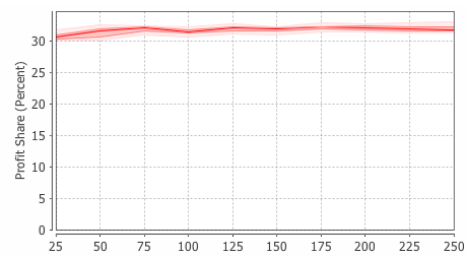
(c) Production



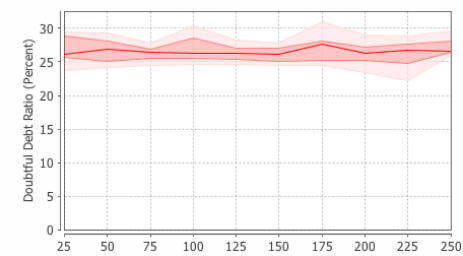
(d) Chômage



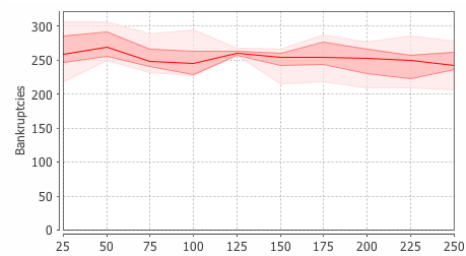
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

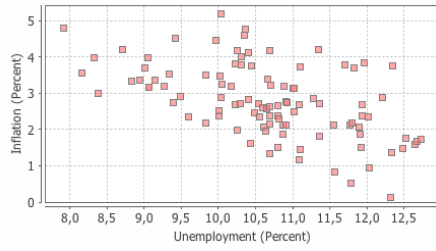


(g) Créances douteuses

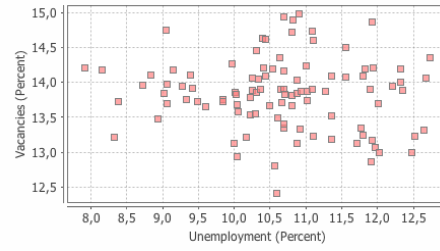


(h) Faillites

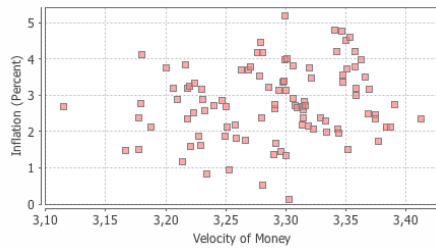
FIGURE 9.1 – Niveau de la productivité moyenne – Sensibilités



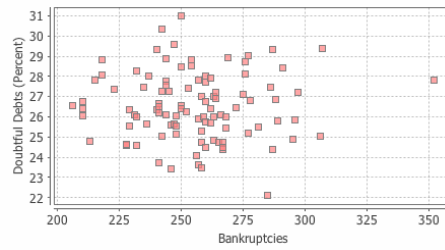
(i) Courbe de Phillips



(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

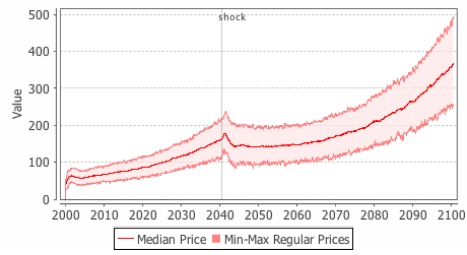


(l) Faillites et créances douteuses

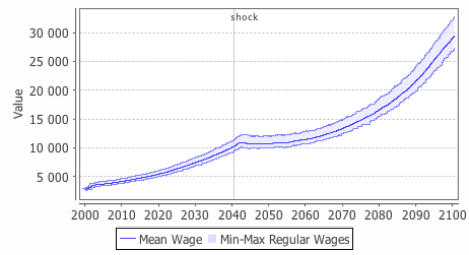


(m) Prix et salaires

FIGURE 9.1 – Niveau de la productivité moyenne – Corrélations



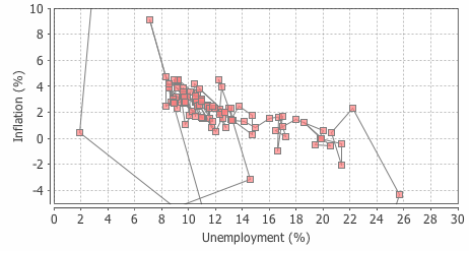
(a) Prix



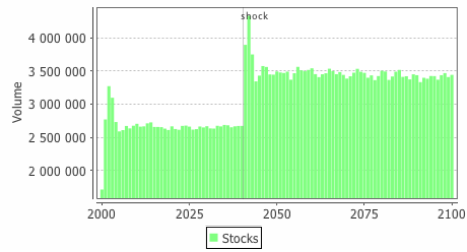
(b) Salaires



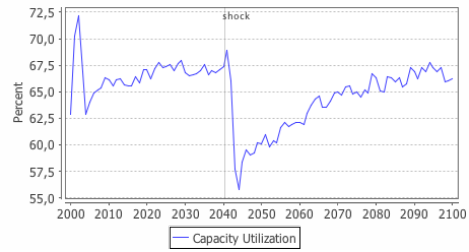
(c) Inflation et chômage



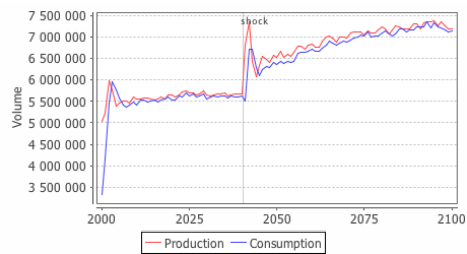
(d) Courbe de Phillips



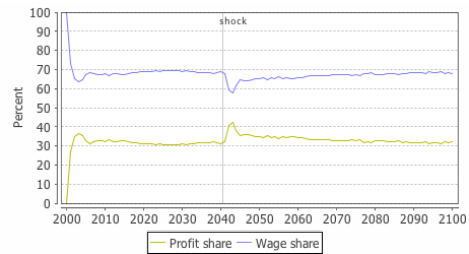
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

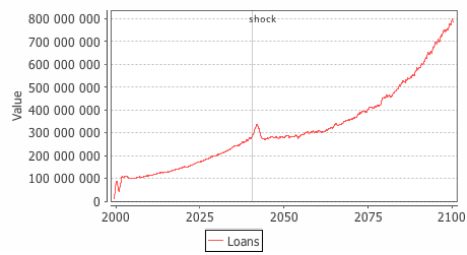


(g) Marché des biens (volume)

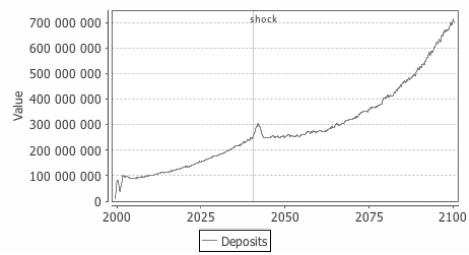


(h) Répartition des revenus

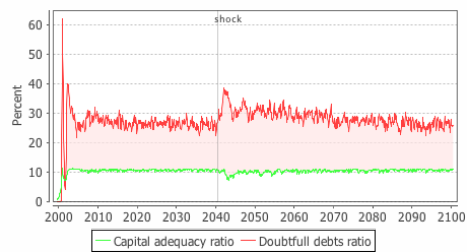
FIGURE 9.2 – Choc de productivité – Principaux indicateurs macroéconomiques



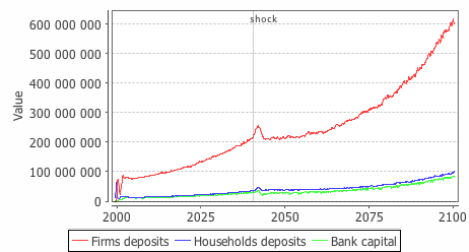
(i) Crédits



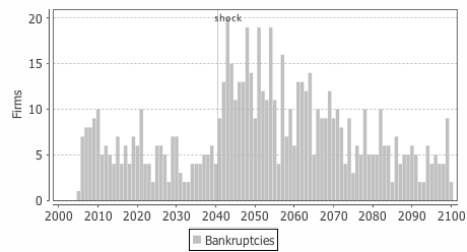
(j) Dépôts



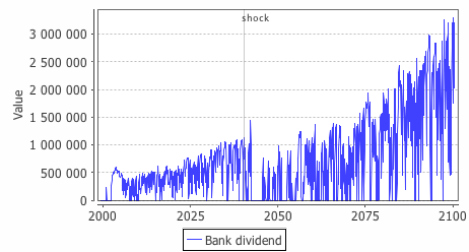
(k) Fonds propres et créances douteuses



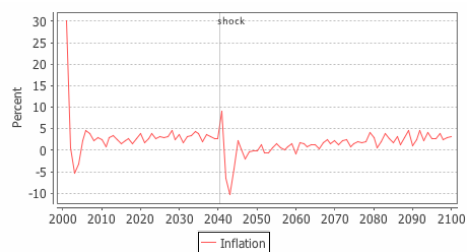
(l) Passif de la banque



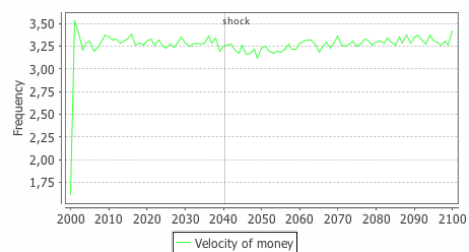
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires



(o) Inflation

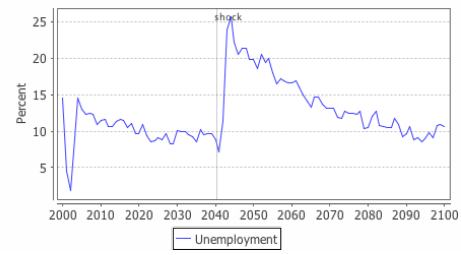


(p) Vitesse de la monnaie

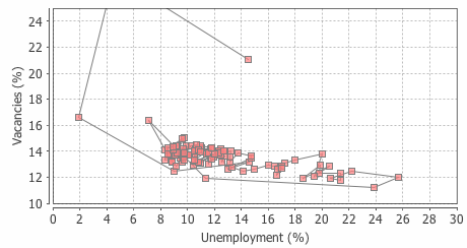
FIGURE 9.2 – Choc de productivité – Indicateurs bancaires et monétaires



(q) Marché du travail



(r) Chômage



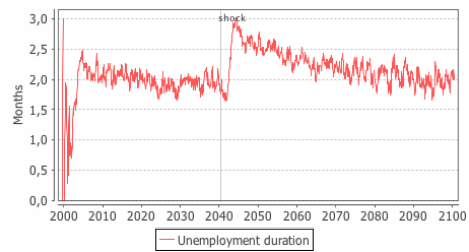
(s) Courbe de Beveridge



(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage

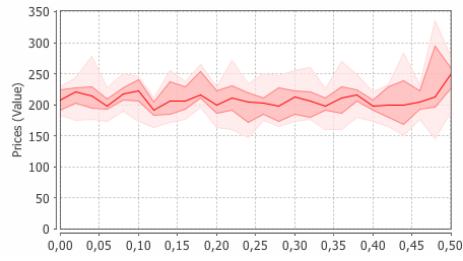


(v) Durée moyenne du chômage

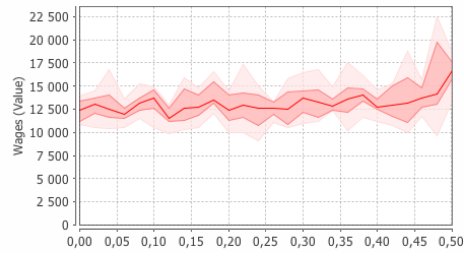


(w) Salaire réel

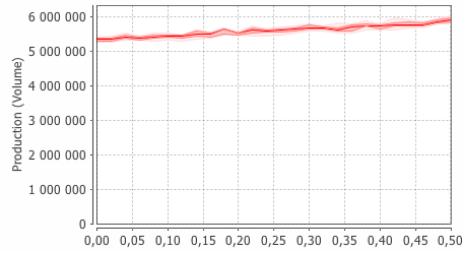
FIGURE 9.2 – Choc de productivité – Indicateurs du marché du travail



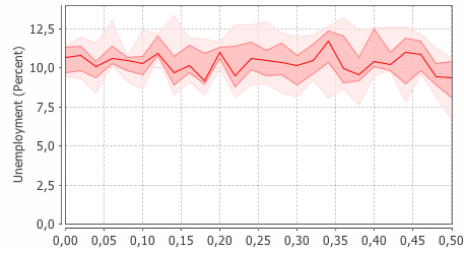
(a) Prix



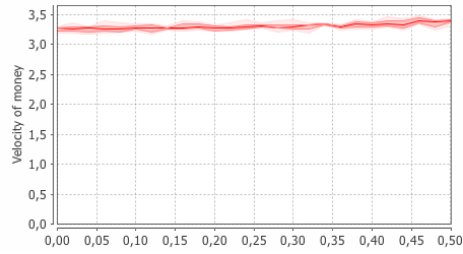
(b) Salaires



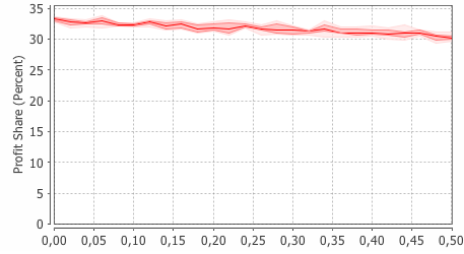
(c) Production



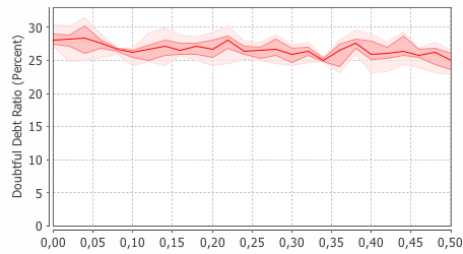
(d) Chômage



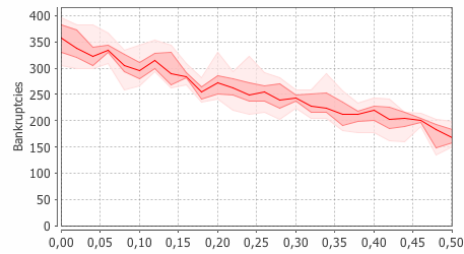
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

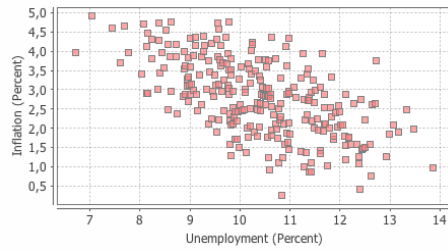


(g) Créances douteuses

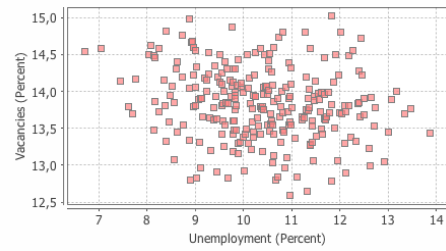


(h) Faillites

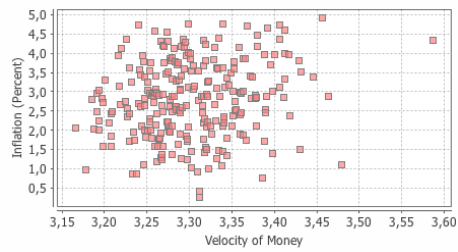
FIGURE 9.3 – Hétérogénéité de la productivité des machines – Sensibilités



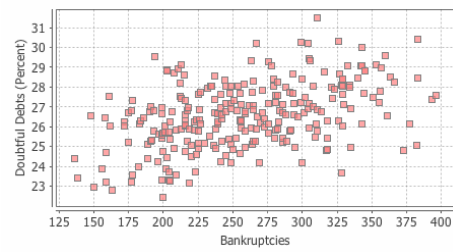
(i) Courbe de Phillips



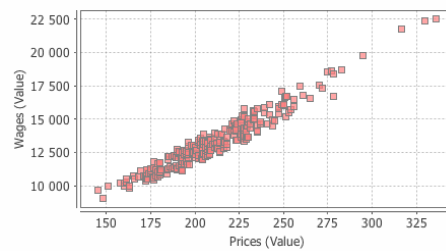
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

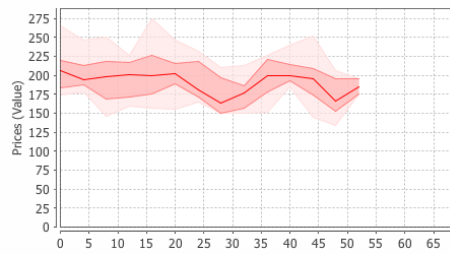


(l) Faillites et créances douteuses

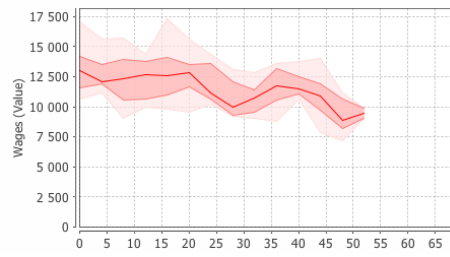


(m) Prix et salaires

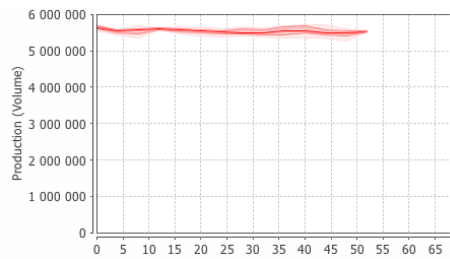
FIGURE 9.3 – Hétérogénéité de la productivité des machines – Corrélations



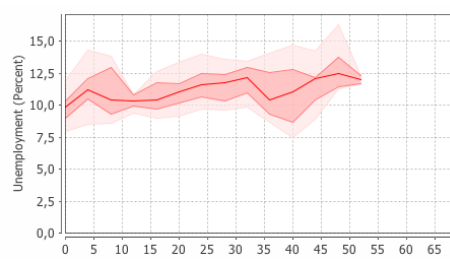
(a) Prix



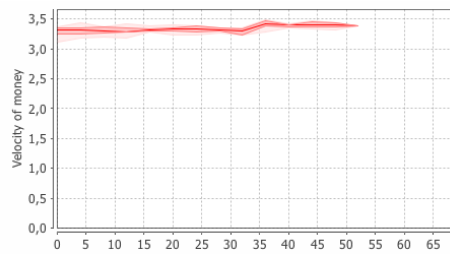
(b) Salaires



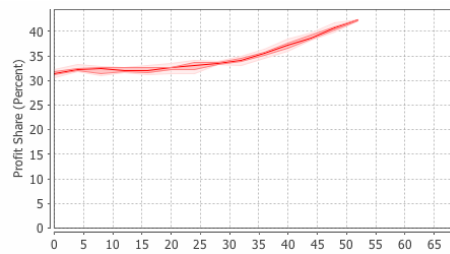
(c) Production



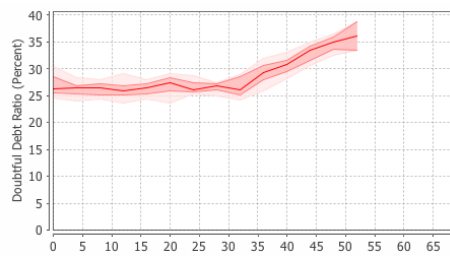
(d) Chômage



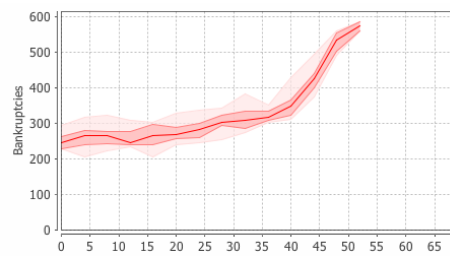
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

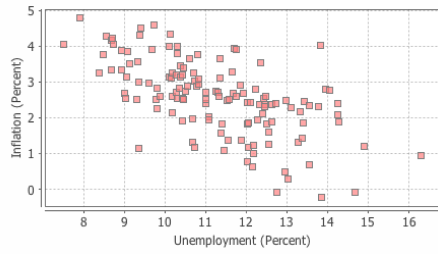


(g) Créances douteuses

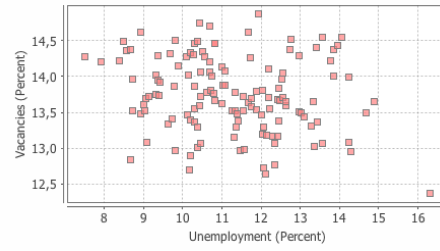


(h) Faillites

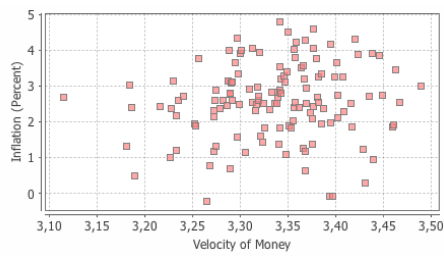
FIGURE 9.4 – Hétérogénéité de la productivité des entreprises – Sensibilités



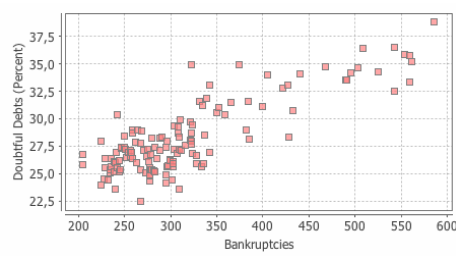
(i) Courbe de Phillips



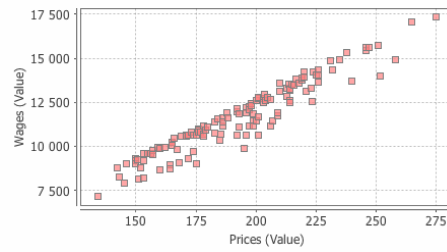
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

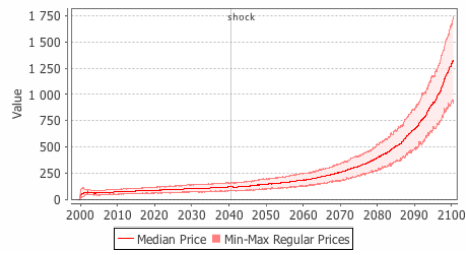


(l) Faillites et créances douteuses

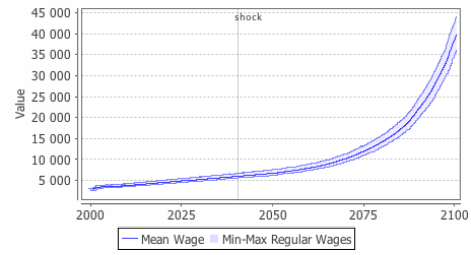


(m) Prix et salaires

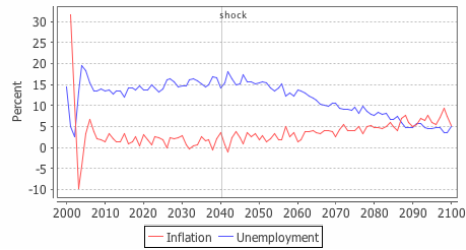
FIGURE 9.4 – Hétérogénéité de la productivité des entreprises – Corrélations



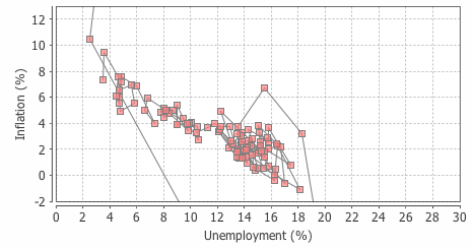
(a) Prix



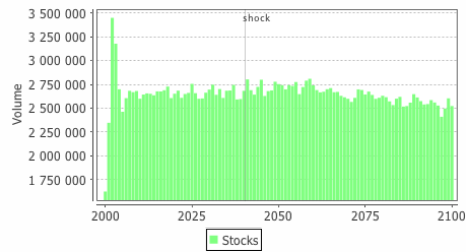
(b) Salaires



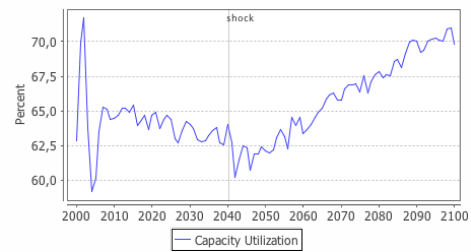
(c) Inflation et chômage



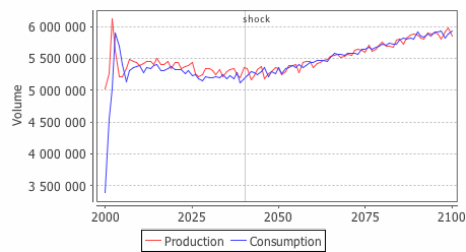
(d) Courbe de Phillips



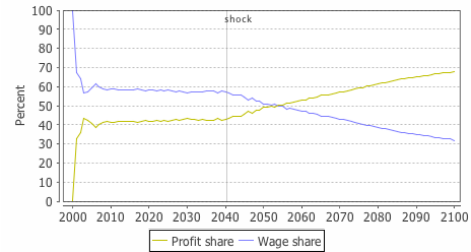
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

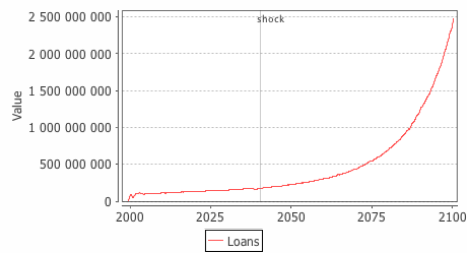


(g) Marché des biens (volume)

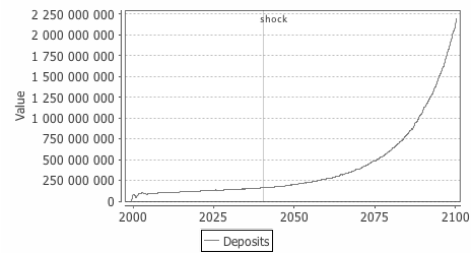


(h) Répartition des revenus

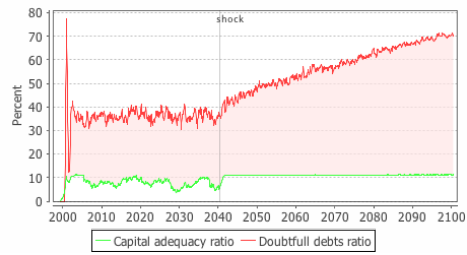
FIGURE 9.5 – Dysfonctionnement bancaire – Principaux indicateurs macroéconomiques



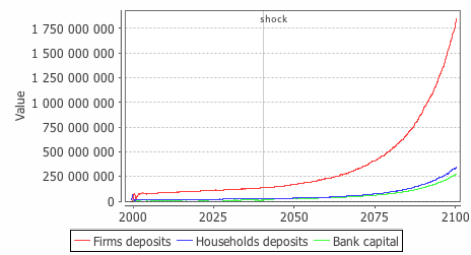
(i) Crédits



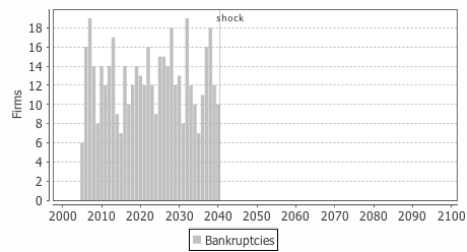
(j) Dépôts



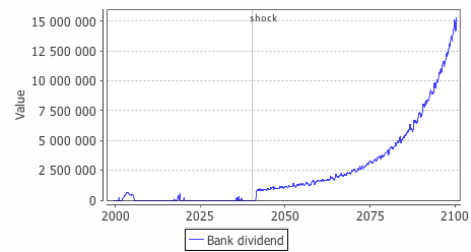
(k) Fonds propres et créances douteuses



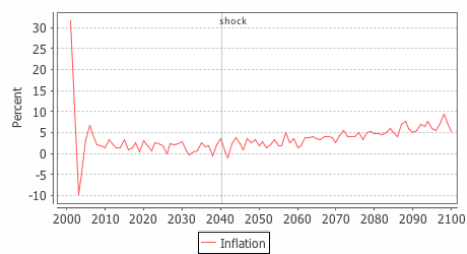
(l) Passif de la banque



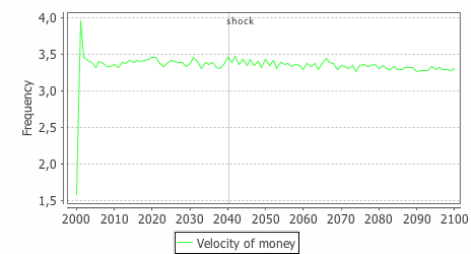
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires



(o) Inflation

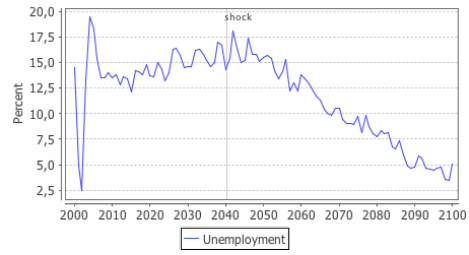


(p) Vitesse de la monnaie

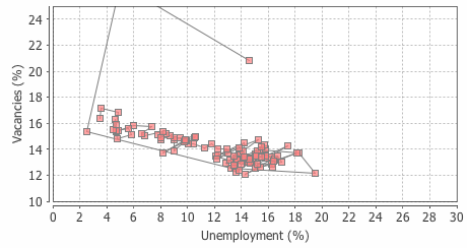
FIGURE 9.5 – Dysfonctionnement bancaire – Indicateurs bancaires et monétaires



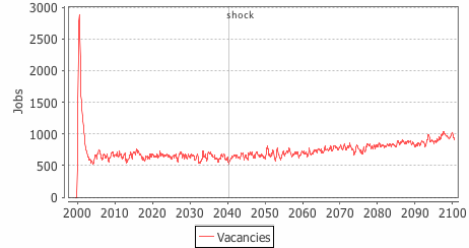
(q) Marché du travail



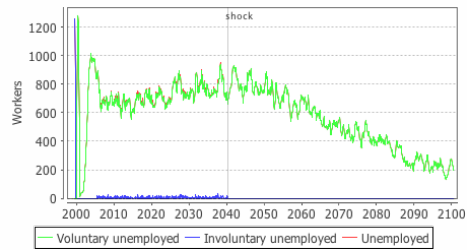
(r) Chômage



(s) Courbe de Beveridge



(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage



(v) Durée moyenne du chômage



(w) Salaire réel

FIGURE 9.5 – Dysfonctionnement bancaire – Indicateurs du marché du travail

Chapitre 10

Les salaires

There are certain « workers' friends » who try to persuade the working class to abandon the fight for wages, of course in its own interests.

Kalecki (1939)

Toutes les explorations que nous avons menées autour du scénario de base sont venues confirmer l'idée selon laquelle la stabilité macroéconomique émergente du modèle était liée à l'existence d'une *répartition des revenus d'équilibre*, dont le niveau est déterminé par le rapport des vitesses des circuits *revenu-consommation* et *force de travail-marchandise*. Ces expérimentations ont montré que, en l'absence de tout mécanisme centralisé de coordination et alors même qu'au sein des entreprises les procédures d'ajustement des prix et des salaires sont rigoureusement indépendantes, chaque économie simulée est capable d'atteindre la répartition d'équilibre qui lui correspond — sous réserve que la banque fasse son travail, c'est-à-dire réserve ses crédits aux entreprises rentables.

La question que nous souhaitons examiner à présent est celle du rôle des procédures définissant le comportement des agents sur le marché du travail dans l'émergence de cette coordination macroscopique entre formation des salaires et formation des prix. Au cours des simulations précédentes, nous avons déjà remarqué que le marché du travail faisait preuve d'une rigidité certaine, dont témoignait la persistance d'un niveau de chômage élevé avec un grand nombre d'emplois vacants, et nous avons expliqué cette rigidité par la valeur élevée du paramètre définissant la résistance des

ménages sans emploi à une baisse de leur salaire de réservation¹. Dans le présent chapitre, nous nous proposons d’explorer l’influence de la rigidité du marché du travail sur la dynamique macroéconomique du modèle.

10.1 La résistance des ménages

Le comportement des ménages sur le marché du travail est gouverné par les paramètres d_H^r et $\nu_H^{W^*}$, qui définissent respectivement la résistance des ménages à une baisse de leur salaire de réservation et la flexibilité mensuelle maximale de ce salaire. Dans le scénario de base², on a $d_H^r = 12$ et $\nu_H^{W^*} = 0.07$, ce qui signifie concrètement qu’un ménage au chômage se résout d’autant plus facilement à baisser son salaire de réservation que sa durée d’inactivité se rapproche de 12 mois. A partir de 12 mois d’inactivité, le ménage sans emploi baisse son salaire de réservation automatiquement chaque mois d’un pourcentage aléatoirement déterminé entre 0 et 7 %³.

Dans la présente section, nous nous intéressons au rôle du paramètre d_H^r sur la dynamique macroéconomique du modèle.

10.1.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle à la résistance des ménages à une baisse de leur salaire de réservation (d_H^r).

Paramètres

On fait varier la résistance des ménages à une baisse de leur salaire de réservation entre 0 et 20⁴. Comme d’habitude, tous les autres paramètres sont fixés aux valeurs du scénario de base ; on exécute 10 simulations différentes avec 10 séries de nombres pseudo-aléatoires différentes pour chaque valeur du paramètre étudié ; chaque simulation est prévue pour durer 50 ans, durée au bout de laquelle les résultats sont enregistrés.

1. Voir l’analyse des résultats de la simulation du scénario de base concernant le marché du travail, chapitre 6, page 171.

2. Voir les paramètres du secteur des ménages dans le scénario de base, chapitre 6, table 6.2, page 165.

3. Voir la description du comportement des ménages sur le marché du travail, chapitre 4, page 131.

4. Cet intervalle encadre la valeur de référence du paramètre d_H^r (12 mois dans le scénario de base) ; 0 est la valeur minimale admissible ; 20 mois semble une valeur extrême compte tenu de la durée moyenne d’un contrat de travail (12 mois).

Le tableau 10.1 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Paramètre étudié	d_H^r
Intervalle des valeurs étudiées	[0; 20]
Valeur de référence (scénario de base)	12
Pas	1
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	210

TABLE 10.1 – Analyse de sensibilité du modèle au niveau de la résistance des ménages à une baisse des salaires nominaux – Paramètres

Conjectures

La conjecture générale est que la résistance des ménages à une baisse de leur salaire de réservation constitue un obstacle à l'ajustement de l'offre et de la demande sur le marché du travail. On s'attend donc à ce que l'affaiblissement de cette résistance entraîne une baisse du chômage, les ménages acceptant plus facilement un emploi vacant :

Conjecture 46 *Le chômage baisse avec l'affaiblissement de la résistance des ménages à une baisse du salaire de réservation.*

Le salaire de réservation des ménages étant défini en termes monétaires, l'affaiblissement de la résistance des ménages doit se traduire par une baisse des salaires nominaux :

Conjecture 47 *Le niveau des salaires nominaux diminue avec l'affaiblissement de la résistance des ménages à une baisse du salaire nominal.*

La flexibilité accrue du salaire nominal doit conduire à un salaire réel moins élevé — ou, ce qui revient au même, puisque la productivité est constante, à des marges plus élevées — et donc à une répartition du revenu global plus favorable aux profits :

Conjecture 48 *La part des profits augmente avec l'affaiblissement de la résistance des ménages à une baisse du salaire nominal.*

Résultats

Les graphiques de la figure 10.1 (page 275) présentent les signatures individuelles du paramètre d_H^r pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées. Ils sont complétés (page 276) par des graphiques présentant les corrélations entre certains indicateurs importants.

Phases : Nous distinguons trois phases dans le comportement de l'économie selon la valeur du paramètre étudié :

- $d_H^r \leq 4$: les crises systémiques interrompent prématurément les simulations.
- $4 < d_H^r \leq 12$: l'économie est soumise à des tendances déflationnistes. Prix et salaires nominaux sont faibles. La production est ralentie et le chômage supérieur à 10 %. Le nombre de faillites est élevé et paraît très sensible au paramètre d_H^r .
- $12 < d_H^r$: l'économie est soumise à des tendances inflationnistes. Les prix et les salaires nominaux sont élevés. La production est élevée et le chômage inférieur à 10 %. Le nombre de faillites est faible et paraît peu sensible au paramètre d_H^r .

Salaires et prix : Comme nous l'avions prévu, le niveau des salaires nominaux dépend fortement de la résistance des ménages à une baisse du salaire de réservation : plus la résistance des ménages est forte, plus les salaires nominaux sont élevés (fig. 10.1b); la conjecture 47 est confirmée. Ce qui est moins attendu, c'est que l'évolution des prix suit très étroitement celle des salaires (fig. 10.1a). La corrélation entre prix et salaires est linéaire (fig. 10.1m), le salaire réel est très peu sensible aux variations du salaire nominal.

Part des profits : Conformément à la conjecture 48, la part des profits s'élève lorsque baisse la résistance des ménages. Cependant, cette hausse des profits est relativement faible, la part des profits n'augmentant que de 5 points lorsqu'on fait passer la résistance des ménages de 20 mois à 5 mois. Comme cette hausse de la part des profits ne semble pas provenir d'une baisse du salaire réel, il ne reste que deux origines possibles : soit une hausse du volume de la consommation, soit une hausse du taux de chômage. C'est la seconde conjecture qui semble la bonne car, contrairement à toute attente, on observe que moins les ménages résistent à la baisse de leur salaire de réservation, plus le chômage s'accroît. La conjecture 46 est totalement invalidée.

Difficultés des entreprises et crise : La hausse du chômage s’accompagne d’une hausse du taux de créances douteuses à l’actif de la banque (fig. 10.1g) et le nombre de faillites s’élève dangereusement (fig. 10.1h). Lorsque la résistance des ménages passe en dessous de 5 mois, les faillites deviennent si fréquentes que la banque elle-même fait défaut. La crise est systémique et les simulations s’interrompent prématurément.

10.1.2 Etude dynamique : choc de flexibilité

Les résultats de l’analyse de sensibilité précédente sont contre-intuitifs : plus les ménages acceptent facilement un emploi, plus il y a de chômage. Le comportement macroéconomique du modèle n’est pas directement déductible des comportements individuels des agents qui le composent, ce qui prouve une nouvelle fois le caractère complexe du système modélisé.

Pour tenter de comprendre les enchaînements causaux qui conduisent à l’émergence d’un chômage croissant lorsqu’augmente la flexibilité des ménages, nous décidons d’approcher le phénomène par une étude dynamique, en introduisant un « choc de flexibilité » en cours de simulation⁵.

Paramètres

Comme d’habitude, nous partons du scénario de base. Nous créons un choc de flexibilité exogène en réduisant brutalement la résistance de chacun des ménages en janvier 2040, par une variation brutale du paramètre d_H^r .

Le tableau 10.2 présente les paramètres de l’analyse dynamique. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés.

Paramètre	d_H^r
Valeur avant le choc	12
Valeur après le choc	3
Date du choc	janvier 2040

TABLE 10.2 – Etude dynamique – Choc de flexibilité – Paramètres

5. La présente section reprend une étude déjà présentée dans Seppecher (2012).

Conjectures

Dans la *Théorie générale*, Keynes critique la conception selon laquelle le chômage trouverait son explication dans l'existence de « résistances de frottement » empêchant l'adaptation des salaires à la demande réelle de travail. Pour lui, on ne peut raisonner en supposant fixe la demande effective agrégée :

« [...] whilst no one would wish to deny the proposition that a reduction in money-wages accompanied by the same aggregate effective demand as before will be associated with an increase in employment, the precise question at issue is whether the reduction in money-wages will or will not be accompanied by the same aggregate effective demand as before measured in money, or, at any rate, by an aggregate effective demand which is not reduced in full proportion to the reduction in money-wages [...] » (Keynes 1936 [1974])

Pour expliquer les résultats de l'analyse de sensibilité précédente, nous faisons la conjecture que l'affaiblissement de la résistance des ménages, en entraînant la baisse des salaires nominaux, a un effet dépressif sur la demande, non seulement en valeur, mais aussi en volume :

Conjecture 49 *L'affaiblissement soudain de la résistance des ménages entraîne une baisse de la demande en volume qui se manifeste par une hausse du niveau des stocks.*

Si la conjecture 49 est vérifiée, on s'attend à voir les entreprises réagir par une baisse des prix et de l'emploi, ce qui doit se traduire au niveau des taux d'inflation et de chômage :

Conjecture 50 *L'affaiblissement soudain de la résistance des ménages entraîne une baisse de l'activité, une baisse de l'inflation et une hausse du chômage.*

Enfin, si la conjecture 50 est vérifiée, on s'attend à ce que la baisse de l'activité entraîne une augmentation des difficultés des entreprises :

Conjecture 51 *L'affaiblissement soudain de la résistance des ménages entraîne une hausse des créances douteuses, une hausse du nombre des faillites et, éventuellement, une crise systémique.*

Résultats

Les graphiques des figures 10.2 (pages 277 à 279) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années

de la simulation. Les 40 premières années sont strictement identiques à celles du scénario de base ; puis, en janvier 2040, intervient un choc provoqué par l'affaiblissement soudain de la résistance des ménages à une baisse de leur salaire de réservation.

A première vue, les résultats sur le marché du travail semblent plutôt positifs. Le nombre d'emplois vacants diminue (fig. 10.2t). La durée moyenne de chômage est réduite (fig. 10.2v). Le mouvement de la courbe de Beveridge confirme la flexibilité nouvelle du marché (figure 10.2s).

Cependant, le fléchissement de la progression des salaires (fig. 10.2b) affecte la demande. La consommation passe sous la production et les stocks des entreprises augmentent (fig. 10.2g et 10.2e) ; la conjecture 49 est vérifiée.

Les entreprises réagissent en baissant leurs prix (fig. 10.2a) mais aussi en réduisant le niveau de la production (fig. 10.2f), ce qui se traduit simultanément par une baisse de l'inflation et une augmentation du chômage (fig. 10.2c) ; la conjecture 50 est vérifiée.

Cette rétroaction sur le marché du travail, en augmentant le nombre de ménages sans emploi, accroît la concurrence entre ceux-ci, et les conduit à accepter de nouvelles baisses de salaires. Le mouvement de déflation enclenché par les premières baisses de salaires se développe et se renforce. Le cheminement de la courbe de Phillips illustre l'enfoncement de l'économie dans la dépression (fig. 10.2d).

La baisse des salaires nominaux, plus rapide que celle des prix, se traduit par un effondrement du salaire réel⁶ (fig. 10.2w). La répartition des revenus est déstabilisée en faveur de la part des profits qui atteint, à la fin de la simulation, 40 % du revenu global (fig. 10.2h).

Pourtant, les entreprises ont de plus en plus de mal à rembourser la banque à l'échéance. Les créances douteuses augmentent, les défaillances d'entreprises se multiplient, affectant les fonds propres de la banque, jusqu'à conduire celle-ci à la faillite en octobre 2059 (fig. 10.2k et 10.2m). Parce que le modèle est doté d'une banque unique représentative de l'ensemble du système bancaire, la faillite de cette banque traduit l'impossibilité de respecter la contrainte de reflux de la monnaie, imposée par la nature de la monnaie de crédit. La crise est systémique et la simulation s'interrompt (conjecture 51).

Ces résultats nous conduisent à nous interroger sur la pertinence même de la notion de « chômage volontaire ». Ainsi, le graphique de la figure 10.2u pourrait laisser

6. Ce résultat est contradictoire avec la relative insensibilité du salaire réel à la résistance des ménages constatée lors de l'analyse de sensibilité (voir page 263). Cependant, cette relative insensibilité était observée pour des valeurs de d_H^r plus élevées que dans la présente simulation. Il semblerait donc qu'en dessous d'un certain seuil de résistance des ménages, le salaire réel ne résiste plus à la pression sur les salaires nominaux. Ce point devrait faire l'objet de recherches plus poussées.

penser que l'accroissement du chômage est la conséquence de la mauvaise volonté des chômeurs concernés. Comme dans tout système complexe, une interprétation hâtive des dynamiques macroéconomiques observées peut amener à des conclusions totalement erronées sur les motifs microéconomiques qui en sont la cause première⁷. Dans ce scénario, c'est bien l'accroissement de la concurrence entre les chômeurs pour trouver un emploi qui, en entraînant la baisse des salaires nominaux, est la cause première de la hausse du chômage constaté.

10.2 Introduction d'un salaire minimum

Les simulations précédentes ont montré les effets négatifs d'une flexibilité accrue du marché du travail obtenue au moyen de l'affaiblissement de la résistance des ménages à une baisse de leur salaire de réservation. Nous étudions à présent les effets d'un renforcement de la rigidité du marché du travail obtenu par l'introduction d'un salaire minimum.

10.2.1 Etude dynamique (1)

On a vu comment un choc de flexibilité entraîne l'économie dans une spirale inflationniste jusqu'à la crise systémique et l'interruption prématurée de la simulation. Nous nous proposons à présent d'introduire un salaire minimum pour interrompre la chute des salaires et savoir si cette rigidité imposée permet d'éviter la crise.

On se souvient en effet que les entreprises ne peuvent baisser leur salaire d'embauche en dessous du salaire minimum défini par le paramètre \bar{W}_F ⁸. Dans le scénario de base, comme dans toutes les simulations que nous avons exécutées jusqu'ici, il n'y a pas de salaire minimum puisque $\bar{W}_F = 0$ ⁹.

7. L'émergence est ici plus puissante que dans les modèles de ségrégation spatiale (voir chapitre 2, page 29). Dans ces modèles, on constate une forte ségrégation au niveau macro malgré une faible propension à la ségrégation au niveau micro, mais la propension à la ségrégation, même faible, est bien le moteur du phénomène macro. Certes l'intensité du phénomène macro n'est pas déductible des motivations micro, mais les deux vont dans le même sens ; la preuve en est que si on renforce la propension à la ségrégation des agents, on renforce l'homogénéité des ghettos émergents. Ici, au contraire, l'orientation des motivations des agents et les effets macroéconomiques constatés sont complètement opposés : c'est parce que les chômeurs acceptent plus facilement des emplois que le nombre de chômeurs augmente.

8. Voir la modélisation de la décision d'ajustement du salaire d'embauche dans les entreprises, chapitre 4, page 120.

9. Voir les paramètres du scénario de base, chapitre 6, table 6.3, page 166.

Paramètres

Nous ne partons pas du scénario de base, mais du scénario précédent, avec « choc de flexibilité ». Nous conservons la modification de la résistance des ménages en 2040 mais nous ajoutons un second choc exogène en 2045 avec l'introduction d'un salaire minimum.

Le tableau 10.3 présente les paramètres de l'analyse dynamique. Tous les autres paramètres restent inchangés, égaux à ceux du scénario précédent et donc à ceux du scénario de base.

Paramètre 1	d_H^r
Valeur avant le choc 1	12
Valeur après le choc 1	3
Date du choc 1	janvier 2040
Paramètre 2	\bar{W}_F
Valeur avant le choc 2	0
Valeur après le choc 2	7500
Date du choc 2	janvier 2045

TABLE 10.3 – Etude dynamique – Introduction d'un salaire minimum (1) – Paramètres

Conjectures

Notre seule conjecture est qu'en interrompant la chute des salaires, l'introduction du salaire minimum va interrompre l'ensemble du processus déflationniste et, par là, éviter la crise.

Conjecture 52 *L'introduction d'un salaire minimum interrompt le processus déflationniste.*

Résultats

Les graphiques des figures 10.3 (pages 280 à 282) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années

de la simulation. Les 40 premières années sont strictement identiques à celles de la simulation du scénario de base ; puis, en janvier 2040, intervient un premier choc provoqué par l'affaiblissement soudain de la résistance des ménages à une baisse de leur salaire de réservation. Les cinq années suivantes sont strictement identiques à la simulation du scénario avec choc de flexibilité ; puis, en janvier 2045, intervient un second choc provoqué par l'introduction d'un salaire minimum.

Le choc : Lorsqu'il est introduit en 2045, le niveau du salaire minimum est inférieur de plus de 1500 unités monétaires au plus faible des salaires constatés ; aussi, il ne joue aucun rôle dans les années qui suivent immédiatement le choc. Cependant, la chute accélérée des salaires se poursuit jusqu'à atteindre le plancher imposé par le salaire minimum, dans le courant de l'année 2054 (fig. 10.3b).

La consommation recommence immédiatement à croître (fig. 10.3g) et le niveau des stocks diminue (fig. 10.3e). La baisse des stocks conduit logiquement les entreprises à augmenter le niveau de la production et celui des prix. Or, si on observe bien une hausse de l'utilisation des capacités de production dès 2054 (fig. 10.3f), en revanche les prix continuent à baisser — beaucoup moins vite, il est vrai (fig. 10.3a) — et il faut attendre 2060 pour voir l'inflation redevenir (provisoirement) positive (fig. 10.3o).

Un mouvement contradictoire : Cette déconnection de l'évolution des prix et de la production est surprenante : n'avons-nous pas dessiné le comportement des entreprises de telle manière qu'une entreprise qui constate une baisse du niveau de ses stocks en-deçà du niveau normal a autant de chance d'augmenter son prix que son niveau de production ? On s'attendait donc à observer une reprise *simultanée* de la production et des prix.

Nous interprétons le phénomène de la façon suivante : nous savons qu'une entreprise qui constate la faiblesse de ses stocks aura tendance à ajuster sa production et ses prix à la hausse, mais que l'ampleur de cette hausse est déterminée aléatoirement. Si au niveau macro on voit la production reprendre et les prix continuer à baisser, c'est qu'au niveau micro, les entreprises qui ont « choisi » d'augmenter plutôt la production parviennent à écouler leur marchandise, alors que les entreprises qui ont « préféré » augmenter les prix voient immédiatement leurs stocks augmenter à nouveau et sont contraintes de faire machine arrière. Autrement dit, le marché reste très concurrentiel malgré la reprise de la demande et les entreprises — en dépit de la simplicité de leurs procédures de décision — parviennent tant bien que mal à s'y adapter. Des investigations plus poussées devrait permettre de confirmer notre interprétation de cet intéressant phénomène.

La crise : Les difficultés d'adaptation des entreprises aux nouvelles conditions créées par l'introduction du salaire minimum se manifestent par la hausse du nombre de faillites (fig. 10.3m). On observe un pic en 2056 avec 37 faillites pour cette seule année. Ces faillites creusent profondément les fonds propres de la banque et l'on passe en septembre 2059 tout près de la crise systémique, avec un ratio de liquidité de la banque de seulement 0.7 % (fig. 10.3k).

Le rebond : Le système surmonte la crise. Le blocage des salaires sur le niveau du salaire minimum combiné à la baisse des prix permet d'observer une hausse rapide du salaire réel (fig. 10.3w). Le chômage décroît (fig. 10.3r) et la masse des salaires augmente, renforçant à nouveau la demande. L'économie parcourt en sens inverse le chemin tracé par la courbe de Phillips (fig. 10.3d) puis se stabilise à des niveaux d'activité supérieurs à ceux observés dans le scénario de référence avec une inflation nulle en moyenne. La répartition des revenus entre salaires et profits retrouve des niveaux proches de ceux du scénario de référence (fig. 10.3h).

La conjecture 52 est confirmée : l'introduction d'un salaire minimum a effectivement permis de mettre fin à la spirale déflationniste amorcée par le choc de flexibilité. Ce qui est inattendu, c'est que l'économie puisse rejoindre, grâce à cette introduction, des niveaux d'activité supérieurs à ceux enregistrés avant le premier choc.

Le chômage : Une dernière observation doit être faite, qui a trait à la nature du chômage. Sur le graphique de la figure 10.3u, on remarque la brutale conversion de la totalité des chômeurs volontaires en chômeurs involontaires. Cette conversion s'effectue entre janvier 2056 et janvier 2058, au moment même où tous les salaires viennent « s'écraser » sur le plancher formé par le salaire minimum et où il n'y a plus d'emplois vacants dans les entreprises. La conversion massive des chômeurs montre qu'ils sont prêts à accepter un emploi à un niveau inférieur au salaire minimum, mais n'en trouvent pas. A travers le salaire minimum, c'est par l'instauration d'une règle venant s'opposer à la concurrence entre salariés sans emploi que l'économie parvient à se redresser et que l'on observe la baisse du nombre de chômeurs, la réduction de la durée moyenne du chômage et la disparition des emplois vacants dans les entreprises (fig. 10.3v, 10.3t et 10.3s).

10.2.2 Étude dynamique (2)

Nous avons montré, dans l'étude précédente comment l'introduction d'un salaire minimum pouvait interrompre la spirale inflationniste enclenchée par un choc de flexibilité. Cependant, le scénario présenté dans l'étude précédente n'est qu'un des

multiples scénarios possibles. L'efficacité du salaire minimum dépend de sa date d'introduction et de son niveau : décidé trop tard, ou d'un niveau trop faible, il ne saurait empêcher l'irruption de la crise systémique.

Nous avons donc commencé par explorer différentes combinaisons des paramètres fixant la date et le niveau de l'introduction du salaire minimum afin de déterminer le scénario qui serait le plus intéressant à présenter dans la section 10.1 ; nous cherchions un scénario avec un niveau de salaire minimum le plus bas possible, pour laisser à la spirale déflationniste le temps de se former, mais à un niveau suffisamment élevé pour que la crise soit évitée et que l'on puisse observer le rebond de l'économie.

Au cours de cette recherche tâtonnante nous avons découvert certaines valeurs définissant un scénario au comportement singulier ; c'est ce cas particulier que nous présentons dans cette section.

Paramètres

Nous partons du scénario précédent, dont nous modifions simplement le niveau du salaire minimum en le fixant à 9499, au lieu de 7500.

Le tableau 10.4 présente les paramètres de l'analyse dynamique. Tous les autres paramètres restent inchangés, égaux à ceux du scénario précédent et donc à ceux du scénario de base.

Paramètre 1	d_H^r
Valeur avant le choc 1	12
Valeur après le choc 1	3
Date du choc 1	janvier 2040
Paramètre 2	\bar{W}_F
Valeur avant le choc 2	0
Valeur après le choc 2	9499
Date du choc 2	janvier 2045

TABLE 10.4 – Etude dynamique – Introduction d'un salaire minimum (2) – Paramètres

Conjectures

Nous n'avons pas de conjecture spécifique à formuler. Nous nous attendons aux mêmes résultats que lors de l'étude dynamique précédente ; ils devront être simplement atteints plus rapidement puisque le salaire minimum est juste inférieur au plus bas des salaires constatés au moment de son introduction.

Résultats

Les graphiques des figures 10.4 (pages 283 à 285) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années de la simulation. Les 45 premières années sont strictement identiques aux deux précédentes simulations, avec un choc de flexibilité en janvier 2040 ; puis, en janvier 2045, intervient un second choc provoqué par l'introduction d'un salaire minimum d'un niveau plus élevé.

Comme prévu, parce que le niveau du salaire minimum se situe juste en dessous du plus faible des salaires constatés au moment de son introduction, ses effets se font immédiatement sentir ; dès que le mouvement déflationniste commence à se former, le salaire minimum vient s'opposer à la baisse des salaires. Ce qui est inattendu, c'est qu'au lieu d'assister à un écrasement des salaires sur le salaire minimum, on assiste à un rebond des salaires en 2050 (fig. 10.4b) et, de là, de toute l'activité (fig. 10.4f, 10.4g).

Ce rebond n'a qu'une durée limitée — 15 ans — puis l'économie retombe à nouveau dans la déflation, avant de rebondir à nouveau en 2084. On observe la formation d'un régime cyclique, spectaculairement illustré par la trajectoire circulaire empruntée par l'économie dans le plan de la courbe de Beveridge (fig. 10.4s).

La contradiction entre un marché du travail très flexible pour des salaires supérieurs au salaire minimum et un marché du travail très rigide pour des niveaux de salaires proches du salaire minimum débouchait sur l'écrasement des salaires dans la simulation de la section précédente¹⁰. Ici au contraire, parce que la rencontre entre l'économie et le salaire minimum se fait « en douceur », avant que ne soit formée la spirale déflationniste, l'hétérogénéité des salaires est préservée.

Lorsque les salaires s'approchent du salaire minimum, le marché du travail retrouve une rigidité proche du scénario de base, et la dynamique de l'activité est relancée ; lorsque les salaires s'élèvent loin au-dessus du salaire minimum, ses effets ne se font plus sentir et l'économie rechute. Si nous laissons la simulation se poursuivre au-delà de 2100, nous observons le renforcement progressif de l'ampleur des

10. Voir la figure 10.3b, page 280.

cycles, des phases de dépressions plus profondes succédant à des périodes d'activité plus intense. Cet accroissement de l'instabilité conduit à une crise systémique qui interrompt la simulation en mars 2279.

10.3 Conclusion

Dans le scénario de base, point de référence de fonctionnement du modèle pour nos explorations, le marché du travail se caractérise par une rigidité marquée : les ménages sans emploi opposent une forte résistance aux baisses des salaires nominaux que tentent de leur imposer les entreprises ; cette résistance semblait être à l'origine de la persistance simultanée d'un nombre important de chômeurs et d'emplois vacants.

Dans le présent chapitre, nous avons modifié cette résistance, en imposant aux ménages sans emploi d'accepter plus facilement une baisse des salaires nominaux. Mais, bien que les salariés soient plus flexibles devant les exigences des employeurs, nous n'avons pas observé de réduction durable du niveau de chômage. En revanche, nous avons constaté que la baisse de salaires entraîne un affaiblissement de la demande. Cet affaiblissement de la demande conduit les entreprises à baisser le prix des marchandises mais aussi le niveau de la production, avec pour conséquence l'augmentation du chômage. En dessous d'un certain seuil, l'affaiblissement de la résistance des ménages débouche sur la formation d'un processus déflationniste qui s'entretient et s'amplifie et que seule la faillite du système bancaire viendra interrompre.

Ces expériences viennent à l'appui du raisonnement de Keynes, raisonnement qui le conduit à affirmer qu'une baisse des salaires nominaux n'est pas de nature à assurer le plein emploi, et risque même de déstabiliser les prix et par là l'ensemble du système économique.

« For if competition between unemployed workers always led to a very great reduction of the money-wage, there would be a violent instability in the price-level. Moreover, there might be no position of stable equilibrium except in conditions consistent with full employment. » (Keynes 1936 [1974])

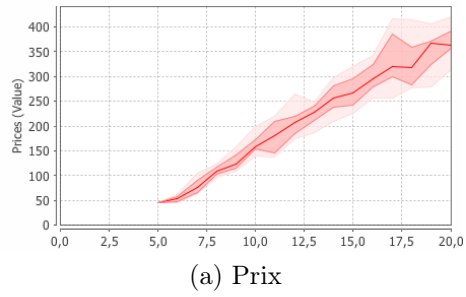
Le scénario suivant, avec instauration d'un salaire minimum, confirme l'importance de la rigidité des salaires dans l'émergence de la stabilité économique constatée dans le scénario de référence. Pour Keynes, c'est le caractère monétaire de l'économie considérée qui explique l'importance de cette rigidité pour l'équilibre du système :

« In fact we must have some factor, the value of which in terms of money is, if not fixed, at least sticky, to give us any stability of values in a monetary system. » (Keynes 1936 [1974])

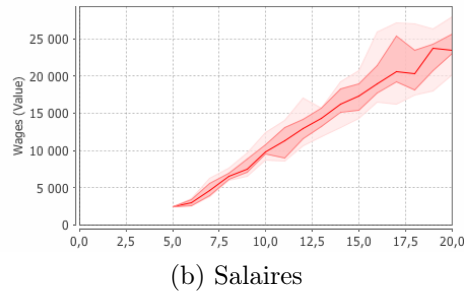
En somme, les salaires nominaux, par leur rigidité, donnent une échelle aux grandeurs monétaires et permettent l'établissement de rapports stables entre ces valeurs.

Enfin, la dernière simulation a montré comment sous certaines conditions, l'existence de deux états du marché du travail — l'un flexible et l'autre non — permettait de faire émerger des comportements périodiques inattendus. Nous imaginons alors que si, au lieu d'être un paramètre exogène, uniforme et constant, la résistance des ménages était une variable endogène et individualisée¹¹, nous pourrions observer de nouvelles et intéressantes dynamiques macroéconomiques émergentes ; voilà une nouvelle perspective de recherche qui vient s'ajouter à la liste de nos projets de développement du modèle.

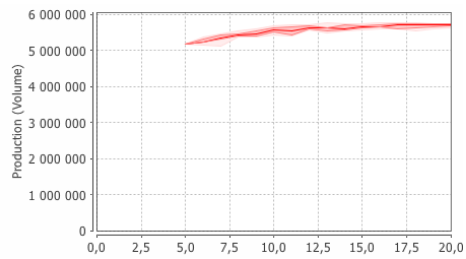
11. La résistance des ménages pourrait dépendre du niveau de leur épargne, ainsi que du niveau d'un éventuel revenu d'inactivité.



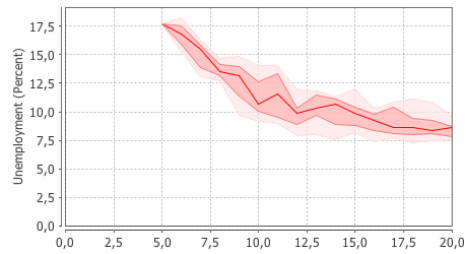
(a) Prix



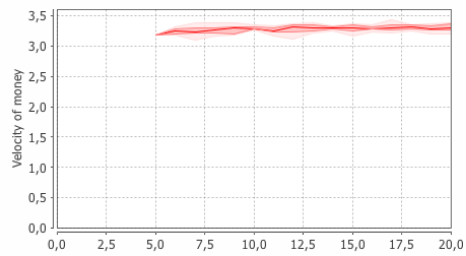
(b) Salaires



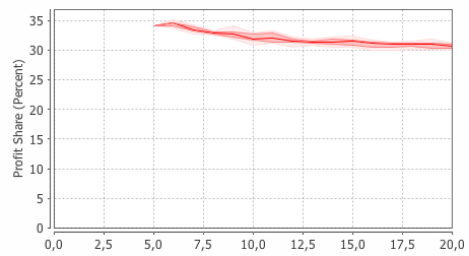
(c) Production



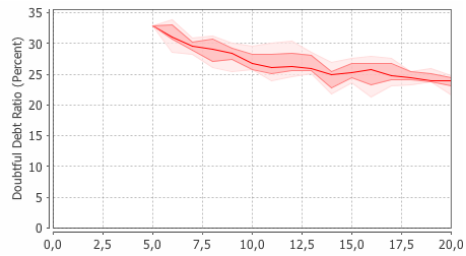
(d) Chômage



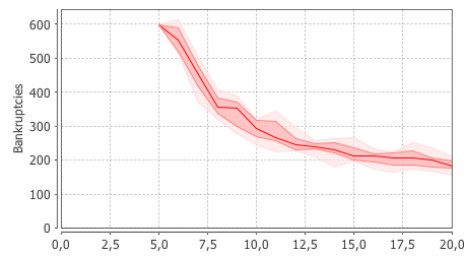
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

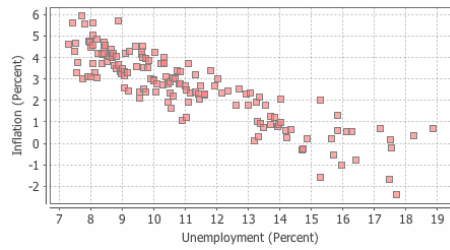


(g) Créances douteuses

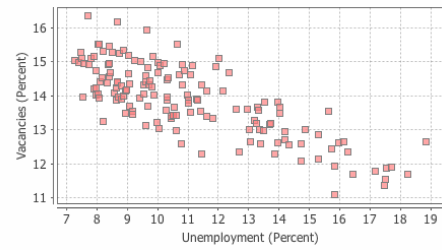


(h) Faillites

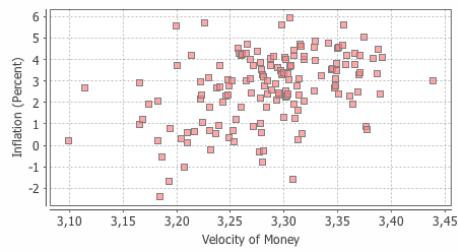
FIGURE 10.1 – Résistance des ménages à une baisse du salaire de réservation – Sensibilités



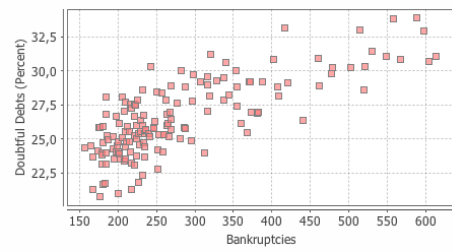
(i) Courbe de Phillips



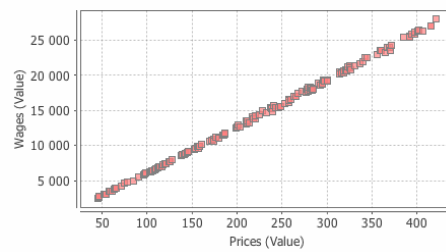
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation

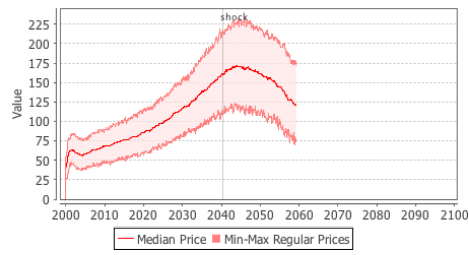


(l) Faillites et créances douteuses

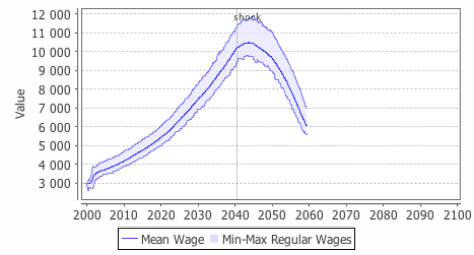


(m) Prix et salaires

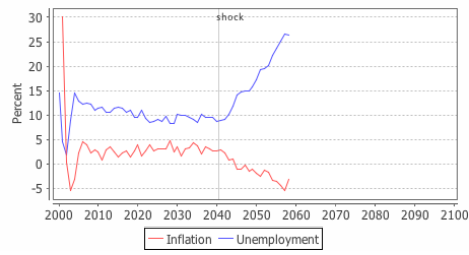
FIGURE 10.1 – Résistance des ménages à une baisse du salaire de réservation – Corrélations



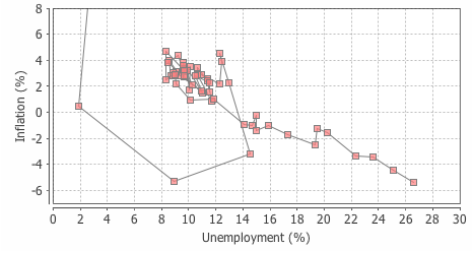
(a) Prix



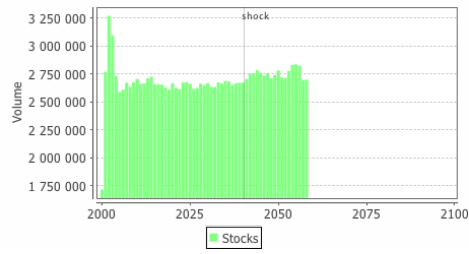
(b) Salaires



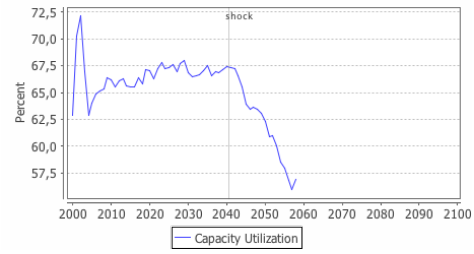
(c) Inflation et chômage



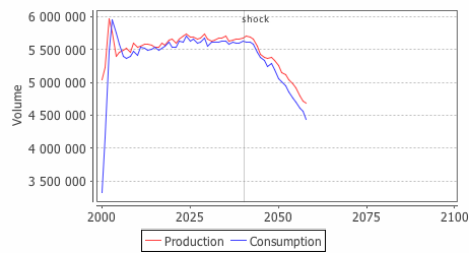
(d) Courbe de Phillips



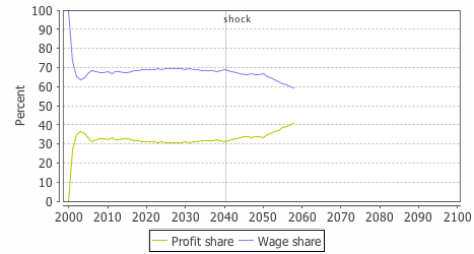
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

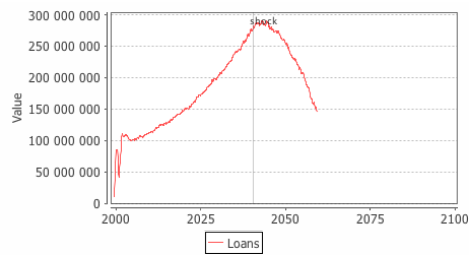


(g) Marché des biens (volume)

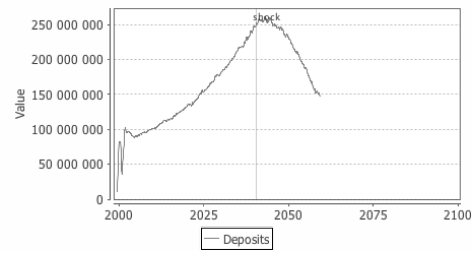


(h) Répartition des revenus

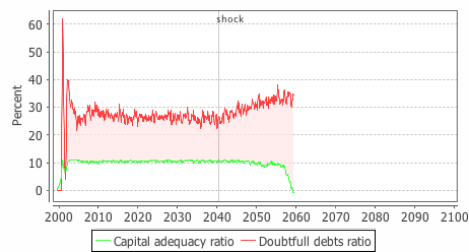
FIGURE 10.2 – Choc de flexibilité – Principaux indicateurs macroéconomiques



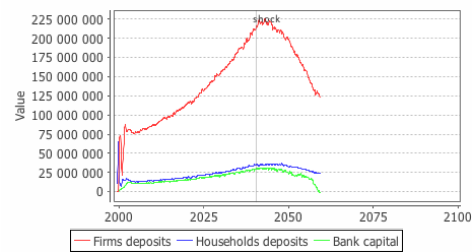
(i) Crédits



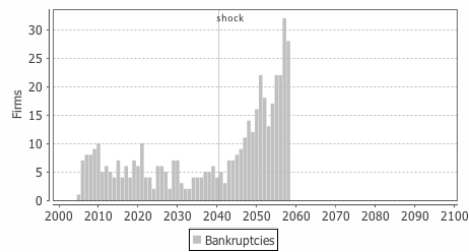
(j) Dépôts



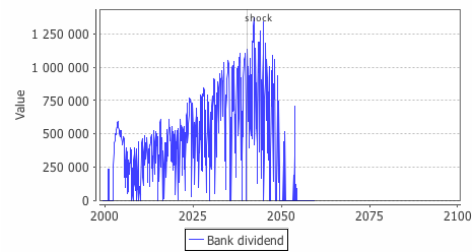
(k) Fonds propres et créances douteuses



(l) Passif de la banque



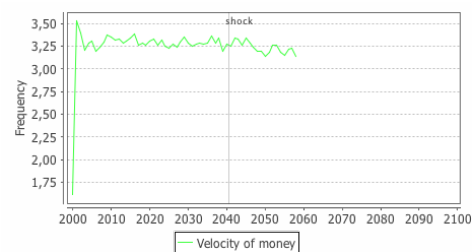
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires

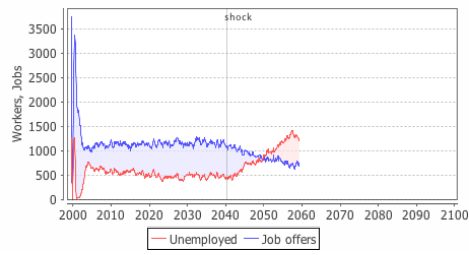


(o) Inflation

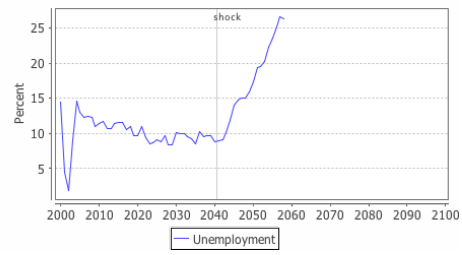


(p) Vitesse de la monnaie

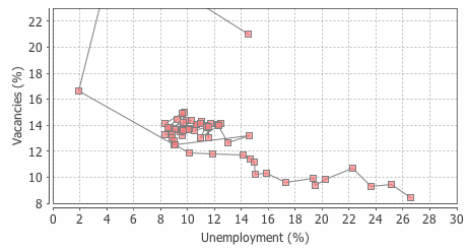
FIGURE 10.2 – Choc de flexibilité – Indicateurs bancaires et monétaires



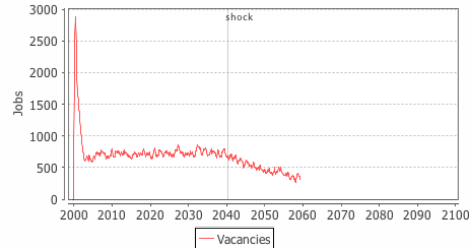
(q) Marché du travail



(r) Chômage



(s) Courbe de Beveridge



(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage

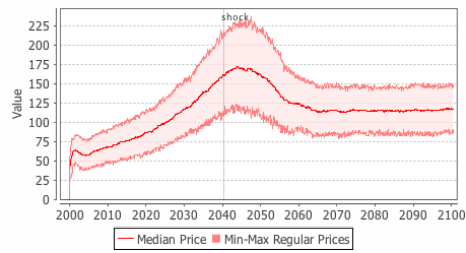


(v) Durée moyenne du chômage

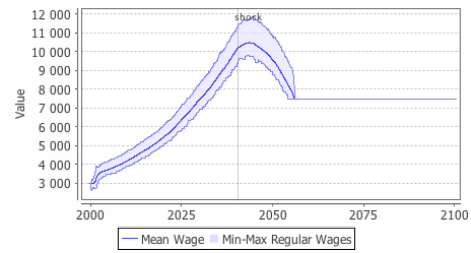


(w) Salaire réel

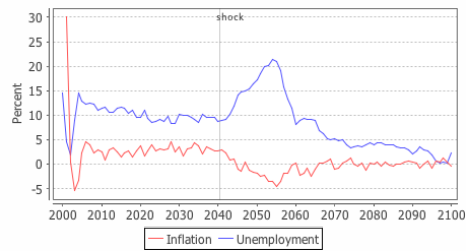
FIGURE 10.2 – Choc de flexibilité – Indicateurs du marché du travail



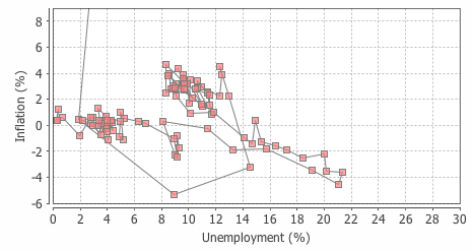
(a) Prix



(b) Salaires



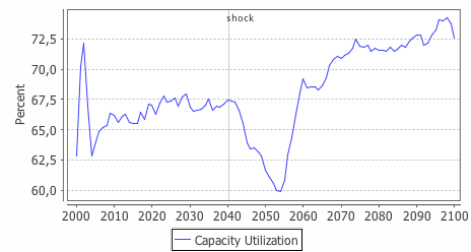
(c) Inflation et chômage



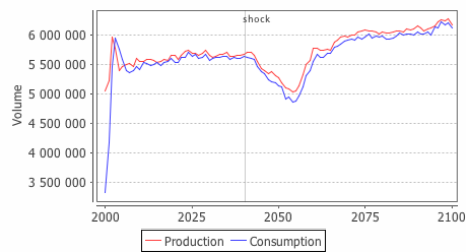
(d) Courbe de Phillips



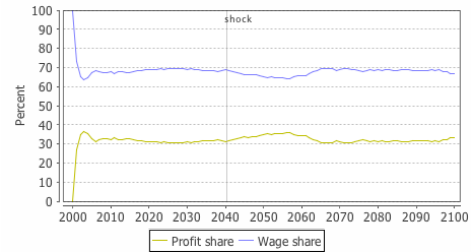
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

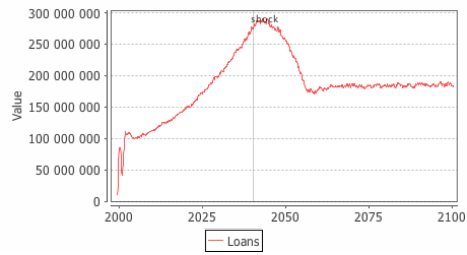


(g) Marché des biens (volume)

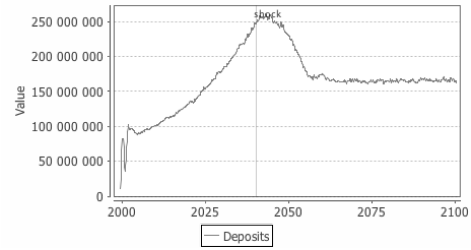


(h) Répartition des revenus

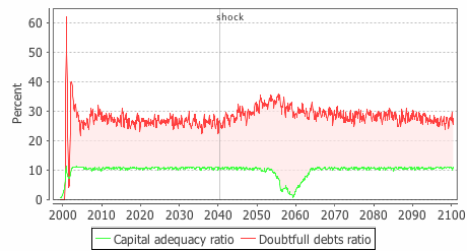
FIGURE 10.3 – Introduction d'un salaire minimum – Principaux indicateurs macro-économiques



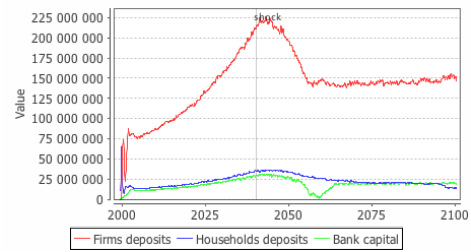
(i) Crédits



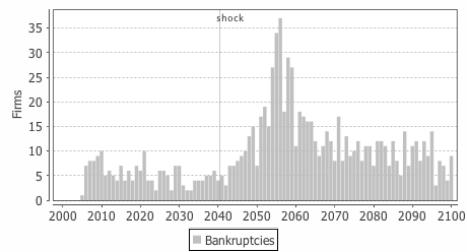
(j) Dépôts



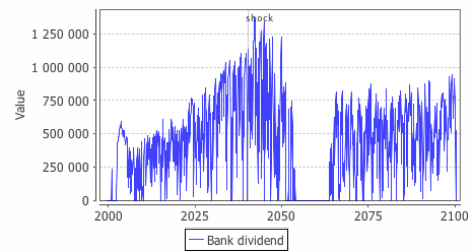
(k) Fonds propres et créances douteuses



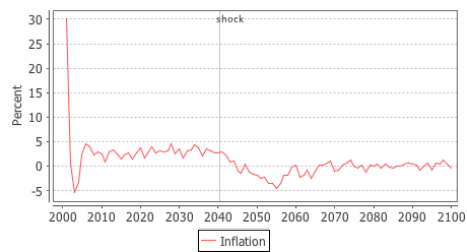
(l) Passif de la banque



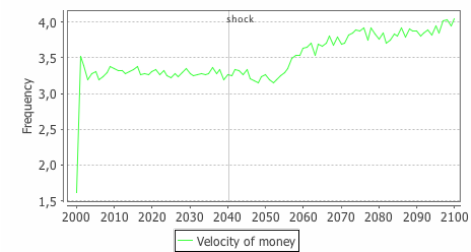
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires



(o) Inflation

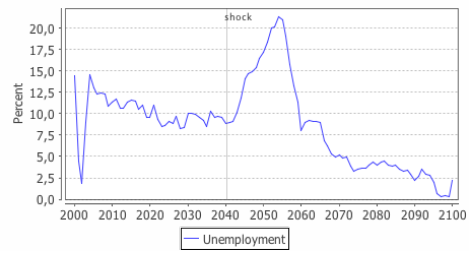


(p) Vitesse de la monnaie

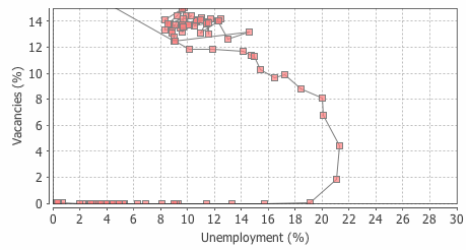
FIGURE 10.3 – Introduction d'un salaire minimum – Indicateurs bancaires et monétaires



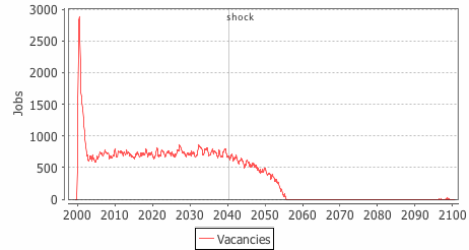
(q) Marché du travail



(r) Chômage



(s) Courbe de Beveridge



(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage

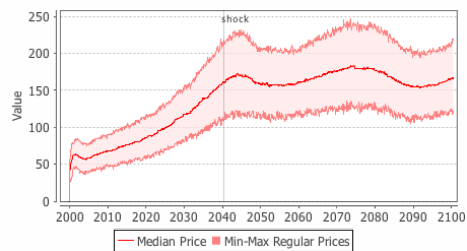


(v) Durée moyenne du chômage

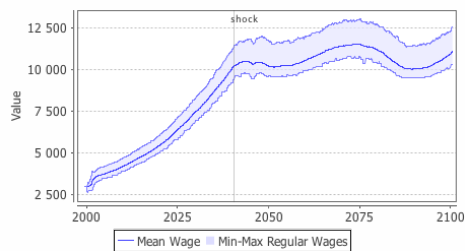


(w) Salaire réel

FIGURE 10.3 – Introduction d'un salaire minimum – Indicateurs du marché du travail



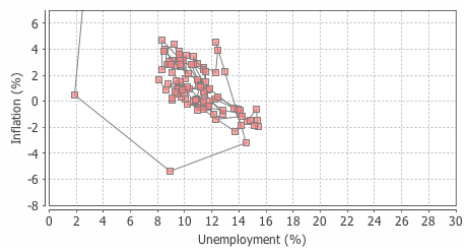
(a) Prix



(b) Salaires



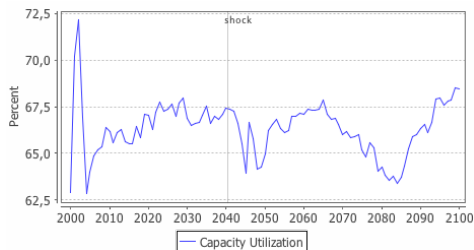
(c) Inflation et chômage



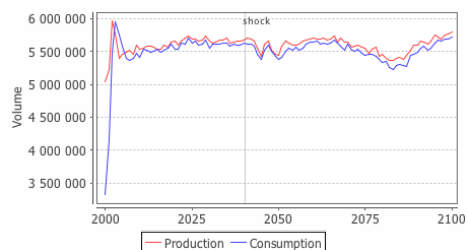
(d) Courbe de Phillips



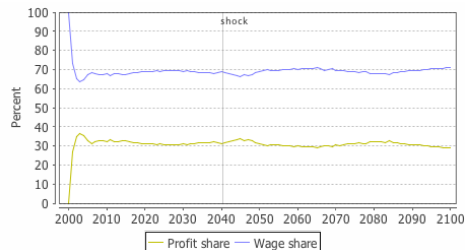
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

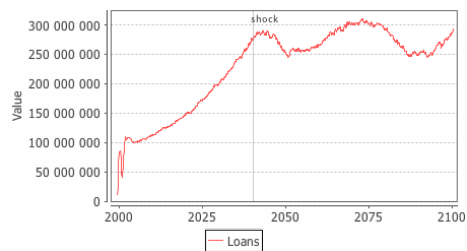


(g) Marché des biens (volume)

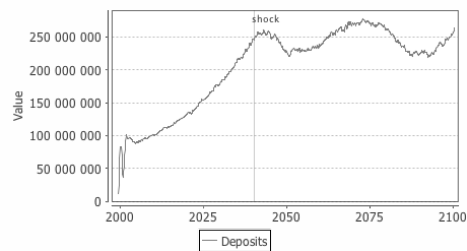


(h) Répartition des revenus

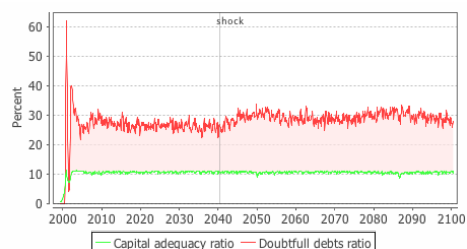
FIGURE 10.4 – Introduction d'un salaire minimum (Cas particulier) – Principaux indicateurs macroéconomiques



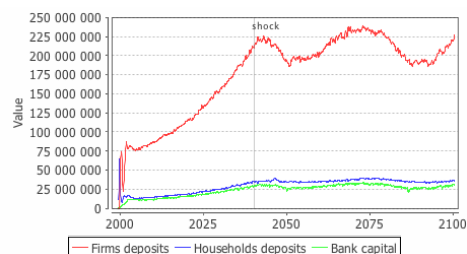
(i) Crédits



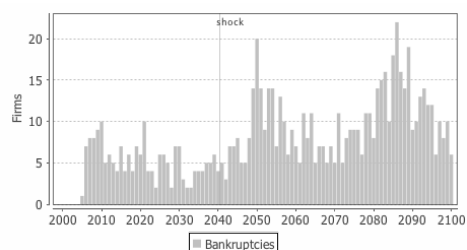
(j) Dépôts



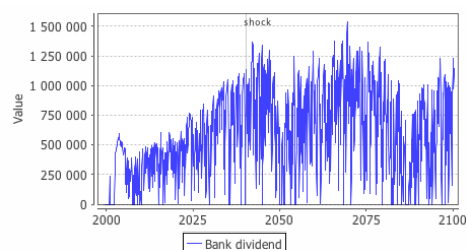
(k) Fonds propres et créances douteuses



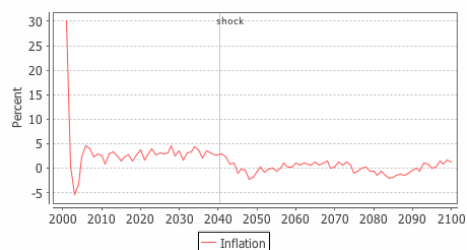
(l) Passif de la banque



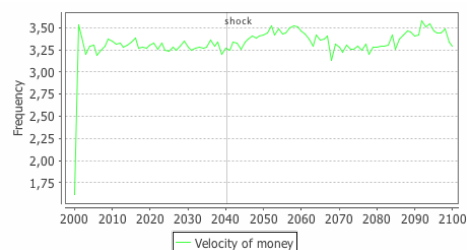
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires



(o) Inflation

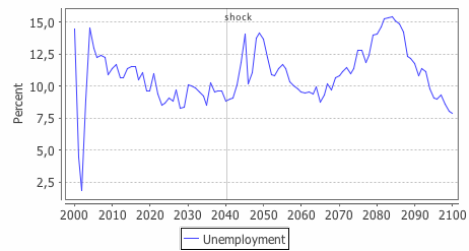


(p) Vitesse de la monnaie

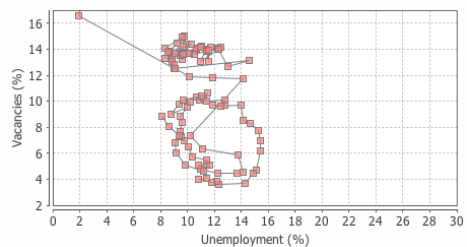
FIGURE 10.4 – Introduction d'un salaire minimum (Cas particulier) – Indicateurs bancaires et monétaires



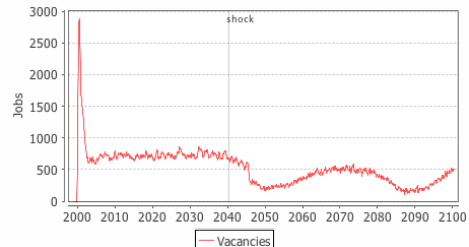
(q) Marché du travail



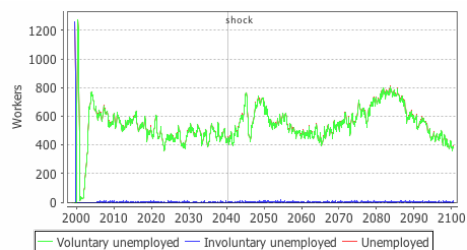
(r) Chômage



(s) Courbe de Beveridge



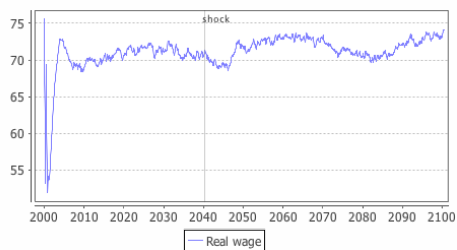
(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage



(v) Durée moyenne du chômage



(w) Salaire réel

FIGURE 10.4 – Introduction d'un salaire minimum (Cas particulier) – Indicateurs du marché du travail

Chapitre 11

Le motif de profit

An entrepreneur is interested, not in the amount of product, but in the amount of money which will fall to his share.

Keynes (1933 [1979])

Arrêtons-nous un instant dans l'exploration du modèle, et retournons-nous pour mesurer le chemin parcouru.

Nous avons construit un modèle d'économie de marché radicalement décentralisé, peuplé d'agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents. Ces agents agissent et interagissent par la création, l'échange et la destruction de grandeurs réelles (forces de travail, marchandises) et monétaires (créances, dépôts). Nos explorations ont montré qu'il existe, dans l'espace des paramètres, un large ensemble de valeurs pour lesquelles ce modèle est capable de se reproduire de période en période en présentant de fortes régularités, révélant l'existence de processus émergents de régulation homéostatique.

Parmi ces régularités, la stabilité de long terme de la répartition des revenus entre salaires et profits nous est paru particulièrement remarquable, parce qu'elle témoigne d'une coordination émergente entre la formation des prix sur le marché des biens et la formation des salaires sur le marché du travail et parce qu'elle paraît intimement liée à la stabilité générale du système. Nos explorations ont montré que la répartition des revenus est essentiellement déterminée par le rapport des vitesses des circuits *revenu-consumption* et *force de travail-marchandise*. Même si d'autres paramètres entrent en compte — ceux commandant le comportement de la banque dans l'exigence de remboursement des crédits, ceux commandant le comportement des ménages sur le

marché du travail — l'influence de ces paramètres paraît secondaire, du moins tant qu'on ne pousse pas ces paramètres jusqu'à des valeurs extrêmes déstabilisant non seulement la répartition des revenus mais avec elle l'ensemble du système économique.

Il est cependant un comportement auquel nous avons jusqu'ici prêté peu d'attention, et qui pourtant est susceptible de jouer un rôle essentiel dans la formation des profits : le comportement des entreprises pour la détermination des prix. Dans la version actuelle du modèle, l'objectif principal des entreprises est de maintenir le niveau des stocks à son niveau normal ; elles agissent pour cela non seulement sur le niveau de la production mais aussi sur le prix unitaire. Les entreprises déterminent donc leurs prix non en fonction d'un objectif de profitabilité, mais en fonction d'un objectif d'équilibre défini en termes réels¹.

Cependant, l'hypothèse d'entreprises raisonnant uniquement sur des volumes de marchandises est une hypothèse forte. Dans la réalité, les entreprises ont pour objectif principal la réalisation d'un profit, et ce profit est monétaire. Selon Keynes, c'est même la caractéristique essentielle d'une *économie d'entrepreneurs*². Une économie d'entrepreneurs n'est donc pas seulement une économie dans laquelle les entreprises réalisent des profits, mais encore une économie dans laquelle les entreprises ont pour objectif essentiel la réalisation du profit et agissent conformément à cet objectif.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de relâcher l'hypothèse d'entreprises orientées vers la gestion des flux réels pour la remplacer par l'hypothèse d'entreprises orientées vers la réalisation des profits supérieurs³.

Dans la section 11.1, nous étudions la question de la modélisation des comportements de recherche du profit dans le contexte d'incertitude imposé par les systèmes dynamiques complexes. Nous montrons comment les techniques de modélisation évolutionnaires peuvent apporter une réponse pertinente à cette question.

Dans la section 11.2, nous développons un algorithme évolutionnaire original par lequel les entreprises du modèle élaborent elles-mêmes leurs stratégies de fixation des prix pour tenter d'augmenter leurs profits.

1. On assiste donc à un renversement du paradoxe des profits : alors que dans les modèles classiques du circuit de la monnaie les entreprises veulent réaliser des profits sans le pouvoir, dans notre modèle les entreprises peuvent réaliser des profits sans le vouloir.

2. Voir Keynes (1933 [1979]), cité page précédente ainsi que dans le chapitre 3, page 61.

3. Le présent chapitre reprend une discussion déjà présentée dans Seppecher (2010b).

11.1 Prix et profits dans un contexte d'incertitude radicale

Nous avons déjà expliqué pourquoi, dans l'environnement d'une économie dynamique et complexe, il n'était pas possible de modéliser le comportement des agents par des procédures d'optimisation d'une fonction d'utilité : le modèle étant peuplé d'agents autonomes et concurrents, chacun des agents se trouve placé dans une situation d'*incertitude stratégique*. Nous avons alors décidé de nous appuyer sur la notion de rationalité procédurale et de construire des agents dont le comportement est formé d'un enchaînement d'heuristiques, c'est-à-dire de procédures simples et approximatives fonctionnant généralement de façon satisfaisante⁴.

C'est ainsi, en particulier, que nous avons développé une procédure simple de détermination des prix par les entreprises, fondée sur le principe d'ajustement du prix en fonction du niveau effectif des stocks rapporté à un niveau normal, défini de façon exogène. Pourtant, même si cette procédure fonctionne correctement au niveau microéconomique — les entreprises s'adaptent à des environnements macroéconomiques très variés et font des profits — et débouche sur des dynamiques macroéconomiques très intéressantes, nous n'en sommes pas satisfait parce qu'elle ne rend pas compte du *motif de profit* qui guide, dans le monde réel, les actions des entreprises. La question est donc de construire une heuristique de détermination des prix orientée vers la réalisation du profit.

11.1.1 Le markup, une heuristique post-keynésienne

L'apport de la microéconomie post-keynésienne

Encore une fois, la pensée post-keynésienne va nous offrir le cadre théorique dont nous avons besoin. Dans la microéconomie post-keynésienne, ce sont les entreprises qui fixent leur prix, en interaction avec un environnement composé d'entreprises concurrentes.

« Les entreprises sont interdépendantes, car les décisions des unes vont avoir des répercussions sur les autres. Les entreprises doivent tenir compte de leurs rivales, y compris leurs rivaux potentiels qui voudraient pénétrer leur marché. La planification joue un rôle substantiel et de nombreuses décisions stratégiques sont prises en fonction d'un horizon de long terme, notamment les décisions de prix. Dans ce cadre, les prix ne sont pas fixés

4. Voir la discussion sur la modélisation du comportement des agents, chapitre 2, page 35 et suivantes.

par le “marché” ou par un commissaire-priseur omnipotent. Ce sont les entreprises qui fixent les prix [...] Les prix n’apurent généralement pas les marchés: ils n’ont pas pour objectif d’égaliser l’offre et la demande. » (Lavoie 2004, p. 36)

De plus, la microéconomie post-keynésienne s’appuie sur la notion de temps historique⁵. La prise en compte, dans une économie monétaire, du temps historique et de la concurrence entre les agents, conduit à considérer que les entreprises sont placées dans un environnement radicalement incertain.

« [Dans une économie d’entrepreneur] aucun mécanisme automatique ne garantit que toute la monnaie versée aux inputs dans la production soit dépensée pour acquérir la production. Les entrepreneurs ne sont donc jamais certains de pouvoir récupérer tous les coûts monétaires de la production. » (Davidson 2003, p. 28)

Les incertitudes que doit affronter l’entreprise affectent ses décisions en matière de prix. Le prix ne peut pas être déterminé par un calcul de maximisation des profits (Kalecki 1971, p. 44). Pourtant, c’est bien l’objectif de réalisation du profit qui motive l’entreprise dans sa politique de prix.

« In fixing the price the firm takes into consideration its average prime costs and the prices of other firms producing similar products. The firm must make sure that the price does not become too high in relation to prices of other firms, for this would drastically reduce sales, and that the price does not become too low in relation to its average prime cost, for this would drastically reduce the profit margin. » (Kalecki 1971, p. 44-45)

Comme le souligne Van De Velde (2005, p. 116), l’entreprise fait face à une double contrainte, une contrainte de coût, connue de l’entrepreneur, et une contrainte de débouchés, qu’il ne peut qu’anticiper. Les coûts de production constituent un élément objectif de la fixation du prix par l’entreprise. Pour réaliser un profit, elle doit vendre à un prix supérieur à ses coûts. Le coût unitaire de la marchandise constitue donc la base objective sur laquelle l’entreprise va pouvoir fixer son prix en y ajoutant le markup qu’elle souhaite réaliser.

Nous avons avancé, mais le problème n’est pas résolu : la question s’est déplacée de la fixation du prix vers celle de la fixation du markup. Si la limite inférieure du markup est connue de l’entreprise — le markup doit être strictement positif pour que l’entreprise puisse espérer réaliser un profit — en revanche, la limite supérieure du markup lui paraît incertaine. Du point de vue de l’entreprise, le niveau de profit

5. Voir Lavoie (1987), cité dans la note 11 du chapitre 3, page 74.

susceptible de la *satisfaire* est indéterminé. Si ça ne tenait qu'à elle, elle n'aurait de cesse d'élever son markup et c'est en cela — et en cela seulement — que l'on peut dire qu'elle cherche à « maximiser » son profit.

« [...] firms are still conceived to be attempting to “maximize profits” in the sense that, in respect to particular choices, they prefer a more profitable to a less profitable alternative. » (Robinson 1962, p. 45)

Nous dirons donc que l'entreprise est *engagée dans la recherche de profits supérieurs*.

La contrainte qui vient s'opposer à l'obtention de profits supérieurs par l'élévation du markup est celle des débouchés. Si l'entreprise élève son prix trop loin au-dessus de ses concurrentes, elle s'expose à ne pas réussir à écouler sa marchandise ; si la marchandise n'est pas vendue, le profit ne peut être réalisé et, pire, l'existence de l'entreprise est menacée. Le markup est donc déterminée par l'entreprise en interaction avec ses concurrentes. Kalecki (1971, p. 45) résume cette interaction en intégrant la moyenne pondérée des prix de toutes les entreprises à la formule de détermination du markup individuel. Les difficultés que pose la démarche de Kalecki sont relevées par Taouil (2007).

« Prises individuellement, les firmes ne fixent pas activement le prix. Elles se limitent à l'ajuster en fonction d'une liste de prix centralisés. Les prix émergent dans ce contexte comme la résultante d'interactions conscientes entre les décisions coordonnées a priori. Un dispositif d'information est donc nécessaire à la formation des prix. L'initiative de fixation des prix est tributaire du prix moyen. [...] L'introduction de l'interdépendance à travers le prix moyen escamote l'incertitude dans laquelle se trouve chaque firme quant aux actions retenues par les autres. » (Taouil 2007, p. 4–5)

Les interactions entre agents déterminent le niveau du markup dans le modèle de Kalecki. En traitant ces interactions par un procédé réductionniste, Kalecki échoue à rendre compte de la décision individuelle de fixation des prix dans le contexte d'incertitude propre aux économies complexes.

Markup et modèles multi-agents

Le problème de la modélisation des décisions des entreprises se pose à tous les modèles macroéconomiques basés sur les agents. Parmi ces modèles, nombreux sont ceux qui utilisent une procédure de markup pour la fixation des prix.

Le modèle de Howitt (2008) : Dans ce modèle, si une procédure de markup est utilisée pour le calcul des prix, les entreprises n'ont pas la capacité de déterminer

elles-mêmes le niveau du markup qu'elles utilisent. C'est le modélisateur qui détermine lui-même l'intervalle des niveaux de markup possibles, dans l'objectif avoué de « donner une chance à un équilibre de maximisation des profits d'émerger si l'économie converge » (Howitt 2008, p. 171-172).

Pour notre part, nous doutons que l'on puisse parler ici d'émergence, dans la mesure où le modélisateur met le nez des entreprises sur la solution qu'il espère voir émerger. Une telle façon de modéliser le markup est incompatible avec le cadre que nous nous sommes fixé, puisque nous ne voyons pas pourquoi, dans une économie de marché décentralisée, peuplée d'entreprises autonomes et concurrentes, ces entreprises choisiraient exclusivement leurs niveaux de markup parmi un éventail fixé pour atteindre un objectif d'équilibre pré-déterminé.

Le modèle *Eurace* (2009) : Le modèle *Eurace* utilise lui aussi une procédure de markup mais curieusement cette utilisation ne semble pas pleinement assumée. Dawid, Gemkow, Harting, et Neugart (2009) préfèrent se référer à l'« analyse de point mort » (« break-even analysis ») et à la notion d'élasticité de la demande par rapport aux prix.

« [...] Assuming that all firms have constant expectations $\varepsilon_i^e < -1$ of the elasticity of their demand, they set the price according to the standard rule

$$p_{i,t} = \frac{c_{i,t-1}}{1 + \frac{1}{\varepsilon_i^e}}$$

where $c_{i,t-1}$ denotes unit costs in production of firm i in the previous period. » (Dawid, Gemkow, Harting, et Neugart 2009, p. 9)

Cette formule conduit tout simplement à calculer le nouveau prix grâce à un markup dont le niveau est constant et strictement positif. Dans la suite de l'article, les auteurs reconnaissent explicitement le recours au markup en abordant la question de la calibration du modèle.

« Our choice for the markup is based on the empirical evidence reported in Small (1997). We take the estimate for motor cycle production as a guideline for a markup of 20 percent. » (Dawid, Gemkow, Harting, et Neugart 2009, p. 13)

Le niveau du markup est en fin de compte défini de façon exogène, constante et uniforme, sur la base de données empiriques. La question de savoir pourquoi un tel niveau est adopté par les entreprises, si intéressante dans une perspective multi-agents, n'est pas abordée.

Le modèle de Dosi, Fagiolo, et Roventini (2008) Dans leur modèle de 2005, Dosi, Fagiolo, et Roventini utilisaient aussi un markup uniforme et constant (avec un niveau de 30%). En revanche dans leur modèle de 2008, l’usage du markup est plus élaboré. Tout d’abord, son usage est clairement assumé, justifié par l’évidence empirique. Le modèle comprend deux secteurs industriels. L’usage du markup diffère selon ces secteurs. Dans le secteur des biens de production, le markup est fixé de façon exogène (égal à 4% dans leur scénario de référence). En revanche, dans le secteur des biens de consommation, chaque entreprise dispose de son propre markup.

« Prices are set applying a variable markup (μ_j) on units costs of production:

$$p_j(t) = (1 + \mu_j(t))c_j(t)$$

Markup variations are regulated by the evolution of firm market shares (f_j):

$$\mu_j(t) = \mu_j(t-1) \left(1 + v \frac{f_j(t-1) - f_j(t-2)}{f_j(t-2)} \right)$$

with $0 \leq v \leq 1$. » (Dosi, Fagiolo, et Roventini 2008, p. 10-11)

Cette façon de modéliser la formation des prix est intéressante parce que, à la différence des précédentes, elle fait du markup un instrument de la concurrence entre les entreprises. Néanmoins le calcul de la part de marché de chaque entreprise suppose — comme la moyenne des prix de Kalecki — un dispositif d’information centralisée, ce qui est contradictoire avec notre approche des économies de marché⁶. De plus, même si cette routine est plus élaborée que les précédentes, elle est orientée vers un objectif qui n’est pas la réalisation du profit.

Le modèle *Eurace@Unibi* (2011) : Dans un papier récent, Dawid, Gemkow, Harting, van der Hoog, et Neugart (2011) présentent une nouvelle version du modèle *Eurace* dans laquelle les entreprises sont dotées d’une procédure de détermination des prix qui n’utilise pas la notion de markup. Cette fois-ci, les entreprises déterminent leur prix de façon autonome, dans l’objectif de maximiser leurs profits. Les entreprises se forgent une représentation de l’élasticité de la demande en sondant les réactions des consommateurs à différents prix proposés. Ces sondages ne donnent lieu à aucune transaction effective. Ce n’est qu’après avoir estimé la courbe de l’élasticité de la demande que les entreprises décident, par un calcul d’optimisation, du prix qu’elles vont réellement proposer pendant une année.

6. Nous rappelons que la première caractéristique du modèle que nous voulons construire est une *décentralisation radicale* (voir chapitre 2, page 20).

Par rapport aux procédures précédemment examinées, cette procédure présente l'intérêt d'une part de respecter l'autonomie des agents, d'autre part d'être orientée explicitement vers la réalisation du profit dans une situation concurrentielle. Selon nous cependant elle présente l'inconvénient d'être peu réaliste, trop complexe pour une efficacité incertaine, parce qu'elle reste attachée à la notion de maximisation. Les auteurs sont d'ailleurs conscients eux-mêmes des limites de cette procédure :

« However, due to the stochastic and complex nature of the model and the arising uncertainty of future developments this optimization procedure can only maximize the estimated profit of the firm. » (Dawid, Gemkow, Harting, van der Hoog, et Neugart 2011, p. 17)

Les procédures basées sur le markup nous paraissent à la fois beaucoup plus simples et réalistes, sous réserve que les entreprises soient capables de déterminer de façon autonome le niveau de markup qu'elles ont intérêt à pratiquer.

11.1.2 De l'agent réactif à l'agent cognitif

Nous sommes maintenant convaincu que la technique du markup ne résout pas, par elle-même, la question de la modélisation du motif de profit dans un environnement macroéconomique dynamique et complexe, et qu'elle doit être complétée d'une procédure décentralisée et concurrentielle de détermination du markup. La difficulté subsiste parce qu'il ne paraît pas possible de dessiner une telle procédure sous la forme d'une heuristique, c'est-à-dire d'une procédure suffisamment simple et approximativement satisfaisante.

Comme le soulignent Farmer et Geanakoplos (2009, p. 17) à propos des modèles de rationalité limitée, si l'introduction de règles simples pour modéliser le comportement des agents n'est pas satisfaisante, il existe une alternative : doter les agents de capacités d'apprentissage ou d'adaptation⁷. Nous avons, dès le début de la construction du modèle, décidé de le peupler d'agents réactifs, c'est-à-dire d'agents faiblement autonomes, dotés de procédures simples d'ajustement par rapport à des objectifs définis par un ensemble de « niveaux normaux », définis par des paramètres exogènes. Nous nous proposons maintenant de remettre en cause partiellement cette hypothèse et de doter les entreprises de capacités supérieures d'adaptation pour qu'elles déterminent *elles-mêmes* le niveau de markup dans l'objectif d'atteindre non un *profit maximal* — nous savons que c'est impossible — mais simplement un *profit supérieur*.

7. Voir la section dans laquelle nous discutons de la notion de rationalité limitée, chapitre 2, page 36.

L'approche évolutionnaire

L'approche évolutionnaire de Nelson et Winter (1982) nous offre le cadre théorique nécessaire à cet effort d'endogénéisation. Nous y retrouvons le rôle central du motif de profit, la volonté de rechercher un *profit supérieur*, et le rejet de la maximisation néoclassique.

« The firms in our evolutionary theory will be treated as motivated by profit and engaged in search for ways to improve their profits, but their actions will not be assumed to be profit maximising over well-defined and exogenously given choice sets. » (Nelson et Winter 1982, p. 4)

La notion de markup élaborée par Kalecki définit clairement les contraintes contradictoires auxquelles l'entreprise est soumise lorsqu'elle décide du prix unitaire de son produit. Pour accroître ses profits, l'entreprise doit élever le prix le plus possible au-dessus du coût de production. La difficulté vient du fait que l'entreprise ne sait pas et ne peut pas savoir où se trouve la limite supérieure du markup, sans en faire l'expérience — directement ou indirectement — par l'échec de l'écoulement du produit. Ce n'est donc que par une série d'adaptations successives que l'entreprise peut espérer se rapprocher de cette limite.

Pour Nelson et Winter (1982), le mécanisme de l'adaptation des entreprises est analogue à celui de la sélection naturelle darwinienne, avec pour critère de sélection la profitabilité⁸.

« [...] our firms are modeled as simply having, at any given time, certain capabilities and decision rules. Over time, these capabilities and rules are modified as a result of both deliberate problem-solving efforts and random events. And over time, the economic analogue of natural selection operates as the market determines which firms are profitable and which are unprofitable, and tends to winnow out the latter. » (Nelson et Winter 1982, p. 4)

Parce qu'il n'est pas possible de maximiser — c'est-à-dire d'atteindre avec certitude un optimum global stable — l'efficacité d'une règle de décision ne peut être que

8. Pour Cyert et March aussi, l'entreprise doit être considérée comme une organisation adaptative dont les règles de décision évoluent avec le temps sous la pression de l'environnement (Cyert et March 1963, p. 100–101, p. 103), mais le processus d'adaptation s'appuie sur le procédé du *renforcement* :

« Any decision rule that leads to a preferred state at one point is more likely to be used in the future than it was in the past; any decision rule that leads to a nonpreferred state at one point is less likely to be used in the future than it was in the past. » (Cyert et March 1963, p. 99)

relative. Elle est mesurée :

- *a posteriori*, une fois que l'entreprise a pris ses décisions et s'est présentée avec son offre sur le marché ;
- relativement à l'efficacité d'autres règles de décision, utilisées par d'autres entreprises ou par elle-même par le passé.

C'est l'itération du processus *action—évaluation—adaptation* qui va permettre à l'entreprise de faire évoluer ses règles de comportement dans l'objectif d'en améliorer l'efficacité. Un tel processus itératif constitue une *méta-heuristique*, notion couramment utilisée dans le domaine de la recherche opérationnelle et de l'intelligence artificielle pour la résolution de problèmes d'*optimisation difficile* (Dréo, Pétrowski, et Siarry 2011).

Les méta-heuristiques

La notion de *méta-heuristique* (Glover 1986) est un développement de la notion d'heuristique. Elle s'appuie sur des stratégies d'apprentissage pour explorer « intelligemment » l'espace de recherche.

« A meta-heuristic is an iterative generation process which guides a subordinate heuristic by combining intelligently different concepts for exploring and exploiting the search spaces using learning strategies to structure information in order to find efficiently near-optimal solutions. » (Osman et Kelly 1996, p. 3)

Les méta-heuristiques sont nombreuses et hétérogènes. Elles forment une classe de méthodes approximatives conçues pour affronter des problèmes d'optimisation difficile face auxquels les heuristiques classiques se sont montrées inefficaces. Elles offrent des cadres de travail généraux qui permettent la création de nouvelles procédures hybrides combinant différents concepts dérivés des heuristiques classiques, de l'intelligence artificielle, de l'évolution biologique, des réseaux de neurones et de la mécanique statistique (Osman et Kelly 1996). On peut classer ces méta-heuristiques dans deux grands groupes :

- Les méta-heuristiques à parcours : elles supposent l'exploration séquentielle de l'espace de recherche par un seul individu et donc une mémorisation des solutions et de leur efficacité relative. Les méthodes de *recherche tabou* appartiennent à ce premier groupe ;
- Les méta-heuristiques à population : elles supposent l'exploration parallèle de l'espace de recherche par un grand nombre d'individus et donc une communication des solutions et de leur efficacité relative. Les *algorithmes génétiques* appartiennent à ce second groupe.

Simuler l'apprentissage des agents par un parcours individuel de l'espace de recherche paraît difficile dans le cas de la modélisation d'une stratégie de fixation de prix. En effet, l'évaluation de la profitabilité d'une stratégie demande du temps. Si l'apprentissage de l'entreprise doit reposer uniquement sur sa propre expérience, le processus d'adaptation risque d'être trop lent pour un environnement que l'on sait dynamique et dans lesquels les solutions satisfaisantes sont susceptibles d'instabilité. De plus, ce processus d'apprentissage est très risqué puisque certaines erreurs — lorsque le prix choisi est trop élevé par rapport aux prix des concurrents — peuvent entraîner la faillite de l'entreprise⁹.

Parce que notre modèle est un modèle multi-agents, nous disposons déjà avec le secteur des entreprises d'une collection d'individus disponibles pour l'exploration parallèle de l'espace de recherche. C'est pourquoi nous nous orientons vers les méta-heuristiques à population pour simuler l'adaptation des entreprises. Parmi elles, les *algorithmes génétiques* sont les plus fréquemment utilisés en économie.

Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques développés à l'origine par Holland (1975)¹⁰ forment une classe de méta-heuristiques qui ont démontré leur efficacité dans des espaces de recherche larges et complexes où échouent les méthodes classiques d'optimisation (Duffy 2006, p. 989). Les propriétés des algorithmes génétiques — relativement simples à mettre en oeuvre, conçus pour l'optimisation difficile — font qu'ils sont fréquemment utilisés dans les modèles économiques à base d'agents multiples pour modéliser les processus d'apprentissage ou d'adaptation.

« Les AGs [algorithmes génétiques] correspondent en définitive à un algorithme d'exploration d'un espace de stratégies. Or, l'exploration devient une dimension importante de la dynamique économique dès que l'on quitte le cadre des anticipations rationnelles. La question de l'adaptation des anticipations et des choix des agents à l'évolution de leur environnement se pose alors. Du fait des mécanismes exploratoires simples et faciles à interpréter qu'ils proposent, les AGs peuvent être utilisés pour représenter ce processus adaptatif. Ils constituent alors une solution très intéressante pour un problème fondamental des modèles économiques avec des agents à rationalité limitée : la représentation de l'apprentissage

9. Nous devons garder à l'esprit le fait que « les propriétaires des entreprises, autant que leurs cadres, sont préoccupés par la survie à long terme de l'entreprise. Ils vont développer objectifs et stratégies afin d'assurer la pérennité de leur entreprise. » (Lavoie 2004, p. 36)

10. Voir chapitre 2, page 29.

des agents. Cette représentation tient de plus compte d'une dimension importante de l'activité économique : l'hétérogénéité des processus d'apprentissage et des anticipations des agents. » (Vallée et Yildizoglu 2001, p. 15)

Avec l'aide d'un algorithme génétique, on peut permettre à chacun des agents qui peuplent le modèle de faire évoluer ses règles de décisions en fonction de la performance de ces règles. Les agents ne sont plus de simples agents réactifs, au comportement figé par des règles imposées de l'extérieur, mais des agents cognitifs capables de tirer des enseignements des expériences passées. Selon Arifovic (2000), l'utilisation des algorithmes génétiques est particulièrement pertinente pour modéliser les processus d'adaptation des agents dans un contexte macroéconomique.

« There are several advantages to modeling adaptation in this way. These algorithms impose low requirement on the computational ability of economic agents. They allow for modeling the heterogeneity of agents' beliefs. Survival of decision rules depends on their performance, measured by the payoff that agents receive by employing them. Also, these algorithms perform better than models with rational agents or alternative models of adaptive behavior in terms of their ability to explain the features observed in experimental economies, as well as some of the features of the actual macroeconomic time series. » (Arifovic 2000)

En résumé, grâce aux algorithmes génétiques, il semble possible de modéliser une grande variété de comportements et d'observer l'émergence de solutions endogènes aux problèmes d'optimisation difficile posés par les environnements macroéconomiques complexes. Nous décidons donc de nous inspirer des algorithmes génétiques pour permettre aux entreprises qui peuplent notre modèle de développer elles-mêmes des stratégies de fixation des prix orientées vers la réalisation d'un profit supérieur.

11.2 Un modèle évolutionniste de fixation des prix

Même si nous voulons introduire dans le comportement des entreprises une procédure basée sur le markup pour simuler un comportement orienté vers la réalisation de profits supérieurs, nous ne sommes pas certain que cette procédure soit effectivement supérieure à la procédure actuelle basée sur l'observation du niveau des stocks. En effet, cette procédure a constitué jusqu'à présent une heuristique satisfaisante pour la fixation des prix dans notre modèle. Bien que cette procédure ne soit pas explicitement orientée vers la réalisation du profit, nous avons observé qu'elle permet aux entreprises qui l'utilisent de réaliser en moyenne des profits.

C'est pourquoi, plutôt que d'abandonner cette procédure pour la remplacer par une autre basée sur la technique du markup, nous proposons au contraire d'utiliser le principe de l'algorithme génétique pour mettre ces deux procédures en concurrence ; les entreprises auront la liberté de choisir elles-mêmes la procédure qui leur apparaîtra la plus profitable et même de pouvoir combiner ces deux procédures pour construire des stratégies hybrides de fixation de prix.

Nous décidons d'utiliser aussi le principe de l'algorithme génétique pour déterminer le niveau du markup utilisé par la nouvelle stratégie. Chaque entreprise aura son propre niveau de markup, qu'elle pourra faire évoluer librement en fonction des profits réalisés.

11.2.1 Modélisation des stratégies

Les entreprises ont le choix entre deux procédures de détermination des prix, l'une nommée *demand-based-pricing*, l'autre *cost-plus-pricing*. Les entreprises cherchent à augmenter leur profitabilité en explorant différentes stratégies combinant ces deux méthodes. Nous dotons les entreprises de capacité d'imitation et d'innovation. Les entreprises les moins profitables abandonnent leur stratégie et la remplacent par de nouvelles stratégies imitant et dépassant les stratégies d'entreprises plus profitables.

Procédure du *demand-based-pricing*

Nous nommons *demand-based-pricing* une procédure d'ajustement du prix basée sur la demande constatée, rapportée à la production de l'entreprise et mesurée par l'observation du niveau des stocks de l'entreprises. C'est la procédure utilisée jusqu'à présent par les entreprises ; elle est décrite dans le chapitre 4 (page 118).

Procédure du *cost-plus-pricing*

Nous introduisons une procédure alternative de détermination des prix, que nous nommons *cost-plus-pricing*. Comme la procédure du *demand-based-pricing*, c'est une procédure basée sur le principe de l'ajustement. Pour chaque entreprise i , le prix de la période ($P_{i,t}$) est déterminé par une variation à la hausse ou à la baisse ($\delta_{i,t}^P$) du prix de la période précédente ($P_{i,t-1}$). Cette variation est basée sur l'observation des coûts de production et la notion de markup.

Etape 1 : Observation Le département des prix de l'entreprise i commence par calculer le coût de production unitaire de la marchandise en stock ($UC_{i,t}$)¹¹. Puis, il calcule un objectif de prix ($P_{i,t}^*$) en appliquant un markup (μ_i) au coût de production de la marchandise :

$$P_{i,t}^* = (1 + \mu_i) UC_{i,t} \quad (11.1)$$

Cet objectif de prix est comparé au prix de la période précédente ($P_{i,t-1}$).

Etape 2 : Proposition Si un écart est constaté, un ajustement du prix ($\tilde{\delta}_{i,t}^P$) est proposé. Un prix inférieur à l'objectif conduit le département des prix à proposer une augmentation du prix. Inversement un prix supérieur à l'objectif conduit le département des prix à proposer une baisse du prix. L'ampleur de l'ajustement proposé est aléatoirement déterminé dans l'intervalle $[0, \nu_F^P]$.

$$\tilde{\delta}_{i,t}^P = \begin{cases} \alpha \nu_F^P & \text{si } P_{i,t-1} - P_{i,t}^* < 0, \\ -\alpha \nu_F^P & \text{sinon.} \end{cases} \quad (11.2)$$

La variable α est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$. Le paramètre ν_F^P est un paramètre exogène définissant la flexibilité mensuelle maximale du prix, paramètre déjà utilisé par la procédure du *demand-based-pricing*.

Etape 3 : Décision Le département des prix soumet sa proposition d'ajustement à la direction de l'entreprise, qui l'accepte ou la rejette.

$$\delta_{i,t}^P = \begin{cases} \tilde{\delta}_{i,t}^P & \text{si } \alpha\beta < \left| \frac{P_{i,t-1} - P_{i,t}^*}{P_{i,t}^*} \right|, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (11.3)$$

La variable β est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$.

Etape 4 : Ajustement Le prix est ensuite ajusté.

$$P_{i,t} = P_{i,t-1} + \delta_{i,t}^P \quad (11.4)$$

Cette procédure de fixation des prix est donc très proche du markup classique. Simplement, l'ajustement du prix n'est pas instantané — on introduit une certaine *viscosité* des prix qui vient ralentir l'ajustement. Nous suivons ici Lavoie :

11. Voir le calcul du coût unitaire de la marchandise, chapitre 4, équation 4.53, page 126.

« Lorsque les coûts changent, il se peut que la marge bénéficiaire plutôt que le prix change. Tout dépend des stratégies poursuivies par les entreprises à chaque moment du temps. De fait, les travaux de Coutts, Godley, et Nordhaus (1978) et ceux de Sylos Labini (1971) montrent que les entreprises ne répercutent les hausses de coût unitaire qu’elles subissent que de façon graduelle. » (Lavoie 2004, p. 49)

Nous respectons ainsi le cadre général de modélisation des comportements que nous nous sommes fixés¹². Enfin, ainsi dessinée, la procédure du *cost-plus-pricing* est suffisamment proche de celle du *demand-based-pricing* pour pouvoir être combinée avec elle dans une « stratégie » unique.

Choix de la procédure utilisée

Nous avons décidé de laisser aux entreprises la possibilité de choisir entre la procédure du *demand-based-pricing* et la procédure du *cost-plus-pricing*, et même de les combiner. La difficulté est que, selon la situation, les deux procédures peuvent conduire à des décisions de variation de prix compatibles ou contradictoires. L’existence de contradictions internes aux entreprises, du fait de l’existence de départements distincts aux objectifs distincts, est soulignée par Cyert et March (1963) :

« [...] we assume that the coalition represented in an organization is a coalition of members having different goals. We require some procedure for resolving such conflict [...] Basically we have argued that most organizations most of time exist and thrive with considerable latent conflict of goals. Except at the level of nonoperational objectives, there is no internal consensus. The procedures for “resolving” such conflict do not reduce all goals to a common dimension or even make them obviously internally consistent. » (Cyert et March 1963, p. 117)

Nous supposons que les entreprises comportent deux groupes défendant des objectifs distincts lors de l’ajustement des prix :

- un groupe qui a pour objectif de maintenir un niveau de markup effectif et qui recommande l’utilisation de la procédure du *cost-plus-pricing* ;
- un groupe qui a pour objectif de maintenir les stocks à leur niveau normal et qui recommande l’utilisation de la procédure du *demand-based-pricing*.

Nous supposons que la direction de chacune des entreprises a tendance à suivre plus ou moins volontiers les recommandations de chacun des deux groupes.

Notons :

12. Voir la discussion de la modélisation du comportement des agents, chapitre 4, page 101 et suivantes.

- $\Psi_{i,t}$ la procédure de détermination du prix utilisée par l'entreprise i à la période t ,
- σ_i la propension de l'entreprise i à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing*¹³.

A chaque période t , la direction de l'entreprise i choisit la procédure de détermination des prix $\Psi_{i,t}$ qu'elle va utiliser au cours de cette période :

$$\Psi_{i,t} = \begin{cases} \textit{cost-plus-pricing} & \text{si } \alpha < \sigma_i, \\ \textit{demand-based-pricing} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (11.5)$$

La variable α est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$. On voit que :

- si $\sigma_i = 0$ l'entreprise utilisera exclusivement la procédure du *demand-based-pricing* ;
- si $\sigma_i = 1$ elle utilisera exclusivement la procédure du *cost-plus-pricing* ;
- si $\sigma_i = 0.5$ elle aura une probabilité égale d'utiliser l'une ou l'autre des deux procédures.

Codage des stratégies

Notons Φ_i la stratégie de fixation des prix de l'entreprise i . Cette stratégie est donc définie par deux paramètres réels :

$$\Phi_i \begin{cases} \mu_i & \text{le markup utilisé dans la procédure du } \textit{cost-plus-pricing}, \\ \sigma_i & \text{la propension à utiliser la procédure du } \textit{cost-plus-pricing}. \end{cases} \quad (11.6)$$

Ces paramètres constituent en quelque sorte le « patrimoine génétique » de l'entreprise¹⁴. C'est ce « patrimoine génétique » qui doit être soumis à un algorithme génétique pour modéliser les capacités d'apprentissage des entreprises.

Historiquement, les algorithmes génétiques privilégient un codage binaire des paramètres soumis au processus de sélection. Or, le codage binaire ne se justifie pas dans tous les cas.

« Pour des problèmes d'optimisation dans des espaces de grande dimension, le codage binaire peut rapidement devenir mauvais. Généralement, chaque variable est représentée par une partie de la chaîne de bits et la

13. La propension de l'entreprise i à utiliser la procédure du *demand-based-pricing* est donc égale à $1 - \sigma_i$

14. Pour Nelson et Winter (1982, p. 142) : « The tendency for such routines to be maintained over time plays in our theory the role that genetic inheritance plays in the theory of biological evolution. »

structure du problème n'est pas bien reflétée, l'ordre des variables ayant une importance dans la structure du chromosome alors qu'il n'en a pas forcément dans la structure du problème. Les algorithmes génétiques utilisant des vecteurs réels [...] évitent ce problème en conservant les variables du problème dans le codage de l'élément de population sans passer par le codage binaire intermédiaire. La structure du problème est conservée dans le codage. » (Alliot et Durand 2005, pp. 2-3)

Dans notre cas, les deux paramètres définissant la stratégie de l'entreprise sont des variables réelles et c'est ainsi que nous choisissons de les coder. Ce faisant, nous prenons une première liberté par rapport à la métaphore biologique sur laquelle s'appuie les algorithmes génétiques pour nous rapprocher des « stratégies évolutives », technique très voisine mais que nous jugeons plus adaptée à la modélisation de la dynamique de comportements économiques et sociaux.

« In the field of technical optimisation, genetic algorithms and evolutionary strategies are still used for different applications, contrastingly, computational economists only use genetic algorithms. The literature does not provide a reason for this neglect of evolutionary strategies. Originally there has been one major difference between the two approaches: evolutionary strategies require the variables that are to be optimised to be real values, while genetic algorithms require a binary coding. This had, of course, some consequences for the modelling of mutations and crossovers. [...] Hence, the coding of variables is the basic difference between genetic algorithms and evolutionary strategies. Therefore, in technical optimisation, which of the two approaches are used depends on which coding is more adequate for the given problem. In contrast, in economics only genetic algorithms are used and recently authors have started to adapt genetic algorithms to the use of real values instead of the binary coding. It seems as if computational economics are simply throwing away half the available options. » (Brenner 2006, p. 916)

11.2.2 Evaluation

Selon la terminologie propre aux algorithmes génétiques, on nomme *fitness* (efficacité) la fonction que l'algorithme doit maximiser. Dans notre cas, l'objectif du processus d'adaptation auquel sont soumises les entreprises est simplement d'en améliorer la profitabilité. Comme dans la version actuelle du modèle toutes les entreprises sont de même taille, la profitabilité de l'entreprise i à la date t est simplement la

somme des dividendes D_i versés par l'entreprise au cours des d_F^Φ derniers mois¹⁵. La durée d'évaluation d_F^Φ doit être suffisamment grande pour que la profitabilité reflète l'efficacité moyenne de la stratégie de l'entreprise plutôt que les aléas de court terme, mais pas trop grande pour permettre à l'entreprise de modifier sa stratégie assez fréquemment.

Lorsque la stratégie d'une entreprise est trop récente pour être évaluée (soit parce que l'entreprise a modifié sa stratégie depuis moins de d_F^Φ mois, soit parce que l'entreprise elle-même a été créée il y a moins de d_F^Φ mois) l'entreprise est exclue du processus d'adaptation. Non seulement elle-même n'évolue pas, mais elle est ignorée des entreprises soumises au processus d'adaptation — c'est-à-dire qu'elles ne la prennent pas comme modèle. Dès que l'âge de la stratégie dépasse d_F^Φ , elle réintègre le processus d'adaptation.

11.2.3 Sélection

L'opérateur de sélection est un opérateur important des algorithmes génétiques classiques. C'est cet opérateur qui détermine quels individus de la population vont *survivre*, lesquels vont *se reproduire*, lesquels vont *disparaître*.

Il faut souligner que dans notre cas, les individus soumis au processus de sélection ne sont pas des êtres vivants, ni même des organisations, mais des stratégies. La métaphore darwinienne de la sélection naturelle rencontre donc une nouvelle limite : ici, l'opérateur de sélection détermine les stratégies qui seront *conservées*, celles qui seront *imitées*, celles qui seront *abandonnées*¹⁶.

Opérateur de sélection

Une méthode de sélection fréquemment utilisée est celle de la *roue de loterie biaisée*¹⁷ (« roulette wheel selection »). Avec cette méthode, la probabilité de survivre et de se reproduire de chaque individu est directement proportionnelle à son efficacité relative au sein de la population.

15. Cette mesure de la profitabilité est évidemment très simpliste et il faudra la remplacer par des ratios plus élaborés dans les futures versions du modèle. Néanmoins, tant que nous utilisons des entreprises de taille fixe et égale, la somme des dividendes constitue un indicateur direct de la profitabilité.

16. « That processes of innovation and imitation bring about change in firm's routines should be kept in mind when thinking about economic selection : it is important to distinguish between selection on firms and selection on routines. » (Nelson et Winter 1982)

17. Voir la présentation de cette méthode, chapitre 4, note 20, page 99.

Une autre méthode est celle du *tournoi* (« tournament selection »). Avec cette méthode, un petit groupe d'individus est sélectionné au hasard. Leur efficacité est comparée. Les individus les plus efficaces du groupe sont autorisés à se reproduire, tandis que les moins efficaces sont éliminés.

C'est de cette seconde méthode que nous nous inspirons pour la conception de l'opérateur de sélection, parce que son usage est adaptée à la modélisation d'un apprentissage social décentralisé, alors que la méthode de la roue de lotterie biaisée repose sur l'hypothèse implicite d'une confrontation de chaque individu avec tous les autres.

Implémentation

La taille du groupe d'individus sélectionnés pour participer au tournoi est un facteur important. Plus il est grand, plus il est sélectif, donc plus efficace à court terme, mais cette efficacité s'obtient au détriment de l'hétérogénéité de la population. De plus, augmenter la taille de la sélection revient à confronter directement un plus grand nombre d'individus, et donc à se rapprocher d'un modèle d'apprentissage centralisé.

Notons a et b les entreprises les plus profitables d'une sélection, c l'entreprise la moins profitable de cette sélection. Notons Φ_a , Φ_b et Φ_c les stratégies de fixation des prix de chacune de ces entreprises. Toutes les entreprises de la sélection sont satisfaites de leur stratégie — ce n'est sans doute pas la meilleure, mais ce n'est pas la pire — à l'exception de l'entreprise c . L'entreprise c va abandonner sa stratégie et adopter une nouvelle stratégie inspirée des stratégies Φ_a et Φ_b .

11.2.4 Imitation

Par l'imitation des stratégies dont elle observe la supériorité¹⁸, l'entreprise la moins efficace de la sélection tente d'améliorer ses propres résultats. Si l'entreprise c imitait simplement l'un ou l'autre des individus les plus efficaces de la sélection,

18. Dans le monde réel, quels sont les vecteurs utilisés pour la diffusion des stratégies parmi les entreprises ? Pour Cyert et March (1963) les transferts d'employés jouent un rôle important : « Through recruitment and selection, many employees come to a firm with established task performance rules [. . .] Although some obvious examples of such pretraining can be found in the case of employees working in the standard craft areas, such a phenomenon is not limited to what are commonly called “blue collar” activities. When a business firm hires an accountant, a dietetician, a doctor, or a sanitary engineer, it hires not only an individual but also a large number of standard operating procedures that have been trained into the new member of the organization by outside agencies. »

aucune stratégie nouvelle ne pourrait être atteinte et on observerait une convergence progressive vers le meilleur individu de la population dont la stratégie ne pourrait être dépassée. Or l'individu le plus efficace de la sélection n'est pas nécessairement l'individu le plus efficace possible; une meilleure solution existe peut-être ailleurs dans l'espace des solutions.

« There is no reason to believe that at any time the “habitual reactions” of extant firms include the reaction patterns that are the best in a broader set of possibilities. » (Nelson et Winter 1982, p. 142)

Opérateur de croisement

L'opérateur de croisement d'un algorithme génétique associe deux individus efficaces (« parents ») pour donner naissance à un troisième (« offspring ») qui combine leurs caractéristiques pour une efficacité qu'on espère supérieure. S'il existe de très nombreuses façons de combiner les caractéristiques des parents, toutes se résument à des procédures d'exploration stochastique de l'espace des solutions, exploration locale aux alentours de l'intervalle séparant les deux parents. Cette exploration locale est souvent nommée *exploitation*, parce qu'elle exploite les informations données par la position des parents dans l'espace des solutions, le terme d'*exploration* désignant alors plutôt l'exploration lointaine de l'espace des solutions.

La métaphore génétique a conduit les pionniers de la discipline à utiliser des procédures inspirées du *crossover* des chromosomes pour créer un individu héritant des caractéristiques de chacun des parents. S'appuyant sur un codage binaire, l'utilisation de telles procédures paraît très difficile à justifier pour la modélisation de l'adaptation d'agents tels que des entreprises.

« Recoding non-binary values binary and using genetic algorithms thereafter, as it is sometimes done in literature, seem to be inadequate since it increases the distortion between psychological knowledge on learning and the dynamics of the resulting model. » (Brenner 2006, p. 940)

Comme nous avons choisi un codage réel des paramètres, nous décidons de construire un opérateur de croisement à codage réel, basé sur la moyenne des caractéristiques des parents.

Implémentation

On calcule la stratégie Φ_g , barycentre des stratégies Φ_a et Φ_b , pondérées par un facteur α :

$$\Phi_g = \alpha\Phi_a + (1 - \alpha)\Phi_b \quad (11.7)$$

La variable α est une variable aléatoire déterminée à chaque utilisation selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$. La stratégie Φ_g est donc aléatoirement située, dans l'espace des paramètres définissant les stratégies des entreprises, sur le segment de droite $[\Phi_a, \Phi_b]$. La présence du facteur aléatoire α permet d'accroître la diversité des stratégies générées en explorant l'intervalle des stratégies intermédiaires entre les deux stratégies modèles.

On voit alors qu'il est raisonnable pour l'entreprise c de considérer les deux meilleures stratégies de la sélection, et non pas seulement la meilleure :

- Si les stratégies Φ_a et Φ_b se situent approximativement dans la même direction par rapport à Φ_c , l'information paraît fiable et la stratégie Φ_g sera elle-même située dans la même direction prometteuse ;
- En revanche, si les stratégies Φ_a et Φ_b se situent dans des directions opposées ou quasi opposées par rapport à Φ_c , il n'y a pas de direction claire à suivre. L'entreprise c est dans l'incertitude et cette incertitude se reflétera dans le choix de la stratégie Φ_g qui aura moins de chance de s'écarter de Φ_c .

11.2.5 Innovation

Si l'entreprise c adoptait simplement la stratégie Φ_g ainsi définie, la population des entreprises ne pourrait jamais explorer les stratégies situées en dehors de l'enveloppe convexe des stratégies existantes. Le croisement des stratégies les plus profitables permet l'exploration locale de l'espace des solutions, mais non l'exploration lointaine ou globale. S'il existe des stratégies supérieures « loin » de l'ensemble des stratégies actuellement utilisées par les entreprises — soit du fait de la répartition initiale des stratégies, soit parce que la dynamique du système a modifié la profitabilité relative des stratégies — alors elle ne pourra jamais être atteinte au moyen d'un simple opérateur de croisement. Par conséquent, les entreprises doivent non seulement imiter, mais aussi innover en inventant des stratégies qui se détachent des stratégies existantes.

« To fill in the ranks of behavior patterns decimated by competitive struggles of earlier times, or to make possible the appearance of entirely new patterns, some mechanism analogous to genetic mutation must be posited. Otherwise, selection can only bring about the dominance of the best of the patterns that started the contest, or even the less maladapted of the survivors of some early stage. » (Nelson et Winter 1982, p. 142)

Opérateur de mutation

Dans un algorithme génétique classique, c'est le rôle de l'opérateur de mutation que de permettre l'exploration de solutions que l'opérateur de croisement n'aurait pas permis d'atteindre (Vallée et Yildizoglu 2001, p. 6). Toutefois, on associe généralement une probabilité faible à l'opérateur de mutation d'un algorithme génétique classique (Vallée et Yildizoglu 2001, Chinneck 2006). En effet, comme l'algorithme génétique classique est conçu pour la recherche de l'optimum global d'une fonction statique, une de ses qualités essentielles doit être sa capacité à converger. L'opérateur de mutation, s'il est trop puissant, peut contrarier la convergence de l'algorithme.

« [...] dans les problèmes à variable réelle, l'opérateur de mutation consiste généralement à ajouter un bruit gaussien à l'élément de population concerné. Le problème est de bien choisir ce bruit gaussien. S'il est trop petit, les déplacements dans l'espace sont insuffisants en début de convergence, et l'algorithme peut rester bloqué dans un optimum local. Si le bruit est trop fort, [l'algorithme génétique] trouvera certes une zone contenant l'optimum, mais sera incapable de converger localement. » (Alliot et Durand 2005, p. 16)

La solution générale consiste donc à privilégier la recherche locale (*l'exploitation*) au détriment de la recherche globale (*l'exploration*) en affaiblissant l'opérateur de mutation et à définir au mieux la population initiale en s'efforçant de cerner la solution recherchée. Si on ne sait pas où se trouve la solution, il faut alors répartir cette population le plus largement possible dans l'espace de recherche.

« Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche. » (Alliot et Durand 2005, p. 1)

En somme, la capacité de recherche globale d'un algorithme génétique classique dépend plus de la répartition initiale de la population que de l'opérateur de mutation. Par conséquent, cette capacité s'affaiblit nécessairement au fur et à mesure de la convergence de l'algorithme. Cette perte de capacité ne constitue pas un grand inconvénient lorsque l'algorithme est utilisé comme méthode de recherche d'optimum dans un paysage complexe mais figé : si l'algorithme converge c'est qu'il a identifié une zone de l'espace de recherche où se trouve une solution ; par conséquent il vaut mieux concentrer les efforts de recherche dans cette zone que sur l'ensemble de l'espace — c'est le principe même de l'algorithme génétique.

En revanche cette perte de capacité de recherche globale devient selon nous franchement rédhibitoire lorsque l'algorithme est utilisé pour modéliser les capacités d'adaptation d'une population d'agents autonomes en concurrence dans un environnement macroéconomique. En effet, l'environnement macroéconomique des agents n'est pas figé — ce n'est pas une fonction donnée, même très compliquée, à optimiser — c'est au contraire un environnement dynamique, dont les propriétés dépendent des comportements des agents.

« In macroeconomic environments, agents' heterogenous beliefs and decisions affect the levels of endogenously determined prices which in turn affect agents' payoffs and performance of different decision rules over time. This self-referential character of these economies is the main distinction between these environments and other economic applications of these algorithms. » (Arifovic 2000, p. 2)

Le caractère dynamique de l'environnement macroéconomique est renforcé si les agents, au lieu d'être simplement réactifs — c'est-à-dire dotés de règles de comportement stables — tentent de s'adapter à cet environnement en modifiant leurs règles de comportement.

« If heterogeneous agents (or heterogeneous strategies or expectations) adjust continually to the overall situation they together create, then they adapt within an "ecology" they together create. And in so adapting, they change that ecology. » (Arthur 2006, p. 1556)

L'introduction de capacités d'apprentissage des agents — dont le but était de permettre aux agents de s'adapter à un environnement dynamique et complexe — s'avère être un facteur d'accroissement de la complexité du système, qui évolue avec les agents qui le composent.

« The rugged nature of this landscape is its complexity, a complexity that is multiplied if it too is changing, perhaps as a function of the strategic complexity that occurs if the design has also to account for the interacting agents' patterns of behavior changing as a result: the biologist's *co-evolution*. » (Marks 2006, p. 1345)

Cette co-évolution permanente du système et des agents qui le composent vient renforcer le contexte d'incertitude radicale. Les termes du problème posé aux agents sont sans cesse renouvelés par l'action même des agents pour résoudre le problème. Les algorithmes génétiques, conçus à l'origine pour la recherche d'optimum global dans un espace de solutions complexe mais stable, rencontrent ici leur limite. En effet, si l'algorithme n'est capable de converger qu'une seule fois, alors les agents qui peuplent le modèle sont adaptatifs au début de la simulation, puis perdent cette

capacité avec le temps. Or rien ne garantit l'existence d'un optimum global stable dans une macroéconomie dynamique et complexe.

« [...] even habitual reactions that are close to maximizing under one set of economic conditions may not be under another. Thus, in models involving an extended process of selection among an initial set of behavioral routines, firms whose behavior would be profit maximizing under conditions of a given time may be eliminated by competition at an earlier stage, under conditions for which their behavior was not optimal. »
(Nelson et Winter 1982, p. 142)

Si l'on veut que les capacités d'adaptation des agents soient maintenues tout au long de la simulation, les processus de convergence doivent être réversibles. Une telle réversibilité paraît très difficile à obtenir à l'aide d'un opérateur de mutation classique avec bruit gaussien. Parce qu'elle conduit à déléguer l'exploration de l'espace des paramètres à un opérateur de mutation strictement stochastique, nous devons (une nouvelle fois) faire l'effort de nous dégager de la métaphore génétique.

La méthode du simplexe de Nelder-Mead

Pour sortir du dilemme *exploration* contre *exploitation*, nous proposons d'utiliser un nouvel opérateur de mutation inspiré de l'algorithme du simplexe de Nelder et Mead (1965). Cet algorithme est une méthode de recherche robuste, facile à programmer et rapide (Chelouah et Siarry 2003, p. 337). Surtout, il présente deux caractéristiques communes avec les algorithmes génétiques (Durand et Alliot 1999, p. 1) :

- il est basé sur une population de points plutôt que sur un point unique ;
- c'est un algorithme de recherche directe.

Du fait des caractéristiques communes de l'algorithme du simplexe avec les algorithmes génétiques, on ne compte pas les tentatives de construire des algorithmes hybrides associant les deux méthodes¹⁹. Néanmoins, la méthode du simplexe est généralement utilisée pour renforcer les capacités de recherche locale de l'algorithme, tandis que la recherche globale reste confiée à l'algorithme génétique. Nous proposons au contraire définir un opérateur de recherche globale plus « intelligent » que l'opérateur de mutation gaussien propre aux algorithmes génétiques traditionnels, en empruntant à la méthode du simplexe les principes de ses principaux opérateurs (*réflexion, expansion, contraction*)²⁰.

19. Voir par exemple Renders et Flasse (1996), Durand et Alliot (1999), Chelouah et Siarry (2003).

20. Desell, Szymanski, et Varela (2008) développent un algorithme hybride très proche de celui que nous proposons ici, bien que pour un usage complètement différent : la modélisation de la Voie

Implémentation

On calcule la stratégie Φ'_c , image de la stratégie Φ_c par une homothétie de centre Φ_g et de rapport $-k$, k étant une variable aléatoire suivant une loi exponentielle. La variable k est recalculée à chaque utilisation. La figure 11.1 (page 311) donne une représentation de la procédure d'adaptation d'une stratégie dans un espace à deux dimensions.

Par rapport à l'opérateur de mutation d'un algorithme génétique classique, le nouvel opérateur que nous venons de définir comporte deux améliorations importantes, apportées par le principe de *réflexion* emprunté à l'algorithme du simplexe :

- Il oriente la recherche : alors que l'opérateur de mutation basé sur un bruit gaussien exerce son action dans toutes les directions, notre opérateur oriente la recherche dans une direction privilégiée. En adoptant la stratégie Φ'_c , l'entreprise c fait l'hypothèse que les entreprises a et b lui donnent la direction dans laquelle existent des stratégies supérieurement profitables.
- Il adapte l'amplitude de la recherche : plus la stratégie Φ_c est éloignée du barycentre Φ_g de ses modèles Φ_a et Φ_b , plus l'agent c aura tendance à chercher sa nouvelle stratégie loin au-delà de Φ_g . Inversement, si la distance entre Φ_c et Φ_g est faible, la recherche sera plus locale.

Néanmoins, le principe de *réflexion*, s'il est basé sur une homothétie de rapport $-k$ constant, est insuffisant. Avec $k < 1$, l'algorithme connaît une perte « d'énergie » à chaque adaptation, la convergence est irréversible. Inversement, avec $k > 1$, le niveau « d'énergie » de l'algorithme croît à chaque adaptation, la convergence est impossible.

L'algorithme de Nelder-Mead intègre des opérateurs supplémentaires d'*expansion* et de *contraction* lui permettant d'adapter dynamiquement son « énergie » exploratoire à la situation. Dans notre algorithme, l'introduction de la variable stochastique k vient jouer ce rôle en dotant l'opérateur de mutation de capacités d'*expansion* (lorsque $k > 1$) et de *contraction* (lorsque $k < 1$). La variable k peut être considérée comme la mesure de l'audace de l'entreprise, audace qui l'amène à dépasser la stratégie modèle Φ_g .

Gestion des contraintes

Tel que nous l'avons défini, l'opérateur de mutation peut conduire à l'invention de stratégies non admissibles.

« [...] en cherchant un maximum faisable, l'algorithme génétique peut au

Lactée au moyen de calcul distribué volontaire.

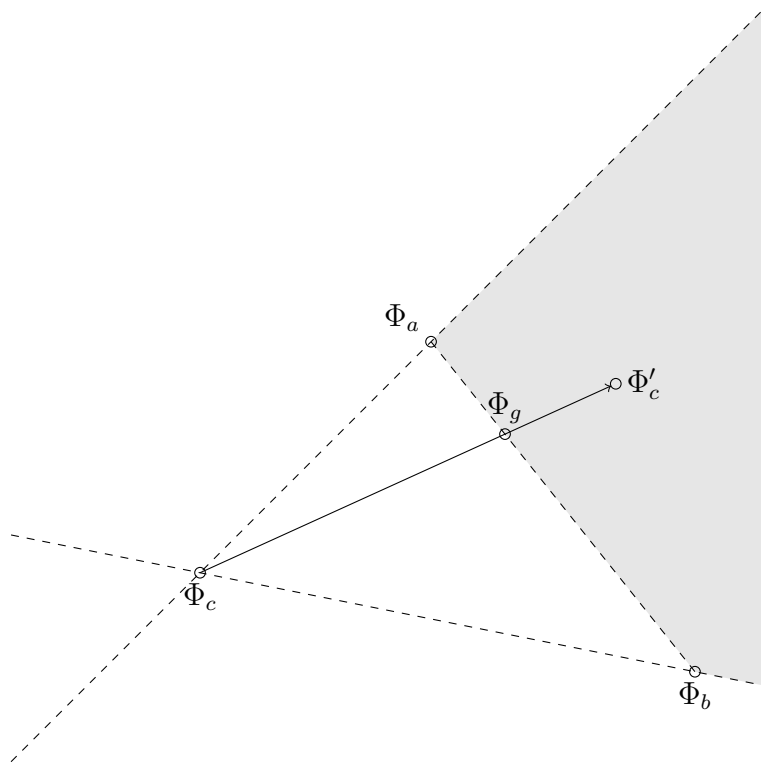


FIGURE 11.1 – Exemple d’adaptation : l’entreprise c abandonne la stratégie Φ_c pour adopter la stratégie Φ'_c , située au-delà du segment $[\Phi_a, \Phi_b]$. La zone grisée — qu’il faut imaginer se poursuivant à l’infini vers la droite entre les droites (Φ_c, Φ_a) et (Φ_c, Φ_b) — représente l’ensemble des stratégies susceptibles d’être adoptées par l’entreprise c en prenant les stratégies Φ_a et Φ_b pour modèles.

cours du processus de recherche créer des solutions non admissibles, solutions qui violeraient au moins l'une des contraintes. Il n'est jamais simple de traiter ces problèmes. La solution passe en général par l'utilisation d'une fonction de fitness à pénalité. L'efficacité d'une solution non admissible est automatiquement réduite. » (Vallée et Yildizoglu 2001, p. 7)

Dans notre modèle, la propension à utiliser la technique du *cost-plus-pricing* (le paramètre σ_i) ne devrait pas sortir de l'intervalle $[0\%;100\%]$. Nous choisissons de pénaliser très sévèrement une stratégie qui sortirait de cet intervalle, la fonction de fitness d'une telle stratégie renvoyant systématiquement 0. Ainsi, lorsqu'une telle stratégie participe à un tournoi, elle est automatiquement perdante, et l'entreprise doit s'adapter en prenant modèle sur deux stratégies restées dans l'espace des solutions admissibles.

En revanche, nous ne voyons pas de raison de contraindre le paramètre μ_i qui fixe le niveau de markup visé par l'entreprise. Tous les niveaux de markup, y compris négatifs, sont *a priori* envisageables, même si l'on s'attend à voir les niveaux aberrants disparaître rapidement sous l'action conjuguée des processus d'adaptation et des faillites.

11.2.6 Taux d'adaptation

Chaque mois, le processus d'adaptation (sélection, imitation, innovation) est appliqué à un nombre n_A d'entreprises sélectionnées aléatoirement parmi les n_F entreprises peuplant la simulation. Toutefois, on a vu que doivent être exclues du processus les entreprises dont la stratégie est trop récente — adoptée depuis moins de d_F^{Pro} mois — pour être évaluée. Il faut donc choisir n_A assez petit pour maintenir un vivier d'entreprises adaptables suffisamment important au sein de la population totale.

Posons :

- $d_F^{Pro} = 36$,
- $n_F = 680$ (valeur du scénario de base),
- $n_A = 8$.

En 36 mois, 288 entreprises auront donc adapté leur stratégie et il restera 392 entreprises adaptables (en l'absence de faillites qui viendraient réduire le nombre d'entreprises adaptables). Le taux mensuel d'adaptation choisi est donc relativement faible puisqu'à peine plus de 1 % des entreprises modifie sa stratégie chaque mois.

« [...] the firm operates at all times with a status quo policy, the profitability of which it inexactly compares, from time to time, with individual alternatives that present themselves by processes not entirely under

its control — changing policies when the comparison favors the presented alternative over the status quo. » (Nelson et Winter 1982, p. 31)

Rappelons que la relative faiblesse du taux d'adaptation ne signifie pas que les entreprises restent passives face aux variations de court terme de leur environnement : à chaque période, on l'a vu, les entreprises tiennent compte du niveau de leurs stocks d'inventus et du niveau de leurs coûts pour fixer le nouveau prix.

« Any organization as complex as a firm adapts to its environment at many (but interrelated) levels. It changes its behavior in response to short-run feedback from the environment according to some fairly well-defined rules. It changes rules in response to longer-run feedback according to some more general rules, and so on. At some point in this hierarchy of rule change, we describe the rules involved as “learning” rules. » (Cyert et March 1963, p. 101–102)

Les fonctions de réaction (les heuristiques) des entreprises sont donc stables à court terme, tandis qu'elles évoluent sur le long terme sous l'action de l'algorithme évolutionnaire (la méta-heuristique).

« Winter (1971) made the connection to the work of the behavioralists, proposing that the observed role of simple decision rules as immediate determinants of behavior, and operation of the satisficing principle in the search process for new rules, provided the required genetic mechanism. » (Nelson et Winter 1982, p. 42)

11.2.7 Cas des faillites et des créations d'entreprises

Le principe darwinien utilisé par l'algorithme évolutionnaire s'exerce sur les stratégies des entreprises et non sur les entreprises elles-mêmes : ce sont les stratégies décevantes qui *disparaissent* et les stratégies satisfaisantes qui *se reproduisent*, tandis que les entreprises décevantes ne font que *s'adapter*. Néanmoins, ainsi que Nelson et Winter (1982, p. 142–143) l'ont souligné, à ce mécanisme d'adaptation se superpose un mécanisme de sélection plus radical, plus proche du mécanisme de sélection naturelle : l'élimination des entreprises qui ne sont pas profitables. Dans notre modèle, lorsqu'une entreprise est incapable de rembourser ses dettes à l'échéance, la banque peut refuser de lui accorder de nouveaux prêts. L'entreprise disparaît alors, entraînant avec elle la disparition de la stratégie qui l'a amenée à sa perte. Ce mécanisme de sélection fondé sur la solvabilité et exercé par la banque, vient compléter le premier mécanisme fondé sur la rentabilité et exercé par les entreprises elles-mêmes.

De façon symétrique, la création de nouvelles entreprises suppose l'apparition de nouvelles stratégies. Parce que la nouvelle entreprise n'a pas de passé, on ne dispose

pas de stratégie décevante à qui appliquer le principe de réflexion. On utilise alors une version plus courte de notre algorithme pour déterminer la stratégie initiale du nouvel arrivant. L'algorithme reste le même jusqu'à la définition de la stratégie modèle moyenne Φ_g (équation 11.7, page 305). C'est cette stratégie Φ_g qui est tout simplement adoptée par la firme entrante, sans aucune autre mutation.

11.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons remis en cause une des hypothèses importantes sur lesquelles nous avons construit le comportement des entreprises. Jusque là, nous avons supposé que chaque entreprise ajustait son prix en réaction à un déséquilibre entre son offre sur le marché des biens et la demande qui se portait sur cette offre. Ce déséquilibre était mesuré en termes réels par le niveau effectif des stocks comparé à un niveau normal. Cette procédure a prouvé son efficacité, puisqu'elle a permis aux entreprises qui peuplent le modèle d'ajuster leur prix dans des conditions très variées, y compris après des chocs exogènes brutaux. Elle a aussi prouvé son efficacité dans la mesure où elle a permis à ces entreprises d'établir des prix leur permettant non seulement de satisfaire leur engagement vis-à-vis de la banque (remboursement des crédits, paiement de l'intérêt) mais encore de distribuer des dividendes à leurs propriétaires. Néanmoins cette procédure ne peut nous satisfaire, car elle n'est pas compatible avec ce que nous savons des motifs qui gouvernent le comportement des entreprises dans le monde réel : dans une *économie d'entrepreneurs*, le profit ne constitue pas une conséquence accessoire de l'activité des entreprises, il en constitue le motif principal.

Nous avons donc décidé de construire un comportement orienté vers la réalisation d'un profit supérieur. Pour cela, nous avons doté les entreprises de capacités avancées d'autonomie et d'adaptation en développant un algorithme évolutionnaire hybride associant le principe des algorithmes génétiques à celui de l'algorithme du simplexe de Nelder-Mead. Selon cet algorithme original, les entreprises développent elles-mêmes des stratégies individuelles et concurrentes d'ajustement des prix, combinant l'ancienne procédure basée sur l'observation des stocks à une nouvelle procédure basée sur la technique du markup. Par un processus associant sélection, imitation et innovation, les entreprises abandonnent les stratégies les moins profitables, s'inspirent des stratégies les plus profitables pour en élaborer de nouvelles qu'elles espèrent supérieures.

Chapitre 12

Le markup

Cost-plus pricing is prevalent among firms because it constitutes a convenient rule of thumb in making what would otherwise be complex and difficult decisions in a world of uncertainty.

Lavoie (1992)

Dans toutes les simulations que nous avons menées jusqu'ici, les entreprises étaient de simples agents réactifs ; elles utilisaient toutes la même procédure, basée sur l'observation du niveau des stocks, pour ajuster leur prix sur le marché des biens. Dans le chapitre précédent, nous avons développé un algorithme évolutionnaire hybride, pour permettre aux entreprises de définir elles-mêmes leur stratégie d'ajustement des prix, en combinant librement l'ancienne procédure avec une nouvelle, basée sur la notion de markup. L'algorithme place les stratégies en concurrence, avec pour critère de sélection le montant des profits distribués par les entreprises. C'est ainsi que nous intégrons le motif de profit au modèle pour en faire véritablement le modèle d'une *économie d'entrepreneurs*.

Dans le présent chapitre, nous explorons les conséquences de cette complexification du comportement des entreprises.

Dans la section 12.1, nous laissons aux entreprises la liberté de former des stratégies nouvelles combinant les deux procédures, tout en maintenant le markup visé fixé à un niveau très faible.

Dans la section 12.2, nous étendons l'autonomie des entreprises en leur laissant la liberté de fixer elles-mêmes le niveau du markup visé.

Dans la section 12.3.1, nous renversons la logique, fixant nous-même le niveau du markup visé pour en explorer systématiquement les effets sur la dynamique macro-économique du modèle.

12.1 Adaptativité partielle

Nous avons vu que la stratégie d’ajustement des prix d’une entreprise est définie par deux paramètres, l’un définissant la propension à utiliser la technique du markup (σ_i), l’autre le niveau de ce markup (μ_i). Dans cette section, nous nous proposons de laisser évoluer librement le seul paramètre σ_i .

A l’origine, ce scénario était seulement un des multiples tests destinés à vérifier le bon fonctionnement de l’algorithme évolutionnaire. Cependant ce scénario a débouché sur des résultats inattendus et suffisamment riches pour qu’on s’y intéresse avant d’examiner le cas général dans lequel les deux paramètres peuvent évoluer simultanément.

12.1.1 Etude dynamique

Paramètres

La simulation débute avec des entreprises dont le comportement est très proche de celui des entreprises du scénario de base. Comme dans le scénario de base, elles utilisent essentiellement le niveau des stocks comme indicateur du niveau de la demande pour décider de baisser ou d’augmenter leur prix (*demand-based-pricing*).

Cependant, les entreprises peuvent maintenant avoir recours à la procédure du *cost-plus-pricing*, mais au départ elles le font très rarement : leur propension à utiliser cette procédure est initialement aléatoirement répartie entre 0 % et 10 % selon une loi uniforme. Cependant, elles ont la capacité de faire évoluer cette propension, selon les processus d’imitation et d’innovation décrits au chapitre précédent. En revanche, le niveau du markup attendu par les entreprises lorsqu’elles utilisent la technique du *cost-plus-pricing* n’évolue pas : il restera fixé pendant toute la simulation à son niveau initial (lui aussi aléatoirement réparti entre 0 % et 10 % selon une loi uniforme).

Le tableau 12.1 présente les paramètres de l’étude dynamique. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés.

Conjectures

Le critère d’évaluation d’une stratégie est le niveau des dividendes distribués par l’entreprise. Comme nous avons fixé à un niveau très faible l’objectif de markup utilisé

Paramètre	Valeurs initiales	Adaptatif	Valeurs limites
σ_i	[0%, 10%]	oui	[0%, 100%]
μ_i	[0%, 10%]	non	

TABLE 12.1 – Adaptativité partielle, paramètres

par la procédure du *cost-plus-pricing*, un usage plus fréquent de cette procédure doit faire baisser les marges des entreprises concernées sous le niveau moyen. Nous nous attendons donc à ce que les entreprises aient tendance à conserver leur propension à utiliser la procédure du *demand-based-pricing* :

Conjecture 53 *Les entreprises n’adoptent pas ou peu la procédure du cost-plus-pricing.*

Si la conjecture 53 est vérifiée, alors le comportement général du modèle ne doit pas être sensiblement affecté par l’introduction de l’algorithme évolutionnaire :

Conjecture 54 *Le comportement macroéconomique du modèle est semblable à celui observé dans le scénario de base.*

Résultats

Les graphiques des figures 12.1 (pages 332 à 334) présentent l’évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années de la simulation. Ils sont complétés par deux graphiques nouveaux (page 335) qui montrent l’évolution des paramètres fixant les stratégies des entreprises tout au long de la simulation et rapprochent cette évolution de celle de la marge moyenne effectivement réalisée par les entreprises.

Ces deux graphiques montrent que, conformément aux paramètres du scénario, la propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* évolue (fig. 12.1x) tandis que l’objectif de markup reste figé à son niveau initial (fig. 12.1y). En revanche, contrairement à nos attentes, l’évolution des stratégies des entreprises montrent une élévation progressive de la propension à utiliser la procédure du markup, qui passe de 5 % en moyenne au début de la simulation pour se stabiliser à environ 20 % en moyenne à la fin de la simulation¹. La conjecture 53 n’est donc pas confirmée et, du coup, tout l’équilibre du modèle est modifié.

1. Nous avons laissé la simulation se poursuivre une centaine d’années supplémentaires pour vérifier cette stabilisation.

L'élévation du paramètre σ_i aux environs de 20 %, alors que le paramètre μ_i reste figé aux alentours de 5 %, signifie que les entreprises réduisent leurs marges, comme en témoigne l'affaiblissement du markup effectif qui passe de 50 % à 25 % sur la même période. Cet affaiblissement de la marge des entreprises a pour contrepartie un renforcement du pouvoir d'achat des salariés, qui se manifeste par la hausse du salaire réel (fig. 12.1w) et la hausse de la part des salaires dans le revenu global (fig. 12.1h). La demande est soutenue (fig. 12.1g). Le niveau des stocks fléchit (fig. 12.1e) ce qui conduit les entreprises à augmenter le niveau de la production (fig. 12.1f). Le chômage chute (fig. 12.1r), les entreprises ont de plus en plus de mal à recruter et le nombre d'emplois vacants s'élève (fig. 12.1t). Cette évolution dessine une courbe de Beveridge bien marquée (fig. 12.1s).

La pénurie de main d'oeuvre conduit les entreprises à augmenter les salaires (fig. 12.1b), lesquels sont accompagnés par les prix (fig. 12.1a). Le taux d'inflation atteint 15 % (fig. 12.1o). Le mouvement de l'économie vers la surchauffe est illustré par le cheminement de la courbe de Phillips qui se redresse et devient verticale (fig. 12.1d). Grâce à la vigueur de la demande — grâce aussi à l'inflation élevée qui vient réduire le poids de la dette — les entreprises ont de moins en moins de difficultés pour rembourser leurs créances : le taux de créances douteuses baisse (fig. 12.1k) et les faillites deviennent rares (fig. 12.1m).

Stratégies concurrentes

Une nouvelle fois, nous assistons à l'émergence d'un comportement macroscopique non directement déductible des comportements individuels des agents composant le système. Pourquoi les entreprises augmentent-elles leur propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* alors que cela les conduit à réduire leurs profits ? Si les entreprises adoptent dans une certaine mesure la procédure du *cost-plus-pricing*, alors que cette procédure, avec un objectif de markup très faible, les conduit à baisser leurs prix, c'est qu'il est *individuellement* profitable d'avoir des prix plus faibles que les prix obtenus en utilisant exclusivement la procédure du *demand-based-pricing*.

Il est raisonnable de penser que les entreprises qui « choisissent » d'utiliser plus fréquemment cette procédure voient leurs parts de marché s'élargir au point de parvenir à distribuer plus de dividendes malgré des marges plus faibles. Du coup, les entreprises qui continuent à utiliser presque exclusivement la procédure du *demand-based-pricing*, avec des prix plus élevés, ont plus de mal à écouler leur production et voient leur profits baisser. Elles distribuent moins de dividendes, et par conséquent seront plus enclines à abandonner leur stratégie actuelle pour adopter une stratégie avec un paramètre σ_i plus élevé. En somme, certaines entreprises se sont emparées

de la procédure du *cost-plus-pricing* pour mener aux autres une « guerre des prix » et les autres se voient contraintes de s'aligner sur les premières².

Ce qui est contre-intuitif aussi, c'est que la généralisation de politiques de prix modérés puissent conduire à observer des taux d'inflation plus élevés — mais on a vu que l'explication de ce phénomène se trouvait dans l'effet positif de la baisse des marges sur la demande salariale.

Enfin, si les entreprises ont intérêt à réduire leur marge pour conquérir de nouvelles parts de marché, pourquoi la propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* ne poursuit-elle pas son évolution et ne s'élève-t-elle pas au-dessus de 20 % en moyenne ? Sans doute parce qu'au-dessus de ce niveau, les gains en part de marché ne suffisent plus à compenser les sacrifices consentis sur les marges.

12.2 Adaptativité étendue

On se propose maintenant d'étudier le cas de l'évolution simultanée des deux variables de comportement définissant la stratégie d'ajustement des prix des entreprises.

12.2.1 Etude dynamique (1)

Dans cette deuxième simulation, on laisse évoluer non seulement la propension à utiliser la technique du *cost-plus-pricing*, mais aussi le niveau du markup attendu par les entreprises.

Paramètres

Comme dans le scénario précédent, la simulation débute avec des entreprises dont le comportement est très proche de celui des entreprises du scénario de base. La différence avec le scénario précédent est que le paramètre μ_i définissant le niveau de l'objectif de markup utilisé par la procédure du *cost-plus-pricing* est maintenant lui aussi soumis à l'algorithme évolutionnaire.

2. Il semble facile de vérifier cette conjecture au moyen du scénario suivant : on peuple le modèle de deux types d'entreprises simplement réactives (non adaptatives), les unes utilisant exclusivement la procédure du *demand-based-pricing*, les autres une stratégie mixte inspirée de celle qui émerge de la présente simulation ($\sigma_i = 20\%$, pour $\mu_i = 5\%$). On laisse les entreprises s'affronter pendant la durée d'une simulation et on mesure à la fin la profitabilité moyenne des entreprises de chacun des groupes. Si notre conjecture est juste, les entreprises avec stratégie mixte doivent être les plus profitables.

Le tableau 12.2 présente les paramètres de l'étude dynamique. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés.

Paramètre	Valeurs initiales	Adaptatif	Valeurs limites
σ_i	[0%, 10%]	oui	[0%, 100%]
μ_i	[0%, 10%]	oui	$[-\infty, +\infty]$

TABLE 12.2 – Adaptativité étendue, paramètres

Conjectures

Puisque les entreprises peuvent maintenant librement adapter leur objectif de markup, nous conjecturons qu'elles vont progressivement faire évoluer cet objectif jusqu'à son niveau optimum, compte tenu du contexte macroéconomique. Cette évolution doit se traduire par une amélioration de l'efficacité de la procédure du *cost-plus-pricing*. Nous conjecturons donc que les entreprises auront tendance à recourir plus fréquemment à cette procédure d'ajustement des prix.

Conjecture 55 *La propension à utiliser la procédure du cost-plus-pricing (σ_i) s'élève au fur et à mesure que l'objectif de markup (μ_i) se rapproche de son niveau optimum.*

La question qui reste posée est celle du niveau optimum de l'objectif de markup. Nous ne pouvons répondre à cette question à la place des entreprises elles-mêmes, mais nous conjecturons qu'il sera atteint lorsque le niveau de l'objectif de markup des entreprises sera égal au niveau de markup effectif.

Conjecture 56 *Le niveau de l'objectif de markup μ_i et le niveau du markup effectif convergent.*

Résultats

Les graphiques des figures 12.2 (pages 336 à 339) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années de la simulation ainsi que l'évolution des paramètres fixant les stratégies des entreprises pour l'ajustement des prix.

Les 25 premières années de la simulation ne diffèrent pas sensiblement de la simulation 12.1. La propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* s'élève

lentement (fig. 12.2x) tandis que l'objectif de markup reste approximativement à son niveau initial (fig. 12.2y). Du coup, l'évolution des variables macroéconomiques est tout à fait semblable, avec une hausse de la demande, de la production, jusqu'à atteindre une situation de quasi plein emploi avec une inflation supérieure à 10 %.

Cependant, après 2030, les deux simulations divergent. L'objectif de markup des entreprises, malgré quelques hésitations, s'élève en direction du niveau du markup effectif (conjecture 56). Conformément à la conjecture 55, cette convergence permet à la propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* de s'élever au-dessus du niveau moyen de 20 % auquel elle plafonnait dans la simulation précédente. Comme nous nous y attendions, plus l'objectif de markup est *réaliste*, plus les entreprises ont tendance à recourir à la procédure du *cost-plus-pricing*.

On observe donc une coévolution des deux paramètres, qui va en s'accéléralant entre 2030 et 2060. L'algorithme évolutionnaire remplit son office : les entreprises les moins profitables abandonnent leur stratégies basées sur la procédure du *demand-based-pricing* pour adopter des stratégies innovantes utilisant plus fréquemment la procédure du *cost-plus-pricing*. Ce mouvement se traduit par la formation de courbes en forme de « S » (fig. 12.2x et 12.2y), caractéristiques des phénomènes de diffusion des innovations (Rogers 1962).

En 2050, la moyenne de l'objectif de markup atteint le niveau du markup effectif moyen (30 %). Au même moment, la propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* atteint en moyenne 30 %. L'élévation du niveau moyen de l'objectif de markup n'est pas sans effet sur le niveau moyen du markup effectif. Si l'on compare le niveau moyen du markup effectif (fig. 12.2y) atteint en 2050 avec celui observé à la même date dans la simulation précédente (fig. 12.1y), on constate que l'adoption de nouvelles stratégies d'ajustement des prix avec des objectifs de markup plus élevé se traduit par un gain de 5 points en moyenne.

Cependant, contrairement à nos attentes, l'évolution des stratégies se poursuit au delà de ce niveau, les entreprises continuant à élever leur objectif de markup ainsi que leur propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing*. En 2060, la procédure du *cost-plus-pricing* devient la procédure la plus fréquemment utilisée par les entreprises. Cette même année, le niveau moyen de l'objectif de markup atteint 40 %, soit 9 points de plus que le markup effectif constaté au même moment.

Si l'élévation de l'objectif de markup a un effet limité sur le markup effectif, en revanche il se traduit par une élévation considérable du nombre de faillites (fig. 12.2m). Une analyse avancée de ces faillites montre qu'elles touchent essentiellement les entreprises dont l'objectif de markup est le plus élevé. Ces faillites ne sont pas sans effet sur l'évolution des stratégies des entreprises qui connaît un ralentissement à partir de 2060. Les niveaux de l'objectif du markup des différentes entreprises commencent

à converger. A partir de 2080, le niveau moyen de l'objectif de markup se stabilise autour de 50 %. La propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* met un peu plus de temps à se stabiliser, aux alentours de 60 %. Si on laisse la simulation s'exécuter au-delà de 2100, la stabilisation de ces deux paramètres est confirmée.

Nous observons donc un changement radical du comportement d'ajustement des prix des entreprises en 2030 et 2100. Quelles sont les conséquences macroéconomiques de ce changement général de stratégie ? Si nous comparons les résultats de la simulation avec ceux du scénario précédent, nous constatons que la part des profits est un peu plus élevée (25 % contre 20 %), le salaire réel un peu plus faible (75–80 contre 80–85), l'inflation un peu moins forte (10 à 13 % contre 12 à 15 %). Cependant, ces modifications paraissent limitées au regard de l'importance du changement des stratégies des entreprises ; la dynamique macroéconomique du modèle paraît peu affectée par ce bouleversement.

Une question reste en suspend : pourquoi les entreprises ont-elles tendance à élever leur objectif de markup au-dessus du markup qu'elles parviennent effectivement à réaliser — et cela alors qu'elles s'exposent ainsi à un risque accru de faillite ? Nous conjecturons que ce comportement est lié à la situation macroéconomique caractérisée par une forte inflation. Nous pensons qu'en surestimant l'objectif de markup, les entreprises intègrent le taux d'inflation dans leur procédure d'ajustement des prix.

12.2.2 Etude dynamique (2) : choc de main d'oeuvre

A partir des résultats de la simulation précédente, nous avons émis la conjecture que les entreprises surévaluaient leur objectif de markup pour tenir compte de l'inflation sous-jacente. Pour confirmer cette conjecture, nous décidons d'infliger à l'économie un choc destiné à réduire brutalement le niveau de l'inflation. Ce scénario va aussi nous permettre de vérifier l'efficacité de l'algorithme d'adaptation des entreprises en présence d'un choc exogène brutal modifiant le contexte macroéconomique.

Paramètres

Nous construisons un scénario peuplé d'entreprises adaptatives dont les stratégies initiales d'ajustement des prix sont réparties dans un intervalle centré sur celles observées à la fin du scénario précédent. Nous cherchons à obtenir ainsi un scénario stable, avec une forte inflation, peuplé d'entreprises dont les stratégies sont adaptées à cet environnement et dont le comportement ne devrait pas évoluer en moyenne.

Puis, dans le courant du scénario³, nous introduisons un millier de ménages supplémentaires afin d'accroître la concurrence entre les demandeurs d'emplois sur le marché du travail et de réduire ainsi la pression inflationniste.

Le tableau 12.3 présente les paramètres de l'étude dynamique. Tous les autres paramètres du scénario de base restent inchangés.

Paramètre	Valeurs initiales	Adaptatif	Valeurs limites
σ_i	[30%, 90%]	oui	[0%, 100%]
μ_i	[30%, 70%]	oui	$[-\infty, +\infty]$
Paramètre étudié			n_H
Valeur avant le choc			5000
Valeur après le choc			6000
Date du choc		janvier 2030	

TABLE 12.3 – Choc de main d'oeuvre, paramètres

Conjectures

L'introduction d'un millier de ménages supplémentaires dans l'économie doit entraîner un accroissement de la concurrence entre demandeurs d'emplois sur le marché du travail. Les hausses de salaires seront plus modérées et les entreprises vont voir leurs marges s'améliorer.

Conjecture 57 *L'introduction de main d'oeuvre supplémentaire entraîne une hausse du markup effectif et de la part des profits dans le revenu global.*

Si les salaires progressent moins vite, on s'attend à observer des hausses de prix plus modérées sur le marché des biens.

Conjecture 58 *L'introduction de main d'oeuvre supplémentaire entraîne un ralentissement de l'inflation.*

3. Nous faisons intervenir le choc en 2030, un peu plus tôt que d'habitude, de façon à disposer de plus de temps pour observer l'évolution des stratégies des entreprises après le choc.

S'il est vrai que l'utilisation par les entreprises d'un objectif de markup surévalué leur permet d'intégrer le niveau de l'inflation sous-jacente dans leur procédure d'ajustement, alors moins il y a d'inflation, moins l'objectif de markup doit s'écarter du niveau du markup effectif. On s'attend donc, après le choc constitué par l'introduction d'une importante main d'oeuvre supplémentaire, à voir les entreprises modifier leur objectif de markup pour le rapprocher progressivement du niveau du markup effectif.

Conjecture 59 *Plus l'inflation tend vers 0, plus l'objectif de markup des entreprises tend vers le niveau du markup effectif.*

Résultats

Les graphiques des figures 12.3 (pages 340 à 343) présentent l'évolution des principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels au cours des 100 premières années de la simulation ainsi que l'évolution des paramètres fixant les stratégies des entreprises pour l'ajustement des prix.

Comme prévu, les trente premières années de la simulation reproduisent les conditions macroéconomiques atteintes à la fin de la simulation précédente : inflation élevée (autour de 12,5 %, fig. 12.3o) et chômage quasi nul (fig. 12.3r). Comme prévu toujours, les stratégies des entreprises sont « optimales » puisque, si on néglige les oscillations de court terme, leur moyenne reste stable (fig. 12.3x et 12.3y).

Le premier effet de l'introduction d'un millier de ménages supplémentaires est un bond dans l'utilisation des capacités de production (fig. 12.3f). En effet, les entreprises enregistraient jusque là environ 1250 emplois vacants (fig. 12.3t) et l'arrivée des nouveaux ménages met fin à cette pénurie de main d'oeuvre. Du coup, la production bondit mais la consommation ne suit pas dans les mêmes proportions (fig. 12.3g), sans doute du fait du ralentissement de la progression des salaires (fig. 12.3b).

La hausse de la production au-dessus de la consommation entraîne une hausse des stocks (fig. 12.3e), à laquelle les entreprises tentent de répondre par une baisse de la production. Le chômage bondit au-dessus de 15 % (fig. 12.3r) et l'inflation ralentit jusqu'à tomber en dessous de 1 % entre 2036 et 2038 (fig. 12.3o) : la conjecture 58 est confirmée.

Comme prévu, le ralentissement de l'inflation se traduit par une convergence de l'objectif de markup des entreprises et du markup effectivement réalisé (fig. 12.3y) : la conjecture 59 est confirmée. Parce que l'objectif de markup des entreprises est rigide à court terme, cette convergence est essentiellement assurée par la hausse du markup effectif. Une hausse du markup effectif signifie nécessairement une nouvelle répartition du revenu global en faveur de la part des profits. Effectivement, la part

des profits passe de 22 % à 30 % entre 2030 et 2034 (fig. 12.3r) : la conjecture 57 est confirmée.

Cependant, la hausse des marges des entreprises semble excessive, car elle entraîne l'économie dans une crise qui se manifeste par la multiplication des faillites d'entreprises (fig. 12.3m) et le creusement des fonds propres de la banque (fig. 12.3k), laquelle ne parvient plus à distribuer régulièrement des dividendes (fig. 12.3n). D'ailleurs, les entreprises abaissent progressivement leur objectif de markup vers des niveaux plus « raisonnables ». Au fur et à mesure que l'objectif de markup est abaissé, le markup effectif s'abaisse lui aussi, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint pour un markup effectif moyen d'environ 36 %, un objectif de markup moyen d'environ 40 % (fig. 12.3y). Au niveau macroéconomique, on constate que l'inflation se stabilise autour de 2 % (fig. 12.3o) et la part des profits aux alentours de 26 % (fig. 12.3h).

Remarquons enfin que la convergence de l'objectif de markup avec le markup effectif s'accompagne d'une hausse de la propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing* qui s'élève jusqu'à 75 % en moyenne (fig. 12.3x). Apparemment, plus l'objectif de markup est *réaliste*, plus les entreprises trouvent intérêt à utiliser cette procédure.

12.3 Niveau du markup

Dans la dernière analyse dynamique, nous avons constaté que le markup visé par les entreprises et le markup effectivement réalisé convergent, dès que le différentiel causé par l'inflation est évacué grâce à l'introduction d'un important contingent de main d'oeuvre supplémentaire. La question que pose cette convergence est la suivante : est-ce le markup visé par les entreprises qui détermine le markup effectif ou bien le markup effectif est-il donné par les conditions macroéconomiques, les entreprises ne faisant que s'y adapter en choisissant un objectif de markup compatible ?

Il est très difficile de répondre à cette question dans le contexte d'un système adaptatif complexe, dans lequel comportements individuels et comportement macroéconomique co-évoluent. C'est pourquoi nous revenons, le temps d'une analyse de sensibilité, au cas plus simple d'entreprises réactives.

12.3.1 Analyse de sensibilité

On conduit une analyse locale de sensibilité du comportement macroéconomique du modèle au niveau de l'objectif de markup des entreprises (μ_i). Notre but est d'explorer méthodiquement le comportement du modèle pour différents niveaux de markup, et en particulier pour des niveaux qui ne pourraient être atteints lorsque

les stratégies d'ajustement des prix sont soumises à un processus de détermination endogène.

Conjectures

Nous conjecturons que le markup visé par les entreprises détermine le niveau des marges réellement réalisées par les entreprises et, par là, le niveau de la part des profits dans le revenu global.

Conjecture 60 *La part des profits augmente avec l'objectif de markup des entreprises.*

Une entreprise qui pratique un markup nul ne peut réaliser de profit. *A fortiori*, elle ne peut payer l'intérêt dû à la banque et par conséquent est condamnée à la faillite. On s'attend donc à ce que les entreprises connaissent des difficultés croissantes lorsque le markup visé tend vers 0. La logique montrant que le modèle ne peut fonctionner avec un markup nul, on s'attend à ce que des crises systémiques interviennent à l'approche de ce niveau.

Conjecture 61 *Les difficultés des entreprises (créances douteuses, faillites) augmentent lorsque l'objectif de markup tend vers 0 et, en dessous d'une certaine limite, conduisent à une crise systémique.*

Les simulations dynamiques de ce chapitre ont montré que plus les entreprises pratiquaient des markups modérés, plus soutenue était la demande ainsi que l'activité. On s'attend donc à retrouver et généraliser ces résultats.

Conjecture 62 *La demande et l'activité s'affaiblissent avec l'élévation de l'objectif de markup des entreprises.*

Si la conjecture 62 est vérifiée, alors les entreprises vont rencontrer des difficultés croissantes avec l'augmentation du niveau du markup. Ces difficultés croissantes doivent conduire, au delà d'un certain niveau, à la faillite du système.

Conjecture 63 *Les difficultés des entreprises croissent avec l'augmentation de l'objectif de markup des entreprises.*

Conjecture 64 *Il existe un niveau au delà duquel l'augmentation de l'objectif de markup des entreprises conduit à une crise systémique.*

Paramètres

- Les stratégies des entreprises ne sont plus soumises à l'algorithme génétique :
- l'objectif de markup μ_i est un paramètre exogène, identique pour chacune des entreprises, fixé pour la durée de chacune des simulations, que l'on fait varier entre 0 et 0.48⁴ ;
 - le paramètre σ_i , qui représente la propension à utiliser la procédure du *cost-plus-pricing*, est fixé à 1 pour toutes les entreprises, ce qui signifie que toutes les entreprises utilisent exclusivement la procédure basée sur le markup pour ajuster leurs prix.

Enfin, comme les précédentes simulations ont montré que l'utilisation de procédures d'ajustement des prix basées sur le markup entraînaient de fortes tendances inflationnistes, nous compensons ces tendances en augmentant d'un millier le nombre de ménages présents dans la simulation par rapport au scénario de base ($n_H = 6000$ au lieu de 5000 dans le scénario de base).

Comme d'habitude, tous les autres paramètres sont fixés aux valeurs du scénario de base, on exécute 10 simulations différentes avec 10 séries de nombres pseudo-aléatoires différentes pour chaque valeur du paramètre étudié, et chaque simulation est prévue pour durer 50 ans, durée au bout de laquelle les résultats sont enregistrés. Le tableau 12.4 présente les paramètres de l'analyse de sensibilité.

Résultats

Les graphiques de la figure 12.4 (page 344) présentent les signatures individuelles du paramètre μ_i pour chacune des 8 variables dépendantes étudiées.

Phases : Nous distinguons quatre phases dans le comportement de l'économie selon la valeur du paramètre étudié :

$\mu_i \leq 0.04$: Aucun résultat n'est disponible. La crise est systémique et les simulations s'interrompent prématurément.

$0.04 < \mu_i \leq 0.20$: l'économie est en situation de plein emploi, avec un taux de chômage aux environs de 3 %. Les prix et les salaires nominaux sont élevés. La production est maximale. La vitesse de la monnaie croît avec le paramètre μ_i . Les créances douteuses s'élèvent brutalement à l'approche de la limite inférieure

4. 0 est la limite inférieure « naturelle » de l'objectif de markup en dessous de laquelle les entreprises réalisent des pertes ; des tests préalables ont montré qu'il était inutile de pousser l'étude aux valeurs supérieures à 0.48, le modèle ne supportant pas des valeurs si élevées.

Paramètres constants	
σ_i	1
n_H	6000
Paramètre étudié	
Intervalle des valeurs étudiées	[0; 0.48]
Valeur de référence (scénario de base)	—
Pas	0.02
Nombre de simulations par valeur	10
Nombre total de simulations	250

TABLE 12.4 – Analyse de sensibilité à l’objectif de markup des entreprises – Paramètres

de l’intervalle et atteignent un niveau extrême. Le nombre de faillites est nul ou quasi nul, sauf à la limite inférieure de l’intervalle⁵.

$0.20 < \mu_i \leq 0.44$: le chômage croît avec l’augmentation de l’objectif de markup des entreprises. Prix et salaires nominaux s’affaissent. Bien que les entreprises semblent maîtriser leur dette, le nombre de faillites s’élève rapidement au fur et à mesure qu’augmente l’objectif de markup.

$0.44 < \mu_i$: Aucun résultat n’est disponible. La crise est systémique et les simulations s’interrompent prématurément.

Part des profits : Sur l’ensemble de l’intervalle des valeurs pour lesquelles les résultats sont disponibles, la conjecture 60 est vérifiée : très logiquement, plus les entreprises visent un markup élevé, plus la part des profits dans le revenu global est elle-même élevée (fig. 12.4f). On note toutefois un léger sursaut de la part des profits à la limite inférieure de l’intervalle.

Niveau de l’activité, difficultés des entreprises : Les entreprises se trouvent placées dans une situation paradoxale :

5. Une analyse de sensibilité plus fine aux environs de $\mu_i = 0.05$ montre une explosion du nombre de faillites à l’approche de cette limite inférieure.

- Moins elles exigent des marges élevées, plus la demande est élevée (conjecture 62), donc moins elles ont de difficultés à écouler leur production. On constate effectivement que le niveau des créances douteuses diminue et que les faillites disparaissent. Cependant, elles profitent de moins en moins de la vigueur économique. En dessous d'un certain niveau de markup, les marges décroissantes suffisent tout juste à assurer le service de la dette, et le niveau des créances douteuses recommence à croître.
- Plus les entreprises exigent des marges élevées, plus les profits s'élèvent, mais moins la demande est forte et la réalisation effective du markup visé devient plus aléatoire, ainsi qu'en témoigne la rapide progression du nombre de faillites lorsque le markup visé s'élève au-dessus de 0.20 (conjecture 63).

Crises : Le niveau des markups possibles se trouve étroitement encadré. Vers le bas, sans surprise, les entreprises peuvent réduire leur markup jusqu'à des niveaux très faibles, sans cependant pouvoir passer en dessous d'une limite dont nous conjecturons qu'elle est en rapport avec le niveau du taux d'intérêt ⁶.

Vers le haut, la limite apparaît très tôt, puisque les entreprises ne parviennent pas à pratiquer des niveaux de markup supérieurs à 0.45, pour une part des profits de 25 % du revenu global. Ce niveau maximal des profits est à rapprocher de celui qui émerge du scénario de base (environ 30 % de part des profits) avec des entreprises utilisant la technique du *demand-based-pricing* dans un contexte pourtant beaucoup plus favorables aux salariés (avec 1000 ménages en moins).

12.4 Conclusion

Les études dynamiques avec des entreprises adaptatives montrent que les entreprises, poussées par le motif de profit, ont tendance à adopter des stratégies d'ajustement des prix dans laquelle la procédure basée sur le markup prend une part essentielle. Paradoxalement, on observe que l'adoption de telles stratégies conduit à des répartitions du revenu moins favorables aux profits que lorsque les entreprises utilisent exclusivement la procédure d'ajustement des prix basée sur l'observation du niveau des stocks. Comment interpréter ces résultats ?

La raison pour laquelle le système permet d'atteindre des niveaux de profits plus élevés lorsque les entreprises utilisent de préférence la procédure du *demand-based-*

6. Pour vérifier cette conjecture, il faudrait conduire une analyse de sensibilité en faisant varier non seulement le markup visé mais aussi le taux d'intérêt. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps de développer l'outil d'analyse nécessaire.

pricing n'est pas claire, et des recherches plus poussées devront être menées sur ce point.

Cependant, puisque les expériences montrent que l'adoption généralisée de stratégies basées sur la procédure du *cost-plus-pricing* conduisent à des répartitions du revenu moins favorables aux profits, reste à comprendre pourquoi les entreprises ont tendance à préférer de telles stratégies à celles, collectivement plus profitables, basées sur l'observation du niveau des stocks.

Trois explications différentes peuvent être avancées :

La concurrence : la procédure du *demand-based-pricing* est identique pour toutes les entreprises. Les entreprises peuvent au contraire « personnaliser » la procédure du *cost-plus-pricing* en fixant elles-mêmes le niveau du markup visé. Les entreprises qui adoptent la procédure basée sur le markup peuvent pratiquer les prix inférieurs aux autres entreprises et leur dérober des parts de marché, les conduisant à leur tour à adopter cette procédure.

La flexibilité : la procédure du *demand-based-pricing* est basée, comme la procédure de détermination du niveau de la production, sur l'observation du niveau des stocks. La conséquence est que les décisions relatives à la production et aux prix ne peuvent aller que dans le même sens. Une entreprise utilisant cette procédure ne peut simultanément augmenter sa production et baisser ses prix. Elle ne peut le faire que séquentiellement, par un lent processus d'essais et d'erreurs⁷. En revanche, lorsqu'une entreprise adopte une stratégie utilisant la procédure du *cost-plus-pricing*, elle dissocie l'ajustement des prix — maintenant basé sur les coûts et le niveau du markup — de l'ajustement de la production — qui reste basé sur le niveau des stocks. Une entreprise utilisant une telle stratégie peut simultanément baisser son prix et augmenter sa production si elle reçoit de son environnement les signaux adéquats. La procédure du *cost-plus-pricing* apporte donc à l'entreprise une flexibilité du prix par rapport à la production qui peut constituer un avantage important par rapport à ses concurrentes utilisant la procédure du *demand-based-pricing*.

L'incertitude : nous savons que les entreprises doivent faire face à l'incertitude, en particulier lorsqu'elles doivent ajuster leurs prix. En les fixant trop haut, elles risquent de ne pouvoir écouler leurs marchandises. En les fixant trop bas, elles se privent d'un profit supérieur. L'anticipation du « juste prix » est donc stratégique. Lorsque les entreprises utilisent la procédure du *demand-based-pricing* basée sur l'observation du niveau des stocks, elles font sans doute osciller leurs prix autour du prix à atteindre, mais leurs prix sont sans cesse ou trop hauts

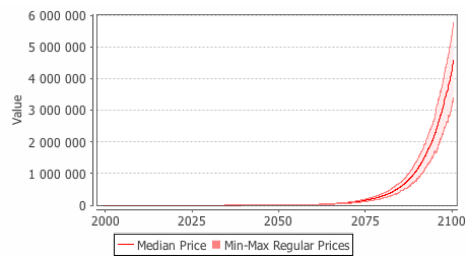
7. Voir chapitre 10, page 269.

ou trop bas ; l'objectif de prix ne peut être atteint qu'en moyenne. En revanche, si la répartition des revenus au niveau macroéconomique est stable sur le long terme — et toutes les simulations que nous avons conduites ont montré qu'elle l'était dans les conditions normales — alors la procédure basée sur le markup consitue un excellent moyen d'ajuster le prix en dépit de l'incertitude endogène propre aux économies dynamiques et complexes.

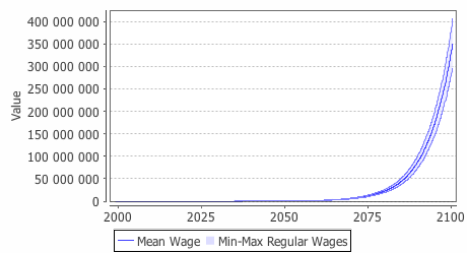
Ces trois raisons d'adopter le markup se combinent sans doute dans l'émergence des stratégies basées sur le *cost-plus-pricing*. Pour nous cependant, la troisième est sans doute la raison principale de la généralisation de ces stratégies. Dans notre modèle, les entreprises ne sont que très peu « maîtres de leur destin »⁸ ; le niveau des profits par rapport aux salaires apparaît d'emblée comme une grandeur macroéconomique, déterminée par le rapport des vitesses de rotation des circuits du revenu et du capital circulant. L'autonomie des entreprises, en particulier en matière de détermination des prix, apparaît comme sévèrement encadrée par cette contrainte structurelle, même si cette contrainte s'exerce à travers le voile de la concurrence. Le niveau « normal » de markup qui émerge des processus concurrents d'apprentissage des entreprises — et qui apparaît au premier abord comme une norme arbitraire — n'est alors en fait que le résultat de l'intégration par les entreprises, dans leurs stratégies d'ajustement des prix, de la propriété macroscopique de stabilité de long terme de la répartition du revenu global.

Bien sûr, il s'agit là d'une nouvelle conjecture qui demande à être confirmée. Toutes les simulations des chapitres précédents ont été effectuées avec des entreprises utilisant exclusivement la procédure du *demand-based-pricing* ; il faudra donc les renouveler en les peuplant avec des entreprises adaptatives, capables de choisir elles-mêmes la façon de combiner les deux procédures ainsi que leur niveau de markup. Cette nouvelle recherche dépasse toutefois le cadre que nous nous sommes fixé pour le présent travail ; elle entre dans la liste de nos projets.

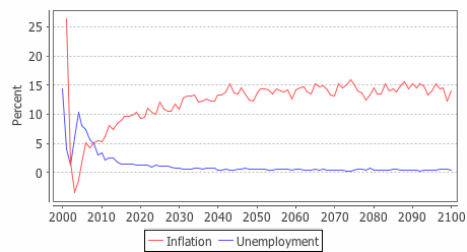
8. Selon Kalecki (1971, p. 13) : « [...] capitalists, as a whole, determine their own profits by the extent of their investment and personal consumption. In a way, they are “master of their own fate”. »



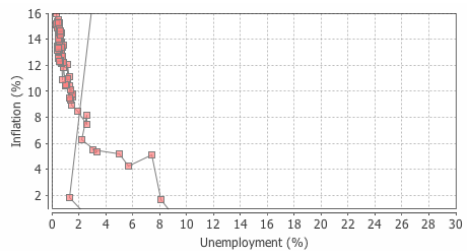
(a) Prix



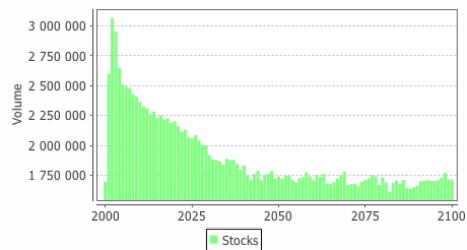
(b) Salaires



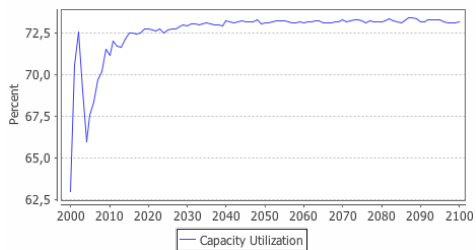
(c) Inflation et chômage



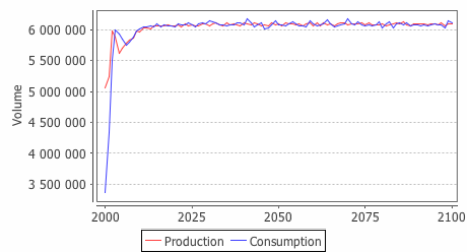
(d) Courbe de Phillips



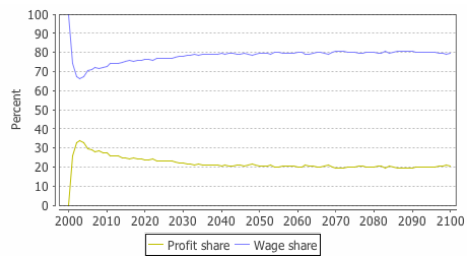
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

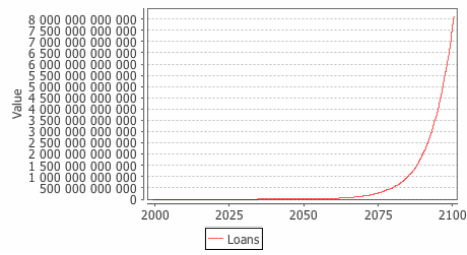


(g) Marché des biens (volume)

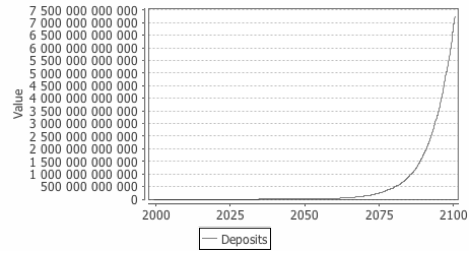


(h) Répartition des revenus

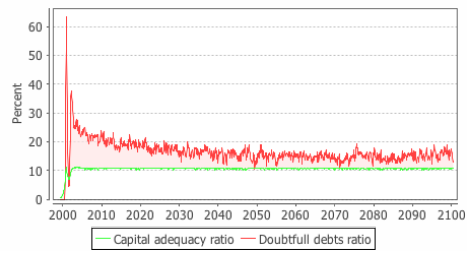
FIGURE 12.1 – Adaptativité partielle – Principaux indicateurs macroéconomiques



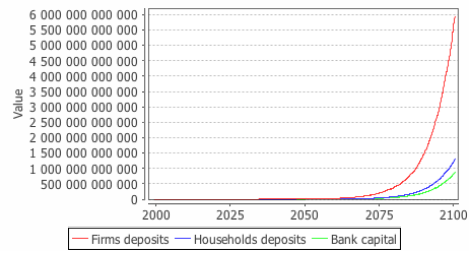
(i) Crédits



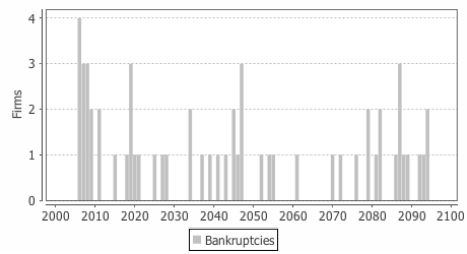
(j) Dépôts



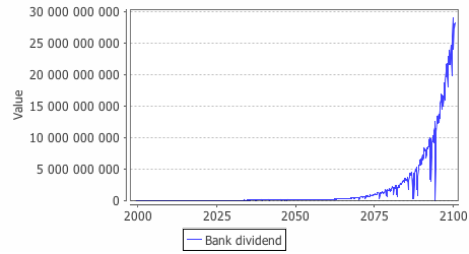
(k) Fonds propres et créances douteuses



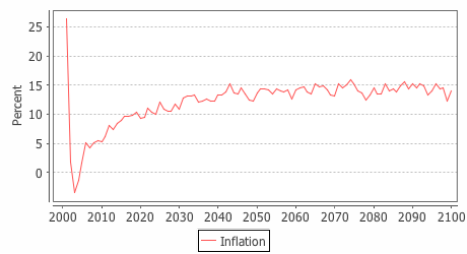
(l) Passif de la banque



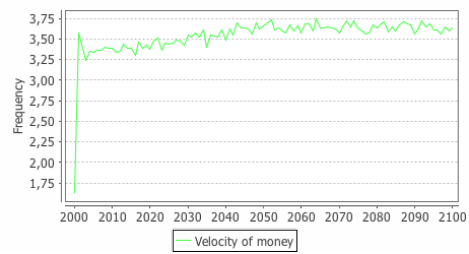
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires

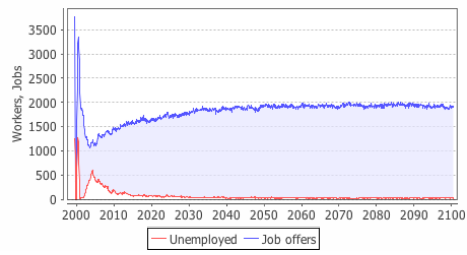


(o) Inflation

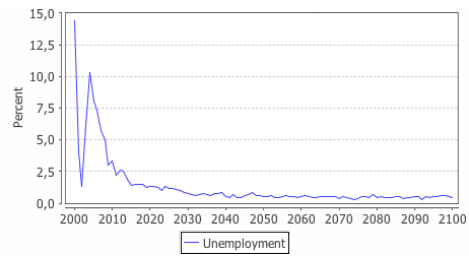


(p) Vitesse de la monnaie

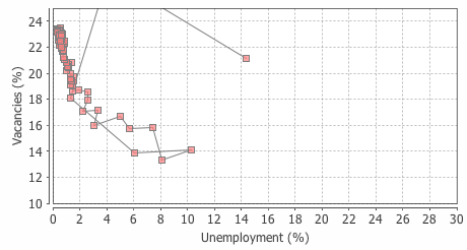
FIGURE 12.1 – Adaptativité partielle – Indicateurs bancaires et monétaires



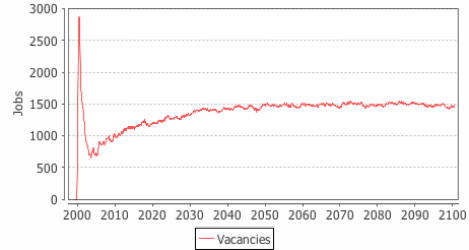
(q) Marché du travail



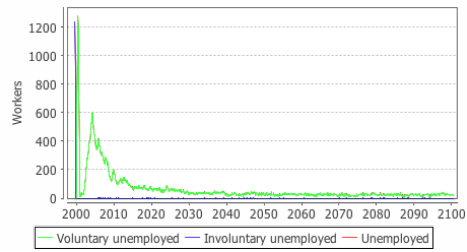
(r) Chômage



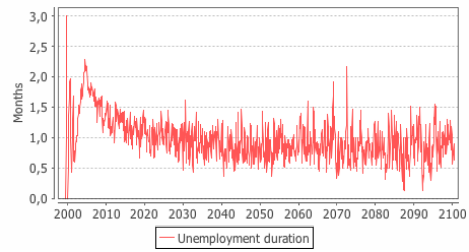
(s) Courbe de Beveridge



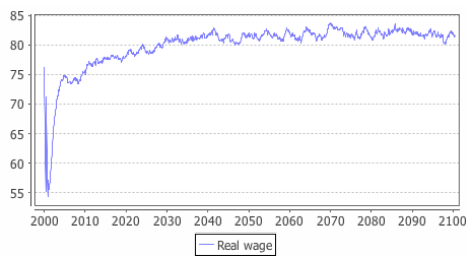
(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage

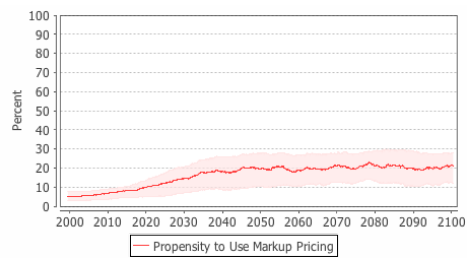


(v) Durée moyenne du chômage

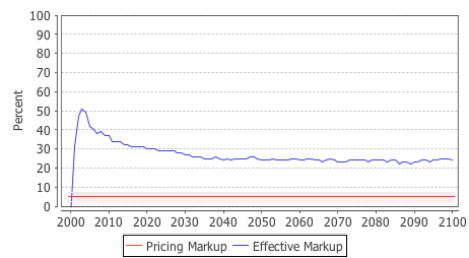


(w) Salaire réel

FIGURE 12.1 – Adaptativité partielle – Indicateurs du marché du travail

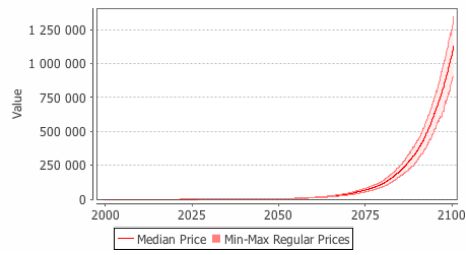


(x) Propension à utiliser la technique du *cost-plus-pricing* (σ_i)

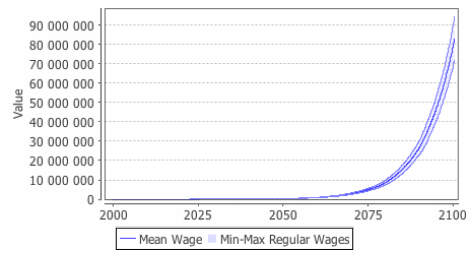


(y) Objectif de markup (μ_i)

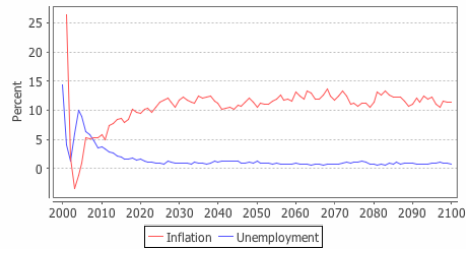
FIGURE 12.1 – Adaptativité partielle: évolution des stratégies d’ajustement des prix



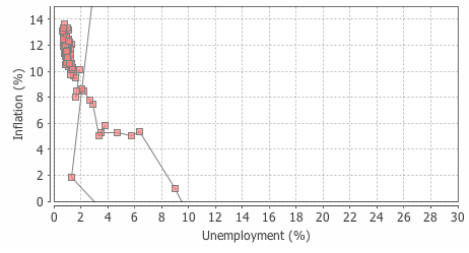
(a) Prix



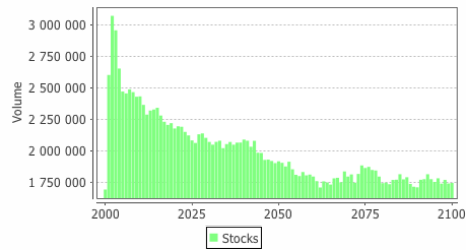
(b) Salaires



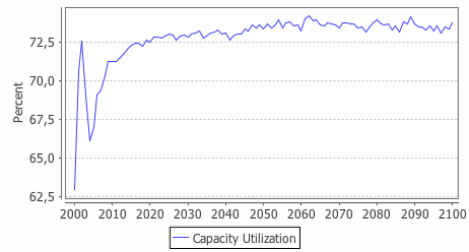
(c) Inflation et chômage



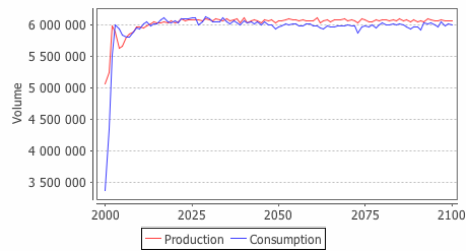
(d) Courbe de Phillips



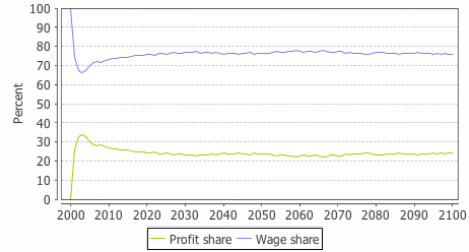
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

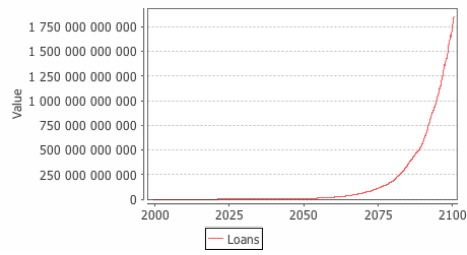


(g) Marché des biens (volume)

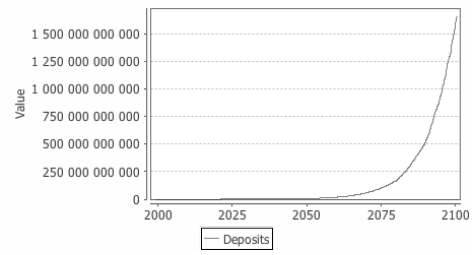


(h) Répartition des revenus

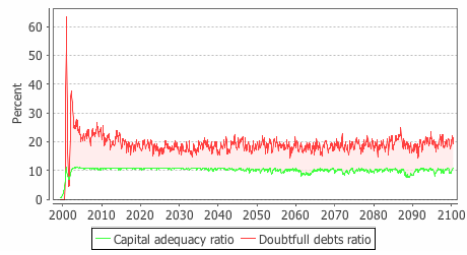
FIGURE 12.2 – Adaptativité étendue – Principaux indicateurs macroéconomiques



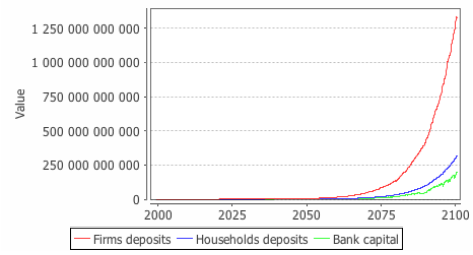
(i) Crédits



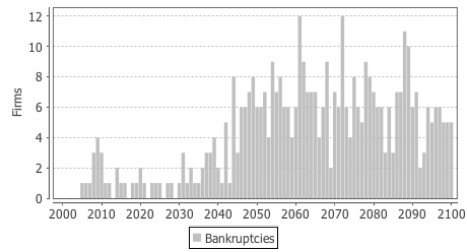
(j) Dépôts



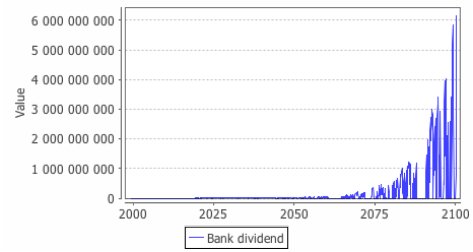
(k) Fonds propres et créances douteuses



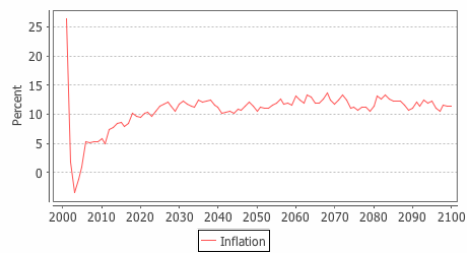
(l) Passif de la banque



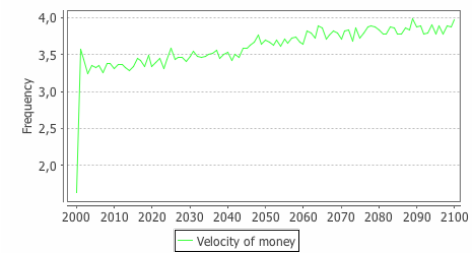
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires

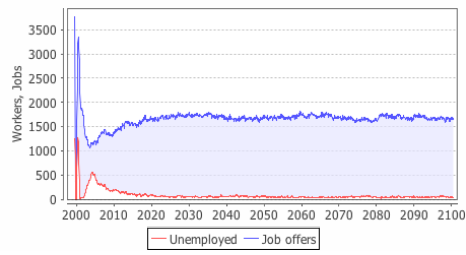


(o) Inflation

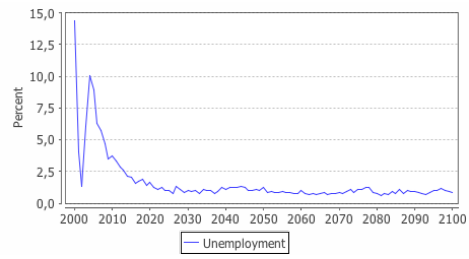


(p) Vitesse de la monnaie

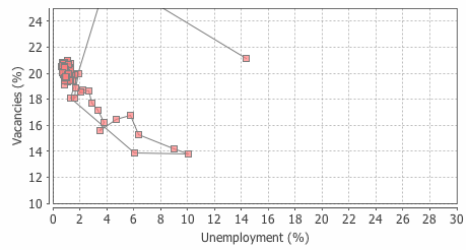
FIGURE 12.2 – Adaptativité étendue – Indicateurs bancaires et monétaires



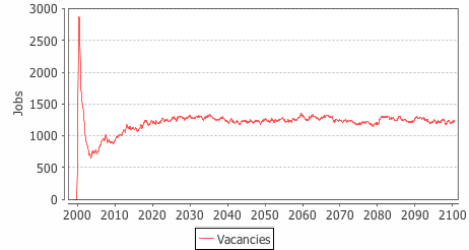
(q) Marché du travail



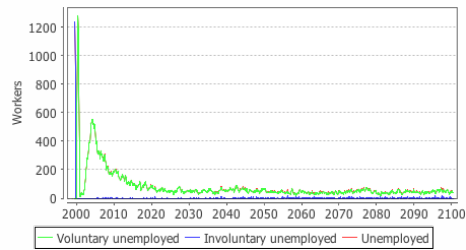
(r) Chômage



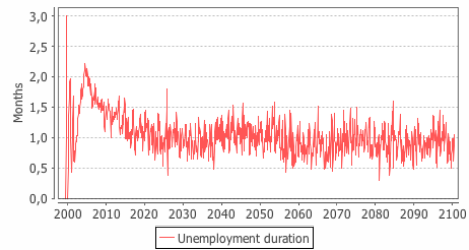
(s) Courbe de Beveridge



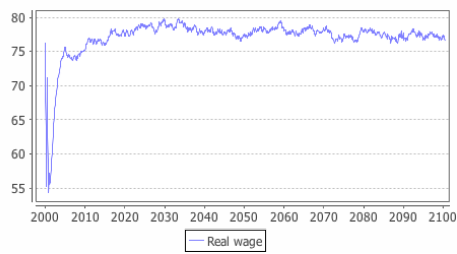
(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage

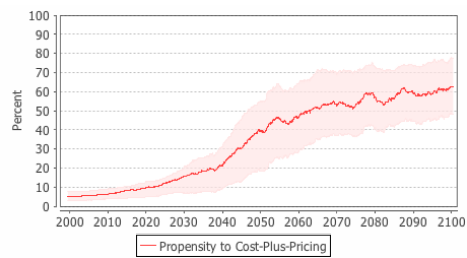


(v) Durée moyenne du chômage

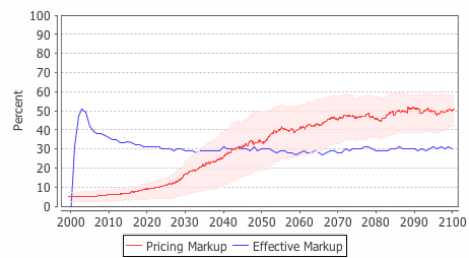


(w) Salaire réel

FIGURE 12.2 – Adaptativité étendue – Indicateurs du marché du travail

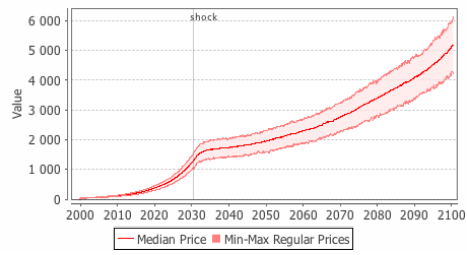


(x) Propension à utiliser la technique du *cost-plus-pricing* (σ_i)

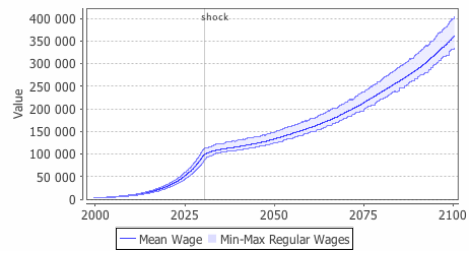


(y) Objectif de mark-up (μ_i)

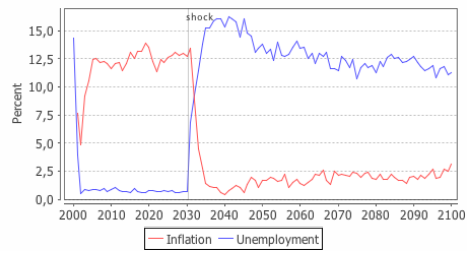
FIGURE 12.2 – Adaptativité étendue: évolution des stratégies d’ajustement des prix



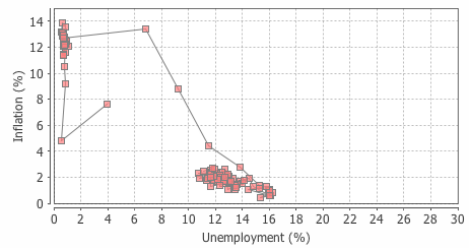
(a) Prix



(b) Salaires



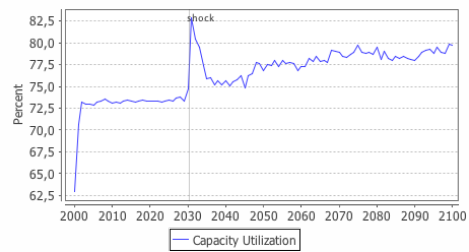
(c) Inflation et chômage



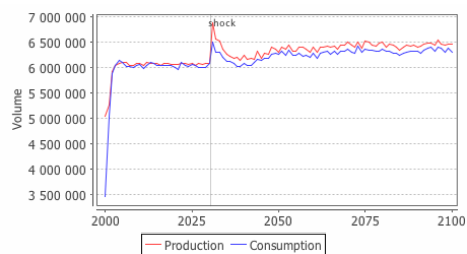
(d) Courbe de Phillips



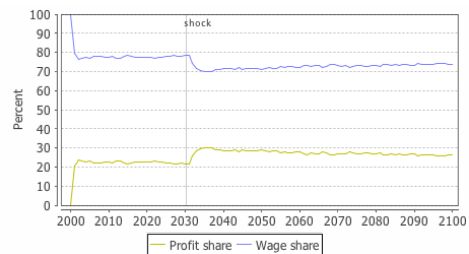
(e) Niveau des stocks



(f) Utilisation des capacités

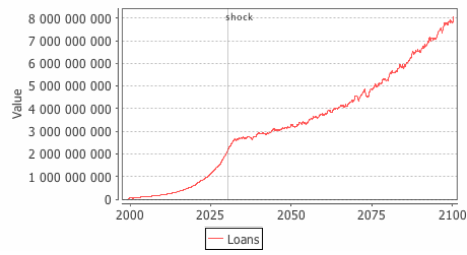


(g) Marché des biens (volume)

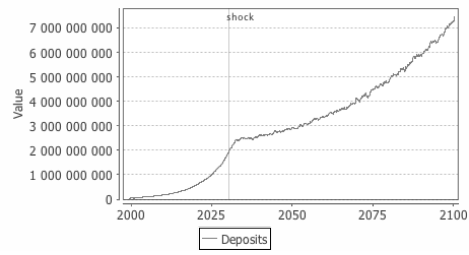


(h) Répartition des revenus

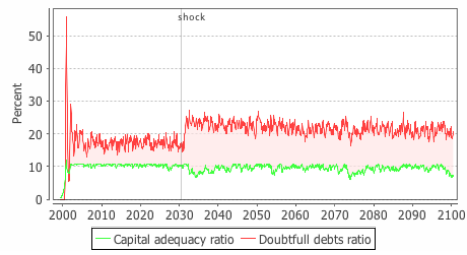
FIGURE 12.3 – Choc de main d’oeuvre – Principaux indicateurs macroéconomiques



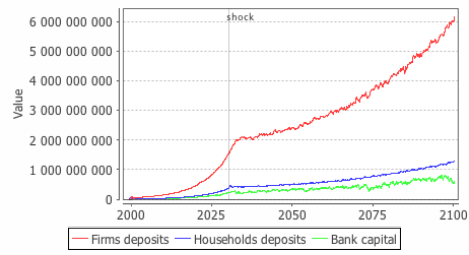
(i) Crédits



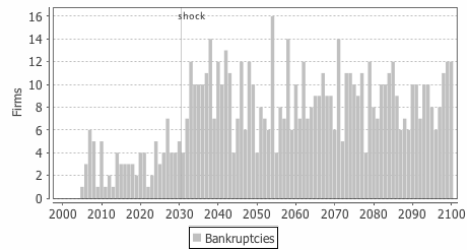
(j) Dépôts



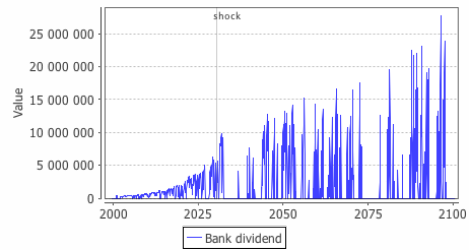
(k) Fonds propres et créances douteuses



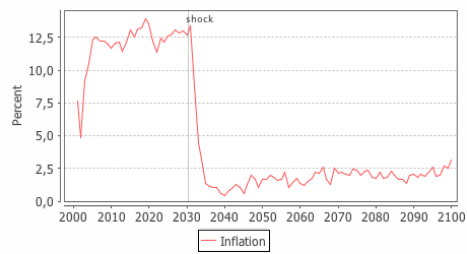
(l) Passif de la banque



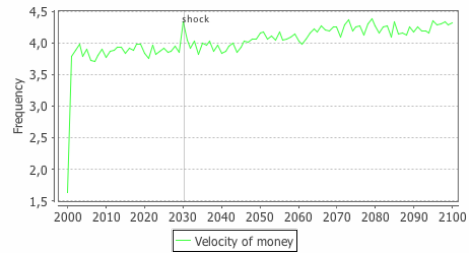
(m) Faillites



(n) Dividendes bancaires



(o) Inflation

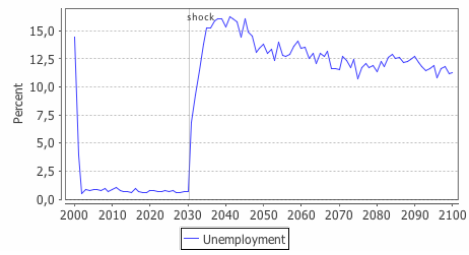


(p) Vitesse de la monnaie

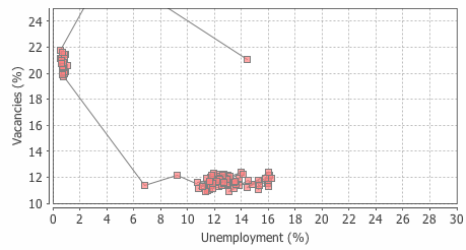
FIGURE 12.3 – Choc de main d’oeuvre – Indicateurs bancaires et monétaires



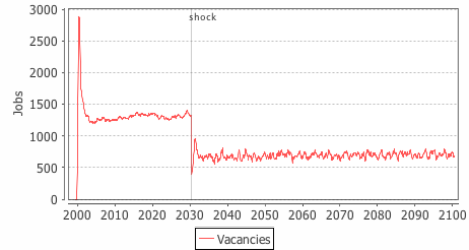
(q) Marché du travail



(r) Chômage



(s) Courbe de Beveridge



(t) Emplois vacants



(u) Types de chômage

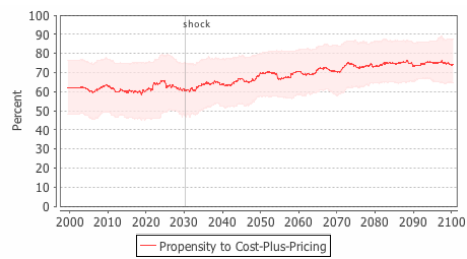


(v) Durée moyenne du chômage

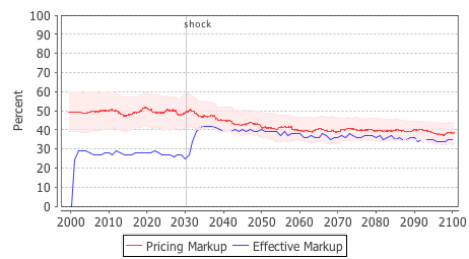


(w) Salaire réel

FIGURE 12.3 – Choc de main d’oeuvre – Indicateurs du marché du travail

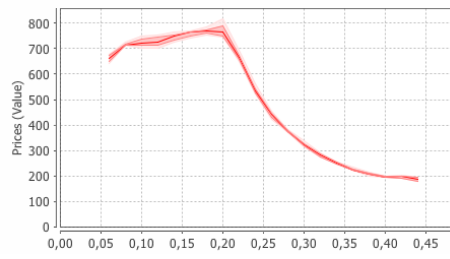


(x) Propension à utiliser la technique du *cost-plus-pricing* (σ_i)

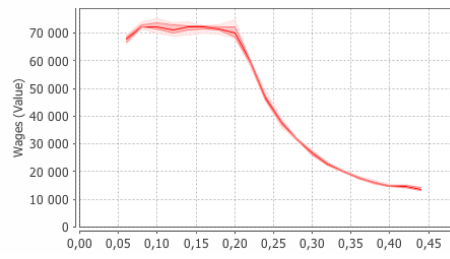


(y) Objectif de markup (μ_i)

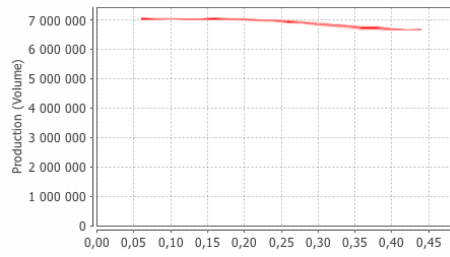
FIGURE 12.3 – Choc de main d’oeuvre: évolution des stratégies d’ajustement des prix



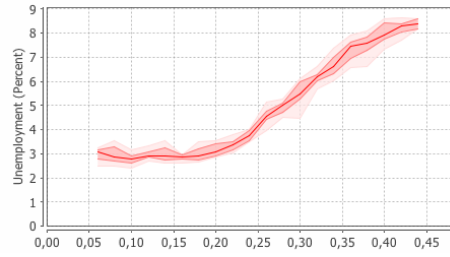
(a) Prix



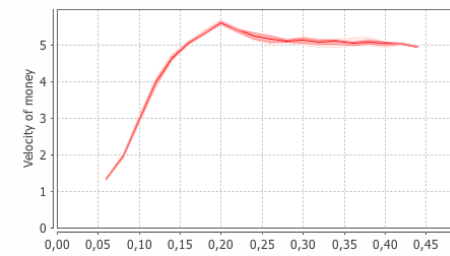
(b) Salaires



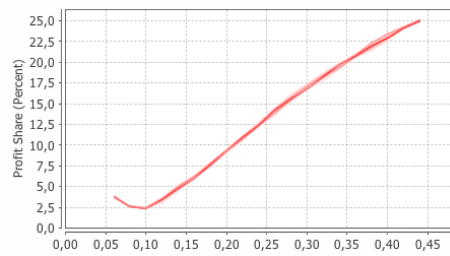
(c) Production



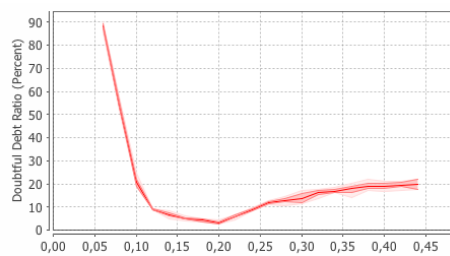
(d) Chômage



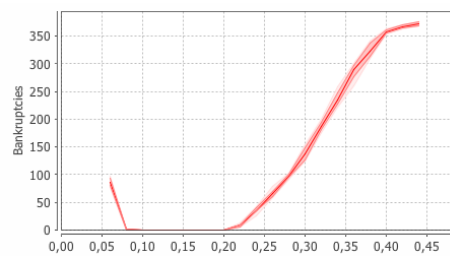
(e) Vitesse de la monnaie



(f) Part des profits

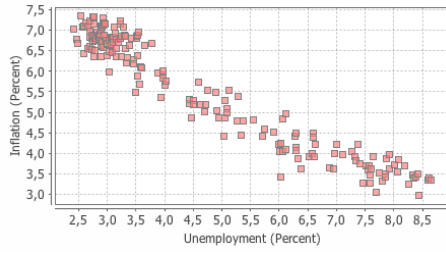


(g) Créances douteuses

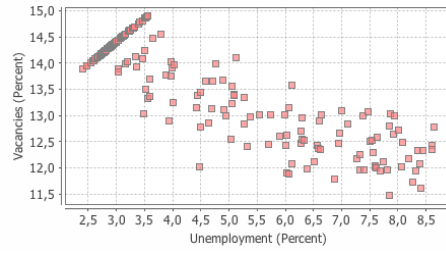


(h) Faillites

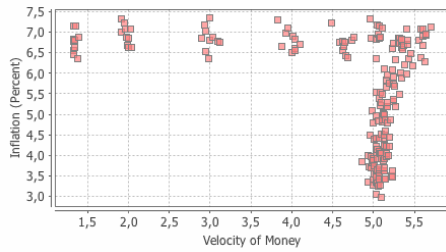
FIGURE 12.4 – Niveau du markup – Sensibilités



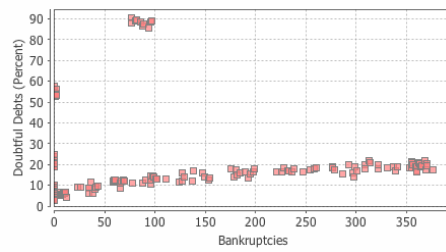
(i) Courbe de Phillips



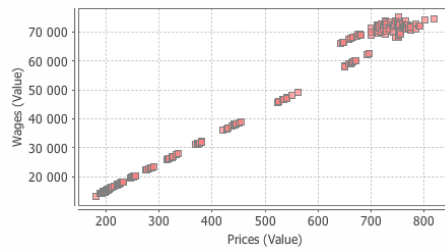
(j) Courbe de Beveridge



(k) Vitesse de la monnaie et inflation



(l) Faillites et créances douteuses



(m) Prix et salaires

FIGURE 12.4 – Niveau du markup – Corrélations

Chapitre 13

Conclusion

Donc toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties.

Pascal (1671)

En construisant un modèle d'économie de marché radicalement décentralisé, nous avons été amenés à croiser deux approches *a priori* très différentes : d'un côté, issue des sciences de la complexité, l'approche multi-agents qui propose de faire croître dans l'espace virtuel de la mémoire d'un ordinateur des sociétés artificielles pour en comprendre les propriétés émergentes ; de l'autre, issue de la pensée post-keynésienne, la théorie monétaire de la production, centrée sur les propriétés du système formé par les flux monétaires entre secteurs économiques. Les deux approches se révèlent néanmoins complémentaires si l'on considère les économies de marché comme des systèmes d'agents interagissant par la manipulation de grandeurs réelles et monétaires.

La principale difficulté à laquelle nous nous sommes heurtés, dès les premières phases de conception du modèle — alors qu'il ne tournait encore que « sur le papier » — est le problème de la réalisation des profits. Le profit, catégorie qui semble

si « naturelle » au premier abord, se fait mystérieux dès que l'on considère l'économie comme un système réel et monétaire cohérent. Par quel « artifice » le capitaliste réalise-t-il un profit, se demande Marx ?

« Grâce à l'élévation du prix des marchandises qu'il vend. Mais alors, l'élévation des prix ou, pour nous exprimer de façon plus générale, le changement de prix des marchandises dépend donc de la simple volonté des capitalistes ? Ou bien, au contraire, des circonstances déterminées ne sont-elles pas nécessaires pour que cette volonté entre en jeu ? » (Marx 1865 [1975], p. 6)

La réponse est apportée par les auteurs du circuit de la monnaie : oui, il faut des circonstances déterminées pour cela, puisque dans les modèles classiques du circuit le profit est impossible, malgré la volonté des entreprises — et même malgré la volonté des auteurs de ces modèles.

Puisque les circonstances nécessaires à la réalisation du profit sont extérieures à la volonté des agents, nous conjecturons qu'elles se situent dans la structure des interactions entre agents, d'où l'importance que nous accordons à la modélisation de cette structure. Notre hypothèse est que la structure des interactions doit revêtir un caractère dynamique et complexe pour que le profit puisse se former. Plus précisément, nous pensons que les processus de production doivent être modélisés comme des processus qui prennent *réellement* du temps — plus de temps qu'il n'en faut aux ménages pour dépenser leur revenu. Suivant cette idée, nous avons construit le modèle en nous attachant à reconstituer, simplement mais rigoureusement, le caractère dynamique et complexe de la structure des interactions d'une économie de marché décentralisée.

Le modèle est composé de trois types d'agents : les entreprises, auxquelles est associée la fonction de production, les ménages, auxquels est associée la fonction de consommation, et la banque à laquelle est associée la gestion des moyens de paiements. Les entreprises et les ménages sont des agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents en interaction directe et indirecte — seul le secteur bancaire est constitué d'un agent représentatif unique. Les interactions des agents s'exercent à travers une structure particulière, composée de deux systèmes couplés, l'un représentant la sphère réelle, l'autre la sphère monétaire : la sphère réelle est composée d'objets élémentaires représentant les forces de travail et les marchandises ; la sphère monétaire est composée d'objets élémentaires représentant les crédits et les dépôts. Chacune des deux sphères encapsule un principe fondamental qui s'impose aux agents : dans la sphère réelle, la production des marchandises prend du temps ; dans la sphère monétaire, la monnaie est créée par le crédit bancaire à la production pour une durée limitée. Ces deux principes s'expriment dans une multitude de

processus réels et monétaires parallèles et asynchrones — c'est-à-dire complètement décentralisés. Situés à l'interface du réel et du monétaire, les agents assurent et subissent les interactions des deux sphères. Les marchés — marché du travail et marché des biens — sont de simples lieux de rencontre où ménages et entreprises établissent des relations directes.

En construisant ce modèle comme un programme informatique, nous montrons qu'il est possible d'exprimer dans un langage rigoureux les notions conjointes d'économie monétaire de production et d'économie avec monnaie endogène sous la forme d'un système dynamique et complexe, peuplé d'agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents, respectant le principe de cohérence des stocks et des flux. Dès les premières simulations, nos principales conjectures sont confirmées : le modèle parvient à se reproduire de période en période tandis que les entreprises qui le peuplent réalisent des profits, paient les intérêts dus à la banque, distribuent des dividendes à leurs propriétaires et conservent même une part pour l'autofinancement de la production. Plus étonnant, sachant que les entreprises ajustent les prix et les salaires d'embauche de façon complètement indépendante, on constate une remarquable stabilité de la répartition du revenu global entre salaires et profits. Dans la mesure où cette régularité macroéconomique du modèle ne peut être directement inférée du comportement des agents qui le composent, la stabilité de la répartition du revenu constitue une propriété émergente ; le système modélisé est effectivement un système complexe.

Nous avons alors cherché à comprendre les circonstances qui déterminent la répartition des revenus. Grâce à la souplesse du modèle, conçu comme un laboratoire virtuel, nous avons pu conduire cette recherche selon une véritable démarche expérimentale. En jouant sur les paramètres du modèle, nous avons fait varier les différentes vitesses de circulation réelles et monétaires. Les résultats sont venus confirmer pleinement nos conjectures : la répartition du revenu dépend directement du rapport des vitesses de rotation des circuits *revenu-dépense* et *force de travail-marchandise* ; plus de fois une unité monétaire peut être dépensée avant de se retrouver face à la marchandise pour la production de laquelle elle a été créée, plus haut s'élève la part des profits. Ainsi la structure réelle et monétaire du système vient-elle restreindre l'autonomie des agents et en particulier celle des entreprises dans la fixation des prix : pour chaque configuration de paramètres, il existe un niveau de marge au-delà duquel les entreprises ne parviennent pas à hisser leurs prix. Même le renforcement de l'autonomie des entreprises pour la recherche d'un profit supérieur ne vient pas remettre en cause ces résultats, mais plutôt les complexifier : l'exacerbation de la concurrence entre les entreprises conduit à une baisse de la part des profits dans le revenu global.

Cependant, les contraintes structurelles fortes pesant sur le niveau des profits n'épuisent pas — et de loin — les propriétés du modèle. Au contraire, elles jouent un rôle central dans la capacité du modèle à rendre compte d'une grande variété de situations économiques et dans l'émergence de dynamiques macroéconomiques riches d'enchaînements réalistes et complexes. Comme une économie réelle, le modèle présente — pour une large gamme de paramètres et sans le moindre contrôle supérieur — des régularités de comportement marquées ; il parvient même à surmonter des chocs exogènes brutaux et à retrouver la stabilité antérieure. Cependant, si les marchés décentralisés peuvent assurer une certaine coordination des activités concurrentes des agents économiques, cette coordination n'est pas garantie : comme une économie réelle aussi, le modèle peut connaître des dérèglements et même des crises fatales.

Les hypothèses fondamentales sur lesquelles nous avons construit le modèle (les marchés sont décentralisés, la production prend du temps, les crédits font les dépôts. . .) sont toutes simples et réalistes ; elles s'expriment dans des relations de causalité situées au niveau des agents individuels, lesquels font ce que les agents du monde réel font : travailler, consommer, épargner, embaucher, licencier, produire, stocker, vendre, acheter, prêter, emprunter, rembourser. . . Les seules hypothèses fortes du modèle sont des hypothèses simplificatrices qui s'inscrivent dans une démarche d'abstraction décroissante. Selon l'approche constructiviste, nous considérons ce modèle comme une étape dans un processus, un prototype destiné à éprouver et valider les choix de conception.

Les résultats obtenus nous paraissent suffisants pour justifier la poursuite du développement du modèle. Celui-ci constitue la base sur laquelle peuvent être construits des modèles plus complets et plus concrets, à la fois plus complexes et plus réalistes, par le relâchement progressif des hypothèses simplificatrices que nous avons adoptées dans cette première version. Le programme de travail correspondant pourrait être :

- endogénéiser le stock de capital productif, implémenter une fonction d'investissement au niveau des entreprises et y intégrer le progrès technologique ;
- permettre la mobilité du capital par l'implémentation d'un marché financier ;
- remplacer la banque unique par un secteur bancaire multi-agents composé de banques de dépôts multiples et concurrentes et d'une banque centrale en charge de la politique monétaire ;
- multiplier les types de biens (biens de consommation, biens d'équipements, biens intermédiaires, énergie. . .) et les types d'entreprises correspondants pour l'étude des dynamiques industrielles ;
- complexifier le comportement des ménages en matière d'épargne et de consommation, y intégrer les habitudes, la formation d'opinions, le statut social ;

- complexifier le marché du travail, intégrer la formation professionnelle et l'hétérogénéité des compétences, développer les dynamiques sociales au sein des entreprises, intégrer la notion de désutilité du travail, étudier les effets d'un système d'indemnisation du chômage ;
- intégrer un secteur gouvernemental, pour l'étude des effets de la dépense publique, du niveau de prélèvements, de la politique budgétaire ;
- intégrer les dynamiques spatiales en situant les agents dans un espace géographique virtuel ;
- enfin — puisqu'un modèle multi-agents est toujours un modèle peuplé de modèles — aborder l'étude des économies ouvertes, selon des configurations variées, par la construction d'un modèle global peuplé de modèles d'économies nationales multiples en interaction. . .

Cela fait beaucoup pour un chercheur-programmeur isolé. En revanche, une équipe interdisciplinaire associant économistes et informaticiens et dotée d'ordinateurs suffisamment puissants pourrait être constituée dans l'objectif de transformer le modèle de base en une librairie logicielle « open source » dédiée à la modélisation macroéconomique multi-agents et à partir de laquelle toutes sortes d'extensions — celles que nous avons envisagées, comme celles auxquelles nous n'avons pas pensé — pourraient être librement développées.

Annexe A

Ressources

A.1 Application web

Le modèle prend la forme d'une application Java exécutable dans n'importe quel navigateur internet (une « applet »). Cette application, nommée *Jamel* (pour « Java Agent-based MacroEconomic Laboratoty ») est disponible sur la page :

`http://p.seppecher.free.fr/jamel/`

Cette application correspond à une première version du modèle, avec des agents aux comportements moins bien dessinés que dans la dernière version utilisée pour notre thèse. Néanmoins, les scénarios qui accompagnent le logiciel permettent de reproduire la plupart des phénomènes observés dans les études dynamiques présentées ici sur la base de la dernière version (choc de productivité, choc négatif de la dépense, choc de flexibilité, introduction d'un salaire minimum, dysfonctionnement bancaire).

A.2 Code source

Sur ce site, on trouvera aussi de larges extraits du code source du projet, accompagné de sa documentation (« Javadoc »). Le code source est publié au fur et à mesure que nous trouvons le temps de le réécrire plus clairement et de le documenter. La totalité du projet est disponible sur demande en écrivant à l'adresse :

`p.seppecher@free.fr`

Annexe B

Scénario de base – Matrices de bilans sectoriels (1999–2005)

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		0		0
Dépôts	0	0	0	0
Crédits		0	0	0
Capital	0	0	0	0
Balance	0	0	0	0
Σ	0	0	0	0

TABLE B.1 – 1999-12

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		11226000		11226000
Dépôts	11226000	0	-11226000	0
Crédits		-11271584	11271584	0
Capital	0	45584	-45584	0
Balance	-11226000	0	0	-11226000
Σ	0	0	0	0

TABLE B.2 – 2000-01

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		23447406		23447406
Dépôts	23447406	0	-23447406	0
Crédits		-23588090	23588090	0
Capital	0	140684	-140684	0
Balance	-23447406	0	0	-23447406
Σ	0	0	0	0

TABLE B.3 – 2000-02

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		36612077		36612077
Dépôts	36612077	0	-36612077	0
Crédits		-36901289	36901289	0
Capital	0	289212	-289212	0
Balance	-36612077	0	0	-36612077
Σ	0	0	0	0

TABLE B.4 – 2000-03

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		50650755		50650755
Dépôts	50650755	0	-50650755	0
Crédits		-51145999	51145999	0
Capital	0	495244	-495244	0
Balance	-50650755	0	0	-50650755
Σ	0	0	0	0

TABLE B.5 – 2000-04

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		65314235		65314235
Dépôts	65314235	182503	-65496738	0
Crédits		-66259417	66259417	0
Capital	0	762679	-762679	0
Balance	-65314235	0	0	-65314235
Σ	0	0	0	0

TABLE B.6 – 2000-05

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		51490419		51490419
Dépôts	38752318	41960405	-80712723	0
Crédits		-81806581	81806581	0
Capital	12738101	-11644243	-1093858	0
Balance	-51490419	0	0	-51490419
Σ	0	0	0	0

TABLE B.7 – 2000-06

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		46811461		46811461
Dépôts	24762997	57407114	-82170111	0
Crédits		-83602459	83602459	0
Capital	22048464	-20616116	-1432348	0
Balance	-46811461	0	0	-46811461
Σ	0	0	0	0

TABLE B.8 – 2000-07

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		46420000		46420000
Dépôts	17023524	65760312	-82783836	0
Crédits		-84558564	84558564	0
Capital	29396476	-27621748	-1774728	0
Balance	-46420000	0	0	-46420000
Σ	0	0	0	0

TABLE B.9 – 2000-08

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		47972997		47972997
Dépôts	12380011	70427161	-82807172	0
Crédits		-84925767	84925767	0
Capital	35592986	-33474391	-2118595	0
Balance	-47972997	0	0	-47972997
Σ	0	0	0	0

TABLE B.10 – 2000-09

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		50721562		50721562
Dépôts	9501533	73088290	-82589823	0
Crédits		-85052796	85052796	0
Capital	41220029	-38757056	-2462973	0
Balance	-50721562	0	0	-50721562
Σ	0	0	0	0

TABLE B.11 – 2000-10

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		56220157		56220157
Dépôts	10342376	72010128	-82352504	0
Crédits		-85160293	85160293	0
Capital	45877781	-43069992	-2807789	0
Balance	-56220157	0	0	-56220157
Σ	0	0	0	0

TABLE B.12 – 2000-11

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		59313929		59313929
Dépôts	8385137	73675130	-82060267	0
Crédits		-85213084	85213084	0
Capital	50928792	-47775975	-3152817	0
Balance	-59313929	0	0	-59313929
Σ	0	0	0	0

TABLE B.13 – 2000-12

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		63763225		63763225
Dépôts	7538080	62726750	-70264830	0
Crédits		-73762675	73762675	0
Capital	56225145	-52727300	-3497845	0
Balance	-63763225	0	0	-63763225
Σ	0	0	0	0

TABLE B.14 – 2001-01

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		69446151		69446151
Dépôts	7367896	50992308	-58360204	0
Crédits		-62158012	62158012	0
Capital	62078255	-58280447	-3797808	0
Balance	-69446151	0	0	-69446151
Σ	0	0	0	0

TABLE B.15 – 2001-02

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		75856383		75856383
Dépôts	8103404	40536162	-48639566	0
Crédits		-52700295	52700295	0
Capital	67752979	-63692250	-4060729	0
Balance	-75856383	0	0	-75856383
Σ	0	0	0	0

TABLE B.16 – 2001-03

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		82208034		82208034
Dépôts	10171691	31153970	-41325661	0
Crédits		-45628398	45628398	0
Capital	72036343	-67733606	-4302737	0
Balance	-82208034	0	0	-82208034
Σ	0	0	0	0

TABLE B.17 – 2001-04

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		87867677		87867677
Dépôts	12667613	23465089	-36132702	0
Crédits		-40670711	40670711	0
Capital	75200064	-70662055	-4538009	0
Balance	-87867677	0	0	-87867677
Σ	0	0	0	0

TABLE B.18 – 2001-05

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		92946605		92946605
Dépôts	14494943	21626904	-36121847	0
Crédits		-40661544	40661544	0
Capital	78451662	-73911965	-4539697	0
Balance	-92946605	0	0	-92946605
Σ	0	0	0	0

TABLE B.19 – 2001-06

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		97309834		97309834
Dépôts	15621727	29404432	-45026159	0
Crédits		-49584082	49584082	0
Capital	81688107	-77130184	-4557923	0
Balance	-97309834	0	0	-97309834
Σ	0	0	0	0

TABLE B.20 – 2001-07

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		101257720		101257720
Dépôts	16007823	36031855	-52039678	0
Crédits		-56870926	56870926	0
Capital	85249897	-80418649	-4831248	0
Balance	-101257720	0	0	-101257720
Σ	0	0	0	0

TABLE B.21 – 2001-08

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		104979771		104979771
Dépôts	16062004	42311701	-58373705	0
Crédits		-63495241	63495241	0
Capital	88917767	-83796231	-5121536	0
Balance	-104979771	0	0	-104979771
Σ	0	0	0	0

TABLE B.22 – 2001-09

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		108607372		108607372
Dépôts	15788607	48786682	-64575289	0
Crédits		-70003105	70003105	0
Capital	92818765	-87390949	-5427816	0
Balance	-108607372	0	0	-108607372
Σ	0	0	0	0

TABLE B.23 – 2001-10

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		112287600		112287600
Dépôts	15384906	55701277	-71086183	0
Crédits		-76839463	76839463	0
Capital	96902694	-91149414	-5753280	0
Balance	-112287600	0	0	-112287600
Σ	0	0	0	0

TABLE B.24 – 2001-11

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		116606335		116606335
Dépôts	14980358	63024235	-78004593	0
Crédits		-84105185	84105185	0
Capital	101625977	-95525385	-6100592	0
Balance	-116606335	0	0	-116606335
Σ	0	0	0	0

TABLE B.25 – 2001-12

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		120894286		120894286
Dépôts	14823628	70442409	-85266037	0
Crédits		-91741869	91741869	0
Capital	106070658	-99594826	-6475832	0
Balance	-120894286	0	0	-120894286
Σ	0	0	0	0

TABLE B.26 – 2002-01

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		125032065		125032065
Dépôts	14789863	77576199	-92366062	0
Crédits		-99247769	99247769	0
Capital	110242202	-103360495	-6881707	0
Balance	-125032065	0	0	-125032065
Σ	0	0	0	0

TABLE B.27 – 2002-02

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		128961245		128961245
Dépôts	14683277	83347372	-98030649	0
Crédits		-105347692	105347692	0
Capital	114277968	-106960925	-7317043	0
Balance	-128961245	0	0	-128961245
Σ	0	0	0	0

TABLE B.28 – 2002-03

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		132713991		132713991
Dépôts	14632056	86900105	-101532161	0
Crédits		-109310643	109310643	0
Capital	118081935	-110303453	-7778482	0
Balance	-132713991	0	0	-132713991
Σ	0	0	0	0

TABLE B.29 – 2002-04

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136188690		136188690
Dépôts	14865749	87286997	-102152746	0
Crédits		-110411828	110411828	0
Capital	121322941	-113063859	-8259082	0
Balance	-136188690	0	0	-136188690
Σ	0	0	0	0

TABLE B.30 – 2002-05

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		139545841		139545841
Dépôts	15241895	84617285	-99859180	0
Crédits		-108610299	108610299	0
Capital	124303946	-115552827	-8751119	0
Balance	-139545841	0	0	-139545841
Σ	0	0	0	0

TABLE B.31 – 2002-06

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		142384983		142384983
Dépôts	15866130	81101429	-96967559	0
Crédits		-106213571	106213571	0
Capital	126518853	-117272841	-9246012	0
Balance	-142384983	0	0	-142384983
Σ	0	0	0	0

TABLE B.32 – 2002-07

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		144609391		144609391
Dépôts	16424668	79316429	-95741097	0
Crédits		-105482020	105482020	0
Capital	128184723	-118443800	-9740923	0
Balance	-144609391	0	0	-144609391
Σ	0	0	0	0

TABLE B.33 – 2002-08

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		146207630		146207630
Dépôts	16850795	78408851	-95259646	0
Crédits		-105494767	105494767	0
Capital	129356835	-119121714	-10235121	0
Balance	-146207630	0	0	-146207630
Σ	0	0	0	0

TABLE B.34 – 2002-09

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		147240544		147240544
Dépôts	16965854	78184833	-95150687	0
Crédits		-105880503	105880503	0
Capital	130274690	-119544874	-10729816	0
Balance	-147240544	0	0	-147240544
Σ	0	0	0	0

TABLE B.35 – 2002-10

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		147945951		147945951
Dépôts	16812903	78371531	-95184434	0
Crédits		-106340435	106340435	0
Capital	131133048	-119977047	-11156001	0
Balance	-147945951	0	0	-147945951
Σ	0	0	0	0

TABLE B.36 – 2002-11

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		148782885		148782885
Dépôts	16610740	78789319	-95400059	0
Crédits		-106794722	106794722	0
Capital	132172145	-120777482	-11394663	0
Balance	-148782885	0	0	-148782885
Σ	0	0	0	0

TABLE B.37 – 2002-12

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		149504447		149504447
Dépôts	16357398	79681327	-96038725	0
Crédits		-107577164	107577164	0
Capital	133147049	-121608610	-11538439	0
Balance	-149504447	0	0	-149504447
Σ	0	0	0	0

TABLE B.38 – 2003-01

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		150115573		150115573
Dépôts	16074986	80196731	-96271717	0
Crédits		-107922317	107922317	0
Capital	134040587	-122389987	-11650600	0
Balance	-150115573	0	0	-150115573
Σ	0	0	0	0

TABLE B.39 – 2003-02

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		150603913		150603913
Dépôts	15934132	80591294	-96525426	0
Crédits		-108250353	108250353	0
Capital	134669781	-122944854	-11724927	0
Balance	-150603913	0	0	-150603913
Σ	0	0	0	0

TABLE B.40 – 2003-03

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		150958106		150958106
Dépôts	15732522	80796188	-96528710	0
Crédits		-108308739	108308739	0
Capital	135225584	-123445555	-11780029	0
Balance	-150958106	0	0	-150958106
Σ	0	0	0	0

TABLE B.41 – 2003-04

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		151034158		151034158
Dépôts	15467084	81543114	-97010198	0
Crédits		-108819024	108819024	0
Capital	135567074	-123758248	-11808826	0
Balance	-151034158	0	0	-151034158
Σ	0	0	0	0

TABLE B.42 – 2003-05

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		151089449		151089449
Dépôts	15154309	81509067	-96663376	0
Crédits		-108511338	108511338	0
Capital	135935140	-124087178	-11847962	0
Balance	-151089449	0	0	-151089449
Σ	0	0	0	0

TABLE B.43 – 2003-06

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		150898769		150898769
Dépôts	15075757	81736016	-96811773	0
Crédits		-108661914	108661914	0
Capital	135823012	-123972871	-11850141	0
Balance	-150898769	0	0	-150898769
Σ	0	0	0	0

TABLE B.44 – 2003-07

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		150639643		150639643
Dépôts	14852475	81388692	-96241167	0
Crédits		-108101600	108101600	0
Capital	135787168	-123926735	-11860433	0
Balance	-150639643	0	0	-150639643
Σ	0	0	0	0

TABLE B.45 – 2003-08

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		150106541		150106541
Dépôts	14640362	81304591	-95944953	0
Crédits		-107781833	107781833	0
Capital	135466179	-123629299	-11836880	0
Balance	-150106541	0	0	-150106541
Σ	0	0	0	0

TABLE B.46 – 2003-09

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		149382731		149382731
Dépôts	14489535	80776173	-95265708	0
Crédits		-107074256	107074256	0
Capital	134893196	-123084648	-11808548	0
Balance	-149382731	0	0	-149382731
Σ	0	0	0	0

TABLE B.47 – 2003-10

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		148416129		148416129
Dépôts	14086543	80427122	-94513665	0
Crédits		-106271138	106271138	0
Capital	134329586	-122572113	-11757473	0
Balance	-148416129	0	0	-148416129
Σ	0	0	0	0

TABLE B.48 – 2003-11

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		147576143		147576143
Dépôts	13891275	80366539	-94257814	0
Crédits		-105944442	105944442	0
Capital	133684868	-121998240	-11686628	0
Balance	-147576143	0	0	-147576143
Σ	0	0	0	0

TABLE B.49 – 2003-12

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		146874503		146874503
Dépôts	13828390	79238984	-93067374	0
Crédits		-104700356	104700356	0
Capital	133046113	-121413131	-11632982	0
Balance	-146874503	0	0	-146874503
Σ	0	0	0	0

TABLE B.50 – 2004-01

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		145884946		145884946
Dépôts	13860023	78043835	-91903858	0
Crédits		-103439314	103439314	0
Capital	132024923	-120489467	-11535456	0
Balance	-145884946	0	0	-145884946
Σ	0	0	0	0

TABLE B.51 – 2004-02

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		144706296		144706296
Dépôts	13714122	77928996	-91643118	0
Crédits		-103059322	103059322	0
Capital	130992174	-119575970	-11416204	0
Balance	-144706296	0	0	-144706296
Σ	0	0	0	0

TABLE B.52 – 2004-03

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		143582093		143582093
Dépôts	13622568	77513341	-91135909	0
Crédits		-102473220	102473220	0
Capital	129959525	-118622214	-11337311	0
Balance	-143582093	0	0	-143582093
Σ	0	0	0	0

TABLE B.53 – 2004-04

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		142383697		142383697
Dépôts	13581625	77158178	-90739803	0
Crédits		-102007448	102007448	0
Capital	128802072	-117534427	-11267645	0
Balance	-142383697	0	0	-142383697
Σ	0	0	0	0

TABLE B.54 – 2004-05

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		141222529		141222529
Dépôts	13492346	77275310	-90767656	0
Crédits		-101975406	101975406	0
Capital	127730183	-116522433	-11207750	0
Balance	-141222529	0	0	-141222529
Σ	0	0	0	0

TABLE B.55 – 2004-06

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		140275194		140275194
Dépôts	13299519	77316414	-90615933	0
Crédits		-101794454	101794454	0
Capital	126975675	-115797154	-11178521	0
Balance	-140275194	0	0	-140275194
Σ	0	0	0	0

TABLE B.56 – 2004-07

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		139452882		139452882
Dépôts	13043439	77719579	-90763018	0
Crédits		-101914918	101914918	0
Capital	126409443	-115257543	-11151900	0
Balance	-139452882	0	0	-139452882
Σ	0	0	0	0

TABLE B.57 – 2004-08

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		138843662		138843662
Dépôts	12970248	77017261	-89987509	0
Crédits		-101131632	101131632	0
Capital	125873414	-114729291	-11144123	0
Balance	-138843662	0	0	-138843662
Σ	0	0	0	0

TABLE B.58 – 2004-09

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		138147047		138147047
Dépôts	13058705	76712595	-89771300	0
Crédits		-100866920	100866920	0
Capital	125088342	-113992722	-11095620	0
Balance	-138147047	0	0	-138147047
Σ	0	0	0	0

TABLE B.59 – 2004-10

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		137529877		137529877
Dépôts	12956671	76004777	-88961448	0
Crédits		-100016548	100016548	0
Capital	124573206	-113518106	-11055100	0
Balance	-137529877	0	0	-137529877
Σ	0	0	0	0

TABLE B.60 – 2004-11

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136973708		136973708
Dépôts	12920481	75554972	-88475453	0
Crédits		-99462352	99462352	0
Capital	124053227	-113066328	-10986899	0
Balance	-136973708	0	0	-136973708
Σ	0	0	0	0

TABLE B.61 – 2004-12

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136389824		136389824
Dépôts	12972289	75256764	-88229053	0
Crédits		-99150753	99150753	0
Capital	123417535	-112495835	-10921700	0
Balance	-136389824	0	0	-136389824
Σ	0	0	0	0

TABLE B.62 – 2005-01

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		135923162		135923162
Dépôts	12892413	75600408	-88492821	0
Crédits		-99365158	99365158	0
Capital	123030749	-112158412	-10872337	0
Balance	-135923162	0	0	-135923162
Σ	0	0	0	0

TABLE B.63 – 2005-02

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		135769257		135769257
Dépôts	12868669	76174929	-89043598	0
Crédits		-99905775	99905775	0
Capital	122900588	-112038411	-10862177	0
Balance	-135769257	0	0	-135769257
Σ	0	0	0	0

TABLE B.64 – 2005-03

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		135659707		135659707
Dépôts	12779409	76912427	-89691836	0
Crédits		-100580322	100580322	0
Capital	122880298	-111991812	-10888486	0
Balance	-135659707	0	0	-135659707
Σ	0	0	0	0

TABLE B.65 – 2005-04

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		135819040		135819040
Dépôts	12748305	77443975	-90192280	0
Crédits		-101131177	101131177	0
Capital	123070735	-112131838	-10938897	0
Balance	-135819040	0	0	-135819040
Σ	0	0	0	0

TABLE B.66 – 2005-05

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136030743		136030743
Dépôts	12734795	77936665	-90671460	0
Crédits		-101664346	101664346	0
Capital	123295948	-112303062	-10992886	0
Balance	-136030743	0	0	-136030743
Σ	0	0	0	0

TABLE B.67 – 2005-06

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136361819		136361819
Dépôts	12849025	77512411	-90361436	0
Crédits		-101409429	101409429	0
Capital	123512794	-112464801	-11047993	0
Balance	-136361819	0	0	-136361819
Σ	0	0	0	0

TABLE B.68 – 2005-07

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136352048		136352048
Dépôts	12912576	77115546	-90028122	0
Crédits		-101088530	101088530	0
Capital	123439472	-112379064	-11060408	0
Balance	-136352048	0	0	-136352048
Σ	0	0	0	0

TABLE B.69 – 2005-08

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136315582		136315582
Dépôts	12993362	76849151	-89842513	0
Crédits		-100888691	100888691	0
Capital	123322220	-112276042	-11046178	0
Balance	-136315582	0	0	-136315582
Σ	0	0	0	0

TABLE B.70 – 2005-09

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136277233		136277233
Dépôts	13033798	76882988	-89916786	0
Crédits		-100943289	100943289	0
Capital	123243435	-112216932	-11026503	0
Balance	-136277233	0	0	-136277233
Σ	0	0	0	0

TABLE B.71 – 2005-10

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		136310871		136310871
Dépôts	13017553	77155844	-90173397	0
Crédits		-101195227	101195227	0
Capital	123293318	-112271488	-11021830	0
Balance	-136310871	0	0	-136310871
Σ	0	0	0	0

TABLE B.72 – 2005-11

	Ménages	Entreprises	Banque	Σ
Stocks		135821105		135821105
Dépôts	12969002	76818346	-89787348	0
Crédits		-100138752	100138752	0
Capital	122852103	-112500699	-10351404	0
Balance	-135821105	0	0	-135821105
Σ	0	0	0	0

TABLE B.73 – 2005-12

Bibliographie

- ALLIOT, J.-M., ET N. DURAND (2005) : “Algorithmes génétiques,” Centre d’Etudes de la Navigation Aérienne.
- AMBLARD, F., J. ROUCHIER, ET P. BOMMEL (2006) : “Evaluation et validation de modèles multiagents,” dans *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société*, p. 87–122. Hermes-Sciences Lavoisier, Paris.
- ARIFOVIC, J. (2000) : “Evolutionary Algorithms in Macroeconomic Models,” *Macroeconomic Dynamics*, p. 373–414.
- ARTHUR, W. B. (1999) : “Complexity and the Economy,” *Science*, 284, 107–109.
- (2006) : “Out-of Equilibrium Economics and Agent-Based Modeling,” dans *Handbook of computational economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2, p. 1551–1564. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- AXELROD, R. (1984) : *The Evolution of cooperation*. Basic Books, New York.
- AXELROD, R., ET W. D. HAMILTON (1981) : “The Evolution of Cooperation,” *Science*, 211(4489), 1390–1396.
- AXTELL, R. (2004) : “Multi-Agent Systems Macro : A Prospectus,” The Brookings Institution.
- (2005) : “The Complexity of Exchange,” *The Economic Journal*, 115(504), 193–210.
- (2006) : “La fin des débuts pour les systèmes multi-agents en sciences sociales,” dans *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société*, ed. F. Amblard, et D. Phan, p. 141–150. Hermes-Sciences Lavoisier, Paris.
- (2007) : “What economic agents do : How cognition and interaction lead to emergence and complexity,” *The Review of Austrian Economics*, 20(2–3), 105–122.

- BOUGRINE, H., ET M. SECCARECCIA (2003) : “Le rôle des impôts dans l’économie nationale,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon. Economica, Paris.
- BRENNER, T. (2006) : “Agent Learning Representation - Advice in Modelling Economic Learning,” dans *Handbook of computational economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2, chap. 18, p. 895–947. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- BRUUN, C. (1999) : “Agent-Based Keynesian Economics - Simulating a Monetary Production System Bottom-Up,” Document de Travail, Aalborg University.
- BRUUN, C., ET C. HEYN-JOHNSEN (2009) : “The Paradox of Monetary Profits : An Obstacle to Understanding Financial and Economic Crisis ?,” Economics Discussion Paper 2009-52, Kiel Institute for the World Economy.
- BUCHANAN, M. (2009) : “Meltdown modelling, Could agent-based computer models prevent another financial crisis ?,” *Nature*, 460(6), 680–682.
- CANNON, W. B. (1932) : *The wisdom of the body*. Kegan, Trench and Trubner, London.
- CHELOUAH, R., ET P. SIARRY (2003) : “Genetic and Nelder-Mead algorithms hybridized for a more accurate global optimization of continuous multim minima functions,” *European Journal of Operational Research*, 148, 335–348.
- CHINNECK, J. W. (2006) : “Heuristics for Discrete Search : Genetic Algorithms and Simulated Annealing,” Carleton University, Ottawa.
- CINCOTTI, S., M. RABERTO, ET A. TEGLIO (2010) : “Credit Money and Macroeconomic Instability in the Agent-based Model and Simulator Eurace,” *Economics : The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 4(26).
- COHEN, K. J. (1960) : “Simulation of the Firm,” *The American Economic Review*, 50(2), 534–540.
- COHEN, K. J., ET R. M. CYERT (1961) : “Computer Models in Dynamic Economics,” *The Quarterly Journal of Economics*, 75(1), 112–127.
- COLANDER, D. (2008) : “Complexity and the History of Economic Thought,” Document de Travail 08-04, Middlebury College.
- COLANDER, D., H. FÖLLMER, A. HAAS, M. GOLDBERG, K. JUSELIUS, A. KIRMAN, T. LUX, ET B. SLOTH (2009) : “The Financial Crisis and the Systemic Failure of Academic Economics,” Document de Travail, Kiel Institute for the World Economy.
- COLANDER, D., P. HOWITT, A. KIRMAN, A. LEIJONHUFVUD, ET P. MEHRLING (2008) : “Beyond DSGE Models : Toward an Empirically Based Macroeconomics,” *American Economic Review : Papers & Proceedings*, 98(2), 236–240.

- COPELAND, M. A. (1949) : “Social Accounting for Moneyflows,” *The Accounting Review*, 24(3), 254–264.
- COUTTS, K., W. GODLEY, ET W. NORDHAUS (1978) : *Industrial Pricing in the United Kingdom*. Cambridge University Press, Cambridge.
- CYERT, R. M., ET J. G. MARCH (1963) : *A Behavioral Theory of The Firm*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (2003) : *A Behavioral Theory of The Firm*. Blackwell publishers, Oxford.
- DAVIDSON, P. (2003) : “Quels sont les éléments essentiels de la théorie monétaire post-keynésienne?,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon. Economica, Paris.
- DAWID, H., S. GEMKOW, P. HARTING, ET M. NEUGART (2009) : “On the Effects of Skill Upgrading in the Presence of Spatial Labor Market Frictions : An Agent-Based Analysis of Spatial Policy Design,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(4), 5.
- DAWID, H., S. GEMKOW, P. HARTING, S. VAN DER HOOG, ET M. NEUGART (2011) : “The Eurace@Unibi Model : An Agent-Based Macroeconomic Model for Economic Policy Analysis,” Document de Travail, Bielefeld University.
- DAWID, H., ET P. HARTING (2010) : “Capturing Firm Behavior in Agent-Based Models of Industry Evolution and Macroeconomic Dynamics,” Document de Travail, Bielefeld University.
- DELLI GATTI, D., E. GAFFEO, ET M. GALLEGATI (2010) : “Complex agent-based macroeconomics : a manifesto for a new paradigm,” *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 5(1), 5.
- DELLI GATTI, D., E. GAFFEO, M. GALLEGATI, G. GIULIONI, ET A. PALESTRINI (2008) : *Emergent macroeconomics : an Agent-Based Approach to Business Fluctuations*. Springer, Milan.
- DESELL, T., B. SZYMANSKI, ET C. VARELA (2008) : “An asynchronous hybrid genetic-simplex search for modeling the Milky Way galaxy using volunteer computing,” dans *GECCO’ 08 : Proceedings of the 10th annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, p. 921–928, New York, USA. ACM.
- DOSI, G., G. FAGIOLO, ET A. ROVENTINI (2005) : “Animal Spirits, Lumpy Investment, and Endogenous Business Cycles,” LEM papers series, Laboratory of Economics and Management (LEM), Sant’Anna School of Advanced Studies, Pisa, Italy.

- (2008) : “Schumpeter Meeting Keynes : A Policy-Friendly Model of Endogenous Growth and Business Cycles,” Working Papers 50, Università di Verona, Dipartimento di Scienze economiche.
- DRÉO, J., A. PÉTROWSKI, ET P. SIARRY (2011) : *Métaheuristiques pour l’optimisation difficile*. Eyrolles, Paris.
- DUFFY, J. (2006) : “Agent-Based Models and Human Subject Experiments,” dans *Handbook of computational economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2, chap. 19, p. 949–1011. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- DUMÉNIL, G., ET D. LÉVY (1987) : “The dynamics of competition : a restoration of the classical analysis,” *Cambridge Journal of Economics*, 11, 133–164.
- (1991) : “Micro Adjustment toward Long term Equilibrium,” *Journal of economic theory*, 53, 369–395.
- (1996) : *La dynamique du capital*. PUF, Paris.
- DUPONT, F., ET E. REUS (1989) : “Le profit macroéconomique monétaire,” *Economie appliquée*, XLII(2), 87–114.
- DURAND, N., ET J.-M. ALLIOT (1999) : “A Combined Nelder-Mead Simplex and Genetic Algorithm,” dans *GECCO’99 : Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, p. 921–928, Orlando, FL, USA. Morgan Kaufmann.
- EPSTEIN, J. M. (1999) : “Agent-Based Computational Models And Generative Social Science,” *Complexity*, 4(5), 41–60.
- (2006) : “Remarks on the foundations of agent-based generative social science,” dans *Handbook of Computational Economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2, p. 1585–1604. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- FARMER, J. D., ET D. FOLEY (2009) : “The economy needs agent-based modelling,” *Nature*, 460(August 6), 685–686.
- FARMER, J. D., ET J. GEANAKOPOLOS (2009) : “The virtues and vices of equilibrium and the future of financial economics,” *Complexity*, 14(3).
- FARMER, J. D., P. PATELLI, ET I. I. ZOVKO (2005) : “The predictive power of zero intelligence in financial markets,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(6).
- FERBER, J. (2006) : “Introduction aux concepts et méthodologies de conception multi-agents,” dans *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société*, p. 11–36. Hermes-Sciences Lavoisier, Paris.
- FORGES DAVANZATI, G., ET R. REALFONZO (2005) : “Bank Mergers, Monopoly Power and Unemployment : A Monetary Circuit Approach,” dans *Monetary Theory*

- of Production Tradition and Perspectives*, ed. G. Fontana, et R. Realfonzo, p. 155–171. Palgrave Macmillan, Basingstoke (UK).
- FRANKLIN, S., ET A. GRAESSER (1996) : “Is it an Agent, or just a Program ? : A Taxonomy for Autonomous Agents,” dans *Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. Springer-Verlag.
- GAFFEO, E., M. CATALANO, F. CLEMENTI, D. DELLI GATTI, M. GALLEGATI, ET A. RUSSO (2008) : “Reflections on Modern Macroeconomics : Can We Travel Along a Safer Road ?,” Document de Travail, Department of Economics and CEEL, University of Trento.
- GALLEGATI, M., ET A. KIRMAN (1999) : *Beyond the representative agent*. E. Elgar, Cheltenham ; Northampton (Mass.).
- GINOT, V., ET H. MONOD (2006) : “Explorer les modèles par la simulation : application aux analyses de sensibilité,” dans *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société*, p. 61–86. Hermes-Sciences Lavoisier, Paris.
- GINTIS, H. (2006) : “The Emergence of a Price System from Decentralized Bilateral Exchange,” *Contributions to Theoretical Economics*, 6(1).
- GLORIA-PALERMO, S. (2011) : “In search of the right tool, From formalism to constructivist modelling,” Document de Travail, Gredeg, Université de Nice Sophia Antipolis.
- GLOVER, F. (1986) : “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence,” *Computers & Operations Research*, 13(5), 533 – 549.
- GODE, D. K., ET S. SUNDER (1993) : “Allocative Efficiency of Markets with Zero-Intelligence Traders : Market as a Partial Substitute for Individual Rationality,” *Journal of Political Economy*, 101(1), 119–137.
- GODLEY, W. (1996) : “Money, finance and national income determination : An integrated approach,” Document de Travail 167, Jerome Levy Economics Institute of Bard College.
- GODLEY, W., ET M. LAVOIE (2007) : *Monetary economics, An Integrated Approach to Credit, Money, Income, Production and Wealth*. Palgrave Macmillan, Basingstoke.
- GRAZIANI, A. (1990) : “The theory of the monetary circuit,” *Economies et Sociétés*, 24(6), 7–36.
- (2003a) : “Microéconomie et macroéconomie : à qui la priorité ?,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon, p. 121–128. Economica, Paris.

- (2003b) : *The Monetary Theory of Production*. Cambridge University Press, Cambridge.
- HEMPEL, C. G., ET P. OPPENHEIM (1948) : “Studies in the Logic of Explanation,” *Philosophy of Science*, 15(2), 135–175.
- HENRY, J., ET M. SECCARECCIA (1982) : “La théorie post-keynésienne : contributions et essais de synthèse - Introduction,” *l'Actualité économique*, 58(1-2), 5–16.
- HIRSCHMAN, A. O. (1970) : *Exit, Voice, and Loyalty : Responses to Decline in Firms, Organizations, and States*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- HOLLAND, J. H. (1975) : *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- (1992) : “Complex Adaptive Systems,” *Daedalus*, 121(1).
- HOWITT, P. (2008) : “Macroeconomics with Intelligent Autonomous Agents,” dans *Macroeconomics in the small and the large : essays on microfoundations, macroeconomic applications and economic history in honor of Axel Leijonhufvud*, ed. R. E. A. Farmer, p. 157–177. Edward Elgar, Cheltenham (UK), Northampton (USA).
- KALECKI, M. (1939) : *Essays in the Theory of Economic Fluctuations*. Allen & Unwin.
- (1971) : *Selected essays on the dynamics of the capitalist economy 1933-1970*. Cambridge University Press, Cambridge.
- KEYNES, J. M. (1923 [1971]) : *A tract on monetary reform*, vol. 4 de *The collected writings of John Maynard Keynes*. St. Martin's Press, New York.
- (1933 [1963]) : “On a theory of a monetary economy,” *Nebraska Journal of Economics & Business*, 2(2), 7–9.
- (1933 [1979]) : *The General Theory and After : A supplement*, vol. 29 de *The collected writings of John Maynard Keynes*. St. Martin's Press, New York.
- (1936) : *The General Theory of Employment, Interest and Money*. Harcourt, Brace and company, New York.
- (1936 [1974]) : *The General Theory of Employment, Interest and Money*. St. Martin's Press, New York.
- (1936 [1998]) : *Théorie générale de l'emploi, de l'intérêt et de la monnaie*. Payot, Paris.
- (1939) : “Relative Movements of Real Wages and Output,” *The Economic Journal*, 49(193).

- KIRMAN, A. P. (1992) : “Whom or What Does the Representative Individual Represent ?,” *Journal of economic perspectives*, 6(2).
- LANGTON, C. G. (1986) : “Studying artificial life with cellular automata,” *Physica 22D*, 58(1-2), 191–221.
- LAVOIE, M. (1982) : “Les post-keynésiens et la monnaie endogène,” *L’Actualité économique*, 58(1-2), 191–221.
- (1987) : *Macroéconomie, théorie et controverses postkeynésiennes*. Dunod, Paris.
- (1992) : *Foundations of Post-Keynesian Economic Analysis*. Edward Elgar, Aldershot.
- (2000) : “A Primer on Endogenous Credit-money,” Document de Travail, University of Ottawa.
- (2003) : “La monnaie endogène dans un cadre théorique et comptable cohérent,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon, p. 143–161. Economica, Paris.
- (2004) : *L’économie postkeynésienne*. La découverte, Paris.
- LAVOIE, M., ET W. GODLEY (2001) : “Kaleckian Models of Growth in a Coherent Stock-Flow Monetary Framework : A Kaldorian View,” *Journal of Post Keynesian Economics*, 24(2), 277–311.
- LE BOURVA, J. (1959) : “La théorie de l’inflation, le rapport des experts et l’opération de décembre 1958,” *Revue économique*, 10(5), 713–754.
- (1962) : “Création de la monnaie et multiplicateur du crédit,” *Revue économique*, 13(1), 29–56.
- LEGAY, J.-M. (1973) : “Introduction à l’étude des modèles à compartiments,” dans *La Méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale*. Informatique et biosphère, Paris.
- (1997) : *L’expérience et le modèle : un discours sur la méthode*. Institut national de la recherche agronomique, Paris.
- LEIJONHUFVUD, A. (2006) : “Agent-based macro,” dans *Handbook of Computational Economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2, p. 1625–1637. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- MARKS, R. (2006) : “Market Design Using Agent-Based Models,” dans *Handbook of Computational Economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2, p. 1349–1380. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.

- MARX, K. (1847 [1976]) : *Travail salarié et capital*. Editions en langues étrangères, Pékin.
- (1865 [1975]) : *Salaires, prix et profit*. Editions en langues étrangères, Pékin.
- (1885 [1977]) : *Le Capital*, vol. 2. Editions sociales, Paris.
- MESSORI, M., ET A. ZAZZARO (2004) : “Monetary profits within the circuit : Ponzi finance or ‘mors tua, vita mea’ ?,” document de travail 200, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Economia.
- MINSKY, H. (1996) : “The essential characteristics of Post Keynesian economics,” dans *Money in Motion : The Circulation and Post-Keynesian Approaches*, ed. G. Deleplace, et E. Nell, p. 532–545. Macmillan, London.
- MOORE, B. J. (2003) : “L’endogénéité de l’offre de monnaie : fixe-t-on le prix ou la quantité des réserves ?,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon. Economica, Paris.
- NELDER, J., ET R. MEAD (1965) : “A simplex method for function minimization,” *The Computer Journal*, 7(4), 308–313.
- NELSON, R., ET S. WINTER (1982) : *An evolutionary theory of economic change*. Belknap Press.
- OSMAN, I. H., ET J. P. KELLY (1996) : “Meta-Heuristics : An Overview,” dans *Meta-Heuristics : Theory & Applications*, ed. I. H. Osman, et J. P. Kelly. Kluwer Academic Publisher.
- PALLEY, T. I. (2003) : “Monnaie endogène : signification et portée,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon. Economica, Paris.
- PARGUEZ, A. (1975) : *Monnaie et macroéconomie*. Economica, Paris.
- (2003) : “Monnaie et capitalisme : la théorie générale du circuit,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon. Economica, Paris.
- (2004) : “The Solution of the Paradox of Profits in Money, Credit and the State,” dans *Essays in Honour of Augusto Graziani*, ed. R. Arena, et N. Salvadori, p. 263–276. Ashgate, London.
- PASCAL, B. (1671 [1976]) : *Pensées*. Garnier-Flamarion, Paris.
- PHAN, D. (2003) : “Agent-Based Computational Economics and Cognitive Economics,” Document de Travail, GET-ENST de Bretagne and ICI-Université de Bretagne Occidentale.

- (2006) : “Modélisation et simulation multi-agents en économie et sciences sociales comme *compléments* des formalismes classiques,” dans *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société*, ed. F. Amblard, et D. Phan, p. 231–236. Hermes-Sciences Lavoisier, Paris.
- POULON, F. (1982) : *Macroéconomie approfondie*. Cujas, Paris.
- RAMAT, E. (2006) : “Introduction à la modélisation et à la simulation à événements discrets,” dans *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société*, p. 37–60. Hermes-Sciences Lavoisier, Paris.
- RENDERS, J.-M., ET S. P. FLASSE (1996) : “Hybrid Methods Using Genetic Algorithms for Global Optimization,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 26.
- ROBINSON, J. (1962) : *Essays in the Theory of Economic Growth*. Macmillan, London.
- ROCHON, L.-P. (1999) : “The Creation and Circulation of Endogenous Money : A Circuit Dynamique Approach,” *Journal of economic issues*, 33(1), 1–21.
- (2005) : “The existence of Monetary Profits within the Monetary Circuit,” dans *Monetary Theory of Production Tradition and Perspectives*, ed. G. Fontana, et R. Realfonzo. Palgrave Macmillan, Basingstoke (UK).
- ROCHON, L.-P., ET M. VERNENGO (2003) : “La monnaie d’Etat et le monde réel : le malaise du chartalisme,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon. Economica, Paris.
- ROGERS, E. M. (1962) : *Diffusion of innovations*. Free Press of Glencoe, New York.
- ROSSI, S. (2005) : “Central Banking in a Monetary Theory of Production : The Economics of Payment Finality from a Circular-Flow Perspective,” dans *Monetary Theory of Production Tradition and Perspectives*, ed. G. Fontana, et R. Realfonzo, p. 139–151. Palgrave Macmillan, Basingstoke (UK).
- SARGENT, T. J. (1993) : *Bounded rationality in macroeconomics : the Arne Ryde memorial lectures*. Clarendon Press, Oxford.
- SCHELLING, T. C. (1971) : “Dynamic models of segregation,” *The Journal of Mathematical Sociology*, 1(2), 143–186.
- SCHMITT, B. (1972) : *Macroeconomic theory*. Castella, Albeuve.
- SEPPECHER, P. (2009) : “Un modèle macroéconomique multi-agents avec monnaie endogène,” Document de Travail 2009-11, Greqam.

- (2010a) : “Dysfonctionnement bancaire, bulle du crédit et instabilité macro-économique dans une économie monétaire dynamique et complexe,” *Revue économique*, 61(3).
- (2010b) : “Stratégies évolutionnaires dans un modèle macroéconomique dynamique et complexe peuplé d’agents hétérogènes, autonomes et concurrents,” Document de Travail, Groupe de travail Analyses et modélisation postkeynésienne, Centre d’Economie de Paris Nord.
- (2012) : “Flexibility of wages and macroeconomic instability in an agent-based computational model with endogenous money,” *Macroeconomic Dynamics*, 16(s2), forthcoming.
- SIMON, H. A. (1955) : “A behavioral model of rational choice,” *The Quarterly Journal of Economics*, 69(1), 99–118.
- (1959) : “Theories of decisions-making in economics,” *The American Economic review*, 49(3), 253–283.
- (1961) : *Administrative Behavior*. The free press, New York.
- (1962) : “The architecture of complexity,” *Proceedings of the american philosophical society*, 106(6).
- (1986) : “Rationality in psychology and economics,” *The journal of business*, 59(4).
- (1991) : *Models of My Life*. Basic Books, New York.
- (1992) : *Economics, bounded rationality and the cognitive revolution*. Edward Elgar, Brookfield, Vermont.
- (1996) : *The Science of the artificial*. MIT press, Cambridge (MA).
- (1997) : *Models of Bounded Rationality, Empirically Grounded Economic Reason*, vol. 3. MIT press, Cambridge (MA).
- (2004) : *Les sciences de l’artificiel*. Gallimard, Paris.
- SMALL, I. (1997) : “The cyclicalité of Mark-ups and Profit Margins : Some Evidence for Manufacturing and Services,” Working paper 72, Bank of England.
- SOLOW, R. (2010) : “Building a Science of Economics for the Real World,” House Committee on Science and Technology, Subcommittee on Investigations and Oversight.
- STIGLITZ, J., ET M. GALLEGATI (2011) : “Heterogeneous Interacting Agent Models for Understanding Monetary Economies,” *Eastern Economic Journal*, 37(1), 6–12.
- SYLOS LABINI, P. (1971) : “La théorie des prix en régime d’oligopole et la théorie du développement,” *Revue d’économie politique*, 81(2).

- SÉGURA, A. (1995) : “Le profit et l’intérêt dans le circuit,” *L’actualité économique*, 71(1).
- TAOUIL, R. (2007) : “Le statut problématique du markup dans la macroéconomie de Kalecki,” XIII Jornadas de Epistemología de las Ciencias Económicas, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires.
- TESFATSION, L. (2003) : “Agent-Based Computational Economics,” Document de Travail, Department of Economics, Iowa State University, Ames, Iowa, ISU Economics Working Paper No. 1.
- (2006) : “Agent-based computational economics : a constructive approach to economic theory,” dans *Handbook of computational economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- TOBIN, J. (1982) : “Money and finance in the macroeconomic process,” *Journal of Money, Credit and Banking*, 14(2), 171–204.
- (1991) : “The invisible hand in modern macroeconomics,” Document de Travail 966, Cowles foundation for research in economics at Yale university, Cowles foundation discussion paper.
- VALLÉE, T., ET M. YILDIZOGLU (2001) : “Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie,” Working Papers 2001-3, Equipe Industries Innovation Institutions, Université Bordeaux IV, France.
- (2004) : “Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie,” *Revue d’Economie Politique*, 114, 711–745.
- VAN DE VELDE, F. (2005) : *Monnaie, chômage et capitalisme*. Presses universitaires du septentrion, Villeneuve d’Ascq.
- VRIEND, N. J. (2006) : “ACE Models of Endogenous Interaction,” dans *Handbook of computational economics*, ed. L. Tesfatsion, et K. L. Judd, vol. 2. Elsevier/North-Holland, Amsterdam.
- WALRAS, L. (1954) : *Elements of Pure Economics*. George Allen and Unwin, London.
- WEGNER, P. (1990) : “Concepts and paradigms of object-oriented programming,” *OOPS Messenger*, 1, 7–87.
- WRAY, L. R. (2003) : “L’approche post-keynésienne de la monnaie,” dans *Théories monétaires Post Keynésiennes*, ed. P. Piégay, et L.-P. Rochon. Economica, Paris.
- WRIGHT, I. (2009) : “Implicit Microfoundations for Macroeconomics,” *Economics : The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 3(2009-19).
- ZEZZA, G. (2011) : “Godley and Graziani : Stock-Flow-Consistent Monetary Circuits,” Document de Travail, University of Cassino, Italy, and Levy Economics Institute, U.S.